

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS**

**METODOLOGÍA PARA EJECUCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD
PARA ORTOFOTOS, MEDIANTE COMBINACIÓN DE SENSOR
DIGITAL CON LIDAR EN ZONAS RURALES.**

TESIS DOCTORAL

B. MADELEINE SORIA MOLINA
Ingeniero Agrónomo

Madrid 2014

**Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría.
Expresión Gráfica.**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.

TESIS DOCTORAL

**METODOLOGÍA PARA EJECUCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD
PARA ORTOFOTOS, MEDIANTE COMBINACIÓN DE SENSOR
DIGITAL CON LIDAR EN ZONAS RURALES.**

Autor.-

B. MADELEINE SORIA MOLINA

Ingeniero Agrónomo.

Director.-

ALFONSO GÓMEZ MOLINA

Dr. Ingeniero Agrónomo.

Madrid 2014

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de la empresa STEREOCARTO, S.L., por haber puesto a mi disposición los medios y materiales que han hecho posible realizar esta tesis.

A D. Alfonso Gómez Molina, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Expresión Gráfica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos por sugerirme el tema de tesis, dirigir y apoyar con sus conocimientos.

Mi más profundo agradecimiento a Antonio Godino Jefe de Producción del Departamento de Ortofotos de la empresa STEREOCARTO, por su generosa ayuda con sus conocimientos, paciencia y sugerencias. Asimismo a los miembros de éste área, Carmen, Carlos, Gema, Ana, Eli y Miguel que han tenido la amabilidad de colaborar en el desarrollo de éste trabajo.

A Dña. Cristina Velilla Lucini, Secretaria Académica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos por su apoyo incondicional.

A Luis A. Condezo Hoyos por brindarme su apoyo incondicional, sugerencias y aliento cuando lo he necesitado.

A mis padres y hermanos por apoyarme y animarme en todo momento para la finalización de ésta tesis doctoral.

A mi esposo Emilio muchas gracias por la paciencia de haber soportado todo el tiempo que he dedicado a éste trabajo y no a él.

A mi hermana Erika

ÍNDICE

1.- RESUMEN	1
2.- INTRODUCCIÓN	4
3.- OBJETIVOS DE LA TESIS	10
4.- ANTECEDENTES	13
5.- TECNOLOGÍA EMPLEADA	21
5.1 SENSORES DIGITALES AEROTRANSPORTADOS	22
5.1.1 Introducción	22
5.1.2 Cámaras digitales fotogramétricas aéreas.....	22
5.1.3 Sistema LIDAR	30
5.2 SISTEMA DE NAVEGACION INERCIAL	36
5.2.1 Introducción	36
5.2.2 Apoyo aéreo cinemático	36
5.2.3 Componentes del sistema de navegación inercial (INS).....	37
5.2.4 Integración de GPS/IMU.....	40
5.3 ORIENTACIÓN DE IMÁGENES AÉREAS DIGITALES	47
5.3.1 Introducción	47
5.3.2 Aerotriangulación digital aérea.....	47
5.3.3 Georeferenciación directa (GPSD/INS) de imágenes aéreas	51
5.3.4 Orientación integrada con sensores (ISO).....	59
5.4 GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (MDE)	60
5.4.1 Introducción	60
5.4.2 Técnicas de obtención de MDE	60
5.4.3 Recomendaciones a tener en cuenta para realizar los MDE ´S.....	64
5.5 PROCESO DE ELABORACIÓN DE ORTOFOTOS	66
5.5.1 Introducción	66
5.5.2 Métodos de ortorectificación digital	66
5.5.3 Técnicas de remuestreo	69
5.5.4 Ajuste radiométrico de las ortofotos	70
5.5.5 Confección de ortofotomosaicos	73

6.- ESTUDIO EXPERIMENTAL	75
6.1 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE ORTOFOTOS EN AMÉRICA DEL SUR	76
6.2 VUELO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL COMBINADO	78
6.2.1 Introducción	78
6.2.2 Zona de estudio	78
6.2.3 Descripción de la zona de estudio.....	79
6.2.4 Sistema de referencia geodésico	79
6.2.5 Medios técnicos empleados.....	80
6.2.6 Planificación.....	83
6.2.7 Postproceso de las imágenes digitales.....	85
6.3 ORIENTACIÓN DE IMÁGENES	88
6.3.1 Introducción	88
6.3.2 Elementos para obtener los parámetros de orientación externa	88
6.3.3 Efemérides precisas GPS.....	88
6.3.4 Definición del bloque	93
6.3.5 Metodología de cálculo de orientación externa por orientación directa	94
6.3.6 Precisión de cálculo relativo.....	99
6.4 OBTENCIÓN DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN CON TECNOLOGÍA LIDAR	100
6.4.1 Introducción	100
6.4.2 Descripción del vuelo LIDAR	100
6.4.3 Prescripciones técnicas del modelo digital del terreno	103
6.4.4 Cálculo de trayectoria GPS/IMU.....	104
6.4.5 Postproceso de datos LIDAR.....	106
6.4.6 Cálculo de corrección de altura y ajuste de las pasadas	110
6.4.7 Transformación al sistema de coordenadas local	112
6.4.8 Clasificación de datos LIDAR.....	112
6.4.9 Generación del modelo digital de superficie para ortofoto (MDSO).....	118
6.4.10 Control de calidad de los datos LIDAR	120
6.5 EJECUCIÓN DE ORTOFOTOS DIGITALES	122
6.5.1 Introducción	122
6.5.2 Prescripciones técnicas.....	122
6.5.3 Rectificación diferencial. Ortofotografía del fotograma	123
6.5.4 Tratamiento de la imagen	124
6.5.5 Mosaico fotográfico y corte de hojas	125
6.5.6 Producto final.....	128
6.6 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD	133
6.6.1 Análisis de la calidad posicional	133

7.- DISCUSIONES	160
8.- CONCLUSIONES	169
9.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	173
10.- BIBLIOGRAFÍA	176
ANEXO I.- Metodología propuesta	184
ANEXO II.- Control de calidad de las ortofotos	184
ANEXO III.- Test estadísticos para evaluación de calidad posicional	184
ANEXO IV-A.- Cuadros de datos para las comparativas	184
ANEXO IV-B.- Cuadros de cálculos de las comparativas	184

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 2.1.- Sensor digital lineal ADS40 de LH Systems (A).....	6
Figura 2.2.- Sensor digital matricial Digital Mapping Camera (DMC) de Z/I Imaging (A). Captura de imagen mediante sensor matricial (B).....	6
Figura 2.3.- Sistema de barrido LIDAR (A) y medida de diferentes alturas a partir del primer y último rebote (B).....	7
Figura 2.4.- Modelo digital de la superficie (A) y modelo digital del terreno (B) obtenido del primero mediante filtrado.....	7
Figura 5.1.1.- Conexión sensor-resolución.....	23
Figura 5.1.2.- Cámara fotogramétrica aérea digital.....	24
Figura 5.1.3.- Esquema cámara digital.....	24
Figura 5.1.4.- Componentes de la cámara digital.....	25
Figura 5.1.5.- CCD lineal-matricial.....	26
Figura 5.1.6.- Estructura electrónica del sensor (A). Disposición de sensores (B).....	27
Figura 5.1.7.- CCD de cámaras digitales de línea.....	27
Figura 5.1.8.- Toma de imagen por barrido simultáneo.....	28
Figura 5.1.9.- Generación de una imagen en color de alta resolución.....	29
Figura 5.1.10.- Disposición de una muestra de puntos sobre el terreno.....	32
Figura 5.1.11.- Barrido de LIDAR.....	33
Figura 5.1.12.- Representación ángulos y frecuencias altas del barrido LIDAR.....	34
Figura 5.2.1.- Distribución de giróscopos y acelerómetros en IMU.....	38
Figura 5.2.2.- Frecuencias de registros de tiempos en los tres sistemas.....	40
Figura 5.2.3.- Rectificaciones a la trayectoria IMU por el sistema GPS.....	41
Figura 5.2.4.- Método no acoplado.....	42
Figura 5.2.5.- Método ligeramente acoplado.....	43
Figura 5.2.6.- Método acoplado.....	43
Figura 5.2.7.- Marco de referencia en el vehículo aéreo.....	44
Figura 5.2.8.- Distancias entre Cámara-GPS-IMU.....	45
Figura 5.3.1.- Ubicación puntos de enlace (1).....	50
Figura 5.3.2.- Ubicación de puntos de enlace (2).....	51
Figura 5.3.3.- Elementos de georeferenciación directa.....	53
Figura 5.3.4.- Parámetros de orientación externa (posición y ángulos).....	54
Figura 5.3.5.- Diferencial GPS.....	55
Figura 5.4.1.- Representación de un modelo digital de elevación en formato ráster.....	61
Figura 5.4.2.- Esquema de los componentes que intervienen en la tecnología LIDAR.....	61
Figura 5.4.3.- Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno en formato *. LAS (A). Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno vista en 3D (B).....	62
Figura 5.4.4.- Modelo digital del terreno a partir de LIDAR con vista en perspectiva.....	63
Figura 5.5.1.- Imagen digital aérea para ortorectificar (A). Imagen digital ortorectificada (B).....	66
Figura 5.5.2.- Bosquejo de obtención de ortofoto.....	67
Figura 5.5.3.- MDE para rectificación.....	69
Figura 5.5.4.- Métodos de remuestreo.....	70
Figura 5.5.5.- Método de ajuste del histograma.....	72

Figura 5.5.6.- Ortofoto con ajuste radiométrico.....	72
Figura 6.2.1.- Localización de la zona de estudio en el MTN50 ráster.....	79
Figura 6.2.2.- Cámara DMC - Z/I.....	81
Figura 6.2.3.- Componentes del sistema y disposición en el avión.....	82
Figura 6.2.4.- Esquema del funcionamiento del sistema FMC.....	83
Figura 6.2.5.- Gráfico de vuelo zona de estudio (Cáceres _Extremadura).....	84
Figura 6.2.6.- Detalle del gráfico de vuelo zona de estudio (Cáceres _Extremadura).....	84
Figura 6.2.7.- Configuración de las cámaras digitales en el sistema DMC.....	86
Figura 6.2.8.- Imagen digital_96_2827- rgbi.....	87
Figura 6.2.9.- Imagen digital _96_2828-rgbi (A). Imagen digital 96_2829-rgbi (B).....	87
Figura 6.3.1.- Primera página de los datos de efemérides para la orientación de imágenes (1).....	90
Figura 6.3.2.- Página intermedia de los datos de efemérides para la orientación de imágenes (2).....	91
Figura 6.3.3.- Última página de los datos de efemérides para la orientación de imágenes (3).....	92
Figura 6.3.4.- Bloque zona de estudio para orientación.....	94
Figura 6.3.5.- Trayectoria final procesada.....	96
Figura 6.3.6.- Trayectoria procesada en formato texto.....	96
Figura 6.4.1.- Componentes del sistema LIDAR ALS50.....	100
Figura 6.4.2.- Obtención automática efemérides con software IPAS-Pro de Leica.....	105
Figura 6.4.3.- Fichero solución de postproceso de la trayectoria por PPP.....	106
Figura 6.4.4.- Esquema de obtención de datos LIDAR.....	107
Figura 6.4.5.- Parámetros de calibración aplicados al postproceso para calcular los ficheros *.LAS.....	109
Figura 6.4.6.- Fichero final del postproceso para cada pasada (raw láser).....	110
Figura 6.4.7.- Altura inicial entre pasadas LIDAR.....	111
Figura 6.4.8.- Vista en planta y perfil de la nube de puntos LIDAR.....	114
Figura 6.4.9.- Control de calidad del modelo digital del terreno.....	115
Figura 6.4.10.- Modelo digital de superficie para ortofoto (1) (superficie sin líneas de ruptura).....	119
Figura 6.4.11.- Modelo digital de superficie para ortofoto (2) (superficie con líneas de ruptura - puente)....	119
Figura 6.4.12.- Modelo digital de superficie para ortofoto (3) (área total zona de estudio).....	120
Figura 6.4.13.- Vista en planta y perfil entre pasadas contiguas.....	121
Figura 6.5.1.- Distribución de hojas - zona de estudio (1) - Esc. 1:5.000.....	127
Figura 6.5.2.- Distribución de hojas - zona de estudio (2) - Esc. 1:5.000.....	127
Figura 6.5.3.- Ortofoto RGB_ zona de estudio (Cáceres - Extremadura).....	129
Figura 6.5.4.- Ortofoto CIR_ zona de estudio (Cáceres - Extremadura).....	131
Figura 6.6.1.- Distribución de puntos para control de posición en la orientación de imagen.....	144
Figura 6.6.2.- Distribución de puntos para control de posición en el MDT.....	149
Figura 6.6.3.- Distribución de puntos para control de posición en la ortofoto.....	156

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 5.3.1.- Productos de efemérides GPS.....	59
Cuadro 6.1.1.- Resumen de metodología propuesta para obtención de ortofotos Vs metodología del PNOA.....	77
Cuadro 6.2.1.- Descripción de elementos de la cámara DMC Z/I	80
Cuadro 6.2.2.- Características de los parámetros de vuelo.....	81
Cuadro 6.2.3.- Características de la aeronave	81
Cuadro 6.2.4.- Imágenes obtenidas por la cámara digital	85
Cuadro 6.3.1.- Primera página del cálculo de precisiones de las coordenadas de los centros de proyección	97
Cuadro 6.3.2.- Última página del cálculo de precisiones de las coordenadas de los centros de proyección	98
Cuadro 6.3.3.- Errores medios cuadráticos de posición X,Y,Z.....	99
Cuadro 6.3.4.- Errores medios cuadráticos para ángulos de orientación (omega , phi, kappa)	99
Cuadro 6.4.1.- Parámetros del vuelo LIDAR_configuración del escáner (1).....	102
Cuadro 6.4.2.- Parámetros del vuelo LIDAR_escaneo resultado (2).....	103
Cuadro 6.4.3.- Especificaciones técnicas del MDT	104
Cuadro 6.4.4.- Precisiones en planimetría y altimetría de la trayectoria LIDAR.....	106
Cuadro 6.4.5.- Precisiones absolutas de los ángulos de orientación del LIDAR.....	109
Cuadro 6.4.6.- Clasificación inicial para la nube de puntos LIDAR	113
Cuadro 6.4.7.- Condiciones particulares de la restitución	117
Cuadro 6.5.1.- Parámetros técnicos establecidos en la fase de ortorectificación.....	123
Cuadro 6.6.1.- Diferencias entre CDP PNOA versus CDP metodología propuesta para América del Sur (primera parte).	136
Cuadro 6.6.2.- Estadísticos de dispersión: CDP PNOA vs CDP metodología propuesta para América del del Sur. Coordenadas XYZ (1).....	137
Cuadro 6.6.3.- Estadísticos de dispersión: CDP PNOA vs CDP metodología propuesta para América del del Sur. Angulos de orientación (2).	137
Cuadro 6.6.4.- Diferencias entre CDP PNOA versus CDP AT-PNOA (primera parte).....	138
Cuadro 6.6.5.- Diferencias entre CDP metodología propuesta versus CDP AT-PNOA (primera parte).....	139
Cuadro 6.6.6.- Estadísticos de dispersión: CDP PNOA y CDP metodología propuesta para América del Sur versus AT PNOA. Coordenadas XYZ (1).	140
Cuadro 6.6.7.- Estadísticos de dispersión: CDP PNOA y CDP metodología propuesta para América del Sur versus AT PNOA. Angulos de orientación (2).....	140
Cuadro 6.6.8.- Tabla Anova (1): coordenadas de los centros de proyección agrupados.	142
Cuadro 6.6.9.- Tabla Anova (2): ángulos de orientación agrupados.	142
Cuadro 6.6.10.- Tabla Anova (3): coordenadas de los centros de proyección de forma independiente...	143
Cuadro 6.6.11.- Tabla Anova (4): ángulos de orientación de forma independiente.....	143
Cuadro 6.6.12.- Coordenadas y diferencias entre AT-PNOA versus orientación de imágenes metodología propuesta.....	145

Cuadro 6.6.13.- Estadísticos de dispersión: AT-PNOA versus orientación de imágenes metodología propuesta.	146
Cuadro 6.6.14.- Estadísticos y errores medios en coordenadas conjuntas XY y Z.	147
Cuadro 6.6.15.- Detección de sistematismos en coordenadas XYZ.	147
Cuadro 6.6.16.- Detección de errores casuales en coordenadas XYZ.	147
Cuadro 6.6.17.- Test NSSDA: AT-PNOA versus orientación de imágenes metodología propuesta.	147
Cuadro 6.6.18.- Altitudes (Z) y diferencias de comparativa 1.	150
Cuadro 6.6.19.- Estadísticos de dispersión: datos LIDAR met.propuesta y datos LIDAR PNOA versus puntos AT-PNOA.	151
Cuadro 6.6.20.- Estadísticos y errores medios en datos LIDAR (Z).	151
Cuadro 6.6.21.- Detección de sistematismos en Z de datos LIDAR.	151
Cuadro 6.6.22.- Detección de errores casuales en Z de datos LIDAR.	151
Cuadro 6.6.23.- Test NSSDA: datos LIDAR met.propuesta y datos LIDAR PNOA versus puntos AT-PNOA.	151
Cuadro 6.6.24.- Errores medios en Z datos LIDAR considerando la pendiente.	152
Cuadro 6.6.25.- Altitudes (Z) y diferencias de comparativa 2.	152
Cuadro 6.6.26.- Estadísticos de dispersión: MDT grid met. propuesta y MDT grid PNOA versus puntos AT-PNOA.	153
Cuadro 6.6.27.- Estadísticos y errores medios en MDT GRID.	153
Cuadro 6.6.28.- Detección de sistematismos en Z-MDT GRID.	153
Cuadro 6.6.29.- Detección de errores casuales en Z-MDT GRID.	154
Cuadro 6.6.30.- Test NSSDA: MDT grid met. propuesta y MDT grid PNOA versus puntos AT-PNOA.	154
Cuadro 6.6.31.- Errores medios en Z mdt grid considerando la pendiente.	154
Cuadro 6.6.32.- Altitudes y diferencias entre ortofoto PNOA versus ortofoto metodología propuesta.	157
Cuadro 6.6.33.- Estadísticos de dispersión: ortofoto PNOA versus ortofoto metodología propuesta.	158
Cuadro 6.6.34.- Estadísticos y errores medios en coordenadas conjuntas XY.	158
Cuadro 6.6.35.- Detección de sistematismos en coordenadas XY.	158
Cuadro 6.6.36.- Detección de errores casuales en coordenadas XY.	159
Cuadro 6.6.37.- Test NSSDA: ortofoto PNOA versus ortofoto metodología propuesta.	159
Cuadro 6.6.38.- Resumen de resultados del análisis de la calidad posicional. Planimetría y altimetría.	159
Cuadro 6.6.39.- Variables analizadas y estadísticos utilizados en el control de calidad posicional.	161
Cuadro 6.6.40.- Precisiones esperadas escala 1:10.000 (nacional) y escala 1:5.000 (América del Sur).	171

1.- RESUMEN

1. RESUMEN

La utilización de una cámara fotogramétrica digital redundante en el aumento demostrable de calidad radiométrica debido a la mejor relación señal/ruido y a los 12 bits de resolución radiométrica por cada píxel de la imagen. Simultáneamente se consigue un notable ahorro de tiempo y coste gracias a la eliminación de las fases de revelado y escaneado de la película y al aumento de las horas de vuelo por día.

De otra parte, el sistema láser aerotransportado (LIDAR - *Light Detection and Ranging*) es un sistema con un elevado rendimiento y rentabilidad para la captura de datos de elevaciones para generar un modelo digital del terreno (MDT) y también de los objetos sobre el terreno, permitiendo así alcanzar alta precisión y densidad de información.

Tanto el sistema LIDAR como el sistema de cámara fotogramétrica digital se combinan con otras técnicas bien conocidas: el sistema de posicionamiento global (GPS - *Global Positioning System*) y la orientación de la unidad de medida inercial (IMU - *Inertial Measure Units*), que permiten reducir o eliminar el apoyo de campo y realizar la orientación directa de los sensores utilizando datos de efemérides precisas de los satélites.

Combinando estas tecnologías, se va a proponer y poner en práctica una metodología para generación automática de ortofotos en países de América del Sur. Analizando la precisión de dichas ortofotos comparándolas con fuente de mayor exactitud y con las especificaciones técnicas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) se determinará la viabilidad de que dicha metodología se pueda aplicar a zonas rurales.

ABSTRACT

Using a digital photogrammetric camera results in a demonstrable increase of the radiometric quality due to a better improved signal/noise ratio and the radiometric resolution of 12 bits per pixel of the image. Simultaneously a significant saving of time and money is achieved thanks to the elimination of the developing and film scanning stages, as well as to the increase of flying hours per day.

On the other hand, airborne laser system *Light Detection and Ranging* (LIDAR) is a system with high performance and yield for the acquisition of elevation data in order to

generate a digital terrain model (DTM), as well as objects on the ground which allows to achieve high accuracy and data density.

Both the LIDAR and the digital photogrammetric camera system are combined with other well known techniques: global positioning system (GPS) and inertial measurement unit (IMU) orientation, which are currently in a mature evolutionary stage, which allow to reduce and/or remove field support and perform a direct guidance of sensors using specific historic data from the satellites.

By combining these technologies, a methodology for automatic generation of orthophotos in South American countries will be proposed and implemented. Analyzing the accuracy of these orthophotos comparing them with more accurate sources and technical specifications of the National Aerial Orthophoto (PNOA), the viability of whether this methodology should be applied to rural areas, will be determined.

2.- INTRODUCCIÓN

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad uno de los temas de más interés en el ámbito de la Fotogrametría digital están encaminados hacia el desarrollo de metodologías y técnicas que permitan disponer de cartografía cada vez más precisa, rápida, económica y actualizada, ya que es una necesidad de la sociedad actual. Afortunadamente, día a día, han ido apareciendo más herramientas que permiten aumentar tanto el rendimiento como la propia calidad de los trabajos realizados. En ese sentido sin duda se puede señalar que tanto los sensores digitales como el LIDAR desempeñan un papel importante en la generación de MDT y ortofotos.

A partir del 2000, las tecnologías han permitido conseguir la correspondencia automática de imágenes y alcanzar precisiones de subpixel, reducir y/o eliminar las fases de apoyo de campo y aerotriangulación, agilizar notablemente la confección del modelo digital del terreno y obtener por lo tanto la ortofotografía, con apenas participación de un operador humano.

Los sensores digitales fotogramétricos matriciales o de arrays lineales han entrado con fuerza y están en período de expansión. Los sensores lineales requieren la utilización del sistema GPSD/INS, debido a que su funcionamiento es muy similar al de un escáner transversal formado por un array lineal de fotodetectores. Cada imagen estará formada por un conjunto de líneas de imagen que tendrá que ser rectificadas a partir de sus parámetros de orientación externa. Sin embargo, en los sensores matriciales el sensor formador de imágenes no depende de un sistema GPSD/INS para obtener una imagen correcta, sin deformación por altitud del avión en el momento de barrido. En ambos casos se evita la utilización de un escáner para tener que pasar de formato analógico a digital.

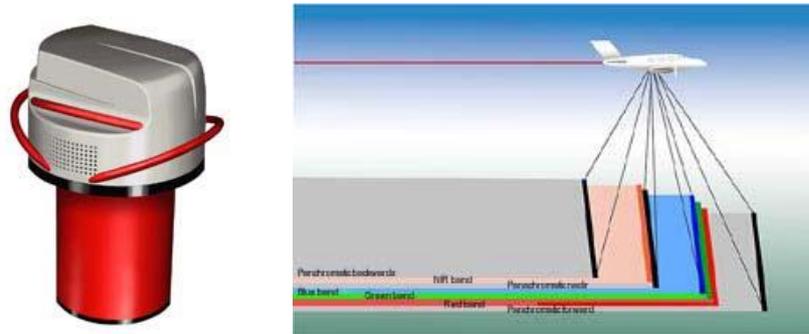


Figura 2.1.- Sensor digital lineal ADS40 de LH Systems (A). Captura de imagen mediante sensor lineal. Obtiene de forma simultánea las tres bandas (frontal, nadiral y trasera) apareciendo todos los elementos del terreno en las tres imágenes (B).

Fuente: Adaptado de Lizana (2008).

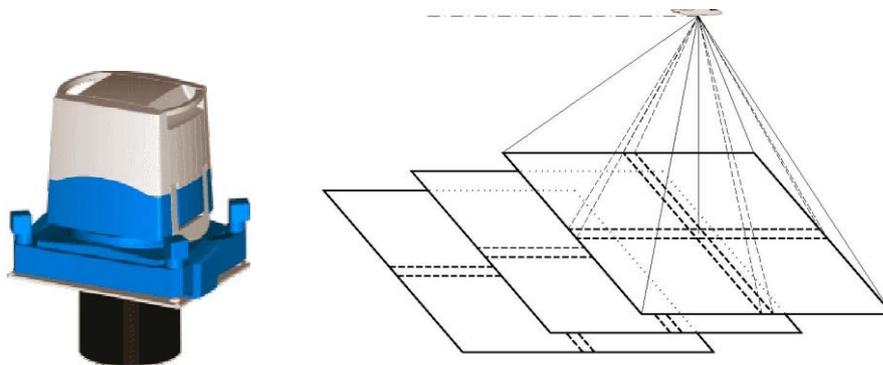


Figura 2.2.- Sensor digital matricial *Digital Mapping Camera* (DMC) de Z/I Imaging (A). Captura de imagen mediante sensor matricial (B).

Fuente: Adaptado de Lizana (2008).

El LIDAR cuyo elemento principal es el escáner láser que va aerotransportado y emite pulsos de luz infrarroja, sirve para determinar la distancia entre el LIDAR y los puntos terreno.

Es una técnica muy apetecida por los técnicos y usuarios de información georeferenciada, ya que a bajos costos y rapidez en la obtención de datos georeferenciados, ofrece modelos de elevación del terreno de alta precisión, además una gran información de todos los elementos naturales y obras civiles para estudios de ingeniería, planeación, explotación, etc.

Asimismo permite la modelización rápida del terreno en zonas de difícil acceso. La precisión de los datos LIDAR es una función de la altura de vuelo, el diámetro del rayo láser (dependiente del sistema), la calidad de los datos GPS / Unidad de medida inercial (IMU - Inertial Measure Unit) y los procedimientos de post procesamiento.

Asumiendo parámetros óptimos, se pueden lograr precisiones aproximadas de 20 cm en planimetría y 15 cm en altimetría.

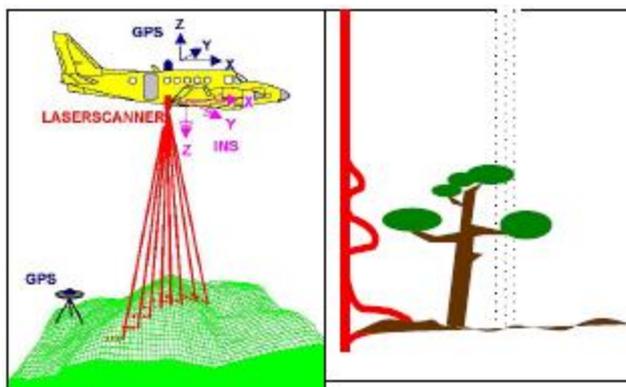


Figura 2.3.- Sistema de barrido LIDAR (A) y medida de diferentes alturas a partir del primer y último rebote (B).
Fuente: Adaptado de Colomer (2005).

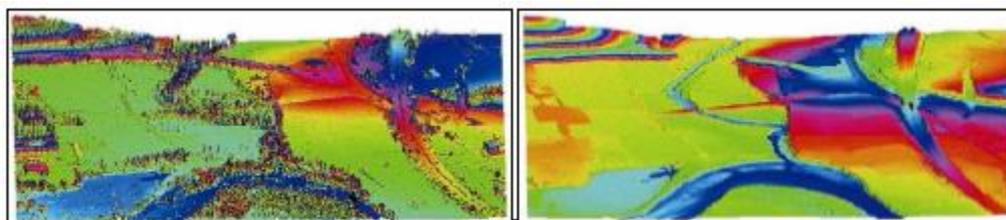


Figura 2.4.- Modelo digital de la superficie (A) y modelo digital del terreno (B) obtenido del primero mediante filtrado.
Fuente: Adaptado de Colomer (2005).

La combinación de estas tecnologías:

- Sensores LIDAR
- Sensor fotogramétrico digital
- Sistemas IMU y GPS

Ofrecen las siguientes ventajas técnicas más importantes:

- Reducen o eliminan el control terrestre.
- Agilizan o eliminan la fase de aerotriangulación.
- Reducen el tiempo de ejecución del proyecto, su coste y el número de imágenes.
- Aportan flexibilidad a la geometría del bloque.
- Definen planimétrica y altimétricamente con alta precisión la zona de estudio.
- Para algunos sensores es la única vía de orientación.
- Eliminan fases engorrosas como el escaneo de la película.

Estas tecnologías empiezan tímidamente a hacer presencia en los países de América del Sur, algunos Institutos Geográficos Nacionales (IGN's) con apoyo y financiación de países europeos han iniciado proyectos piloto para mejorar sus sistemas cartográficos, y poder satisfacer la creciente demanda de documentos de cartografía, ortofotografía actualizadas.

El trabajo de investigación surge ante una creciente demanda de documentos cartográficos en los países de América del Sur, y una serie de obstáculos en el proceso de obtención de los mismos tales como la utilización de procesos tradicionales que resultan siendo largos y costosos.

Asimismo los terrenos de difícil acceso debido a factores como la presencia permanente de nubes representan una dificultad a la hora de realizar los vuelos fotogramétricos digitales teniendo que cambiar las fechas programadas por días de mejores condiciones meteorológicas (que a veces solo dura unas horas) para cumplir las normas geométricas de las fotografías que exige un máximo del 10% de nubes en el área de imagen. También son factores limitantes la vegetación densa, el relieve altamente accidentado donde es imposible poder acceder por ejemplo para tener que levantar puntos de apoyo de campo.

De igual modo otro de los problemas es la escasa densificación de las redes de estaciones terrestres fijas, hay zonas donde no se disponen de ellas a menos de 40 Km. que son las exigidas por los pliegos técnicos lo cual significa tener que implementar estaciones fijas temporales y esto supone un incremento económico, aunque en los últimos años se ha venido ampliando estas redes aún es insuficiente.

En ese sentido la investigación se centrará en establecer una metodología propuesta introduciendo ciertas innovaciones en el sistema tradicional de generación de ortofotos mediante la combinación de sensor digital fotogramétrico con LIDAR en la que se utilizará la técnica de orientación directa y un MDT procedente del LIDAR que permitirán reducir los tipos de obstáculos mencionados, simplificar los procesos, acelerar la obtención de la ortofoto y reducir los costes (en el orden de 60- 85% del costo global).

Los resultados obtenidos se compararán y analizarán con las precisiones de fuente de mayor exactitud y las establecidas en las especificaciones técnicas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, para definir la posibilidad de aplicar y recomendar a otras zonas rurales.

3.- OBJETIVOS DE LA TESIS

3. OBJETIVOS DE LA TESIS

En los momentos actuales en los países de América del Sur, existe un vacío considerable en cuanto a disponer de una metodología para generar ortofoto precisa, rápida y económica mediante una producción automática con las tecnologías de punta como sensores digitales, sensor LIDAR, sistemas inerciales y técnicas de orientación de imágenes.

Existen estudios que guardan relación con la presente investigación pero ninguno aborda una metodología que esté pensada para las condiciones de los países de América del Sur con la combinación de estos sistemas y tecnologías mencionadas.

El objetivo general a alcanzar en la tesis es la siguiente:

Determinar una metodología para la ejecución y control de calidad para obtención de Ortofotos, mediante combinación de cámara digital con tecnología LIDAR para proyectos de ingeniería, y en función de la precisión obtenida sus posibles aplicaciones en zonas rurales de América del Sur.

Este objetivo se aborda en dos fases:

1.- Estudio teórico sobre la tecnología empleada que incluirá:

- Revisar y estudiar ampliamente el estado actual de la técnica.
- Revisar y analizar el pliego técnico y metodologías sobre el control de calidad en la producción de ortofotos utilizados por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea – España.
- Revisar ampliamente el Plan Nacional de Ortofotografía de América del Sur, utilizados en catastro, cartografía, medio ambiente, ordenación del territorio y planificación territorial.

2.- Estudio experimental, donde vamos a:

- Elaborar y ejecutar la metodología propuesta con parámetros relajados para obtención de ortofotos de forma automática.

- Comparar los resultados obtenidos con fuente de mayor exactitud y en las especificaciones técnicas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea que van a permitir conocer la calidad de los resultados y su validación buscada.

4.- ANTECEDENTES

4. ANTECEDENTES

La generación de nuevos sensores digitales, entre ellos cámaras digitales fotogramétricas, altímetro LIDAR y los sistemas de orientación directa en vuelo GPS/INS, han desempeñado un rol muy importante en la evolución de la generación de ortofotos permitiendo una automatización del proceso productivo en vuelo fotogramétrico, modelo digital del terreno y ortofoto digital.

En el presente capítulo se expone el estudio exhaustivo de investigaciones relevantes que abordan temas similares a este trabajo difundidas en artículos de revistas indexadas, capítulos de libros, conferencias, etc. que sustentan los planteamientos de este proyecto.

Entre las investigaciones consultadas sobre metodologías individuales y combinadas utilizando sensores digitales (LIDAR y cámaras digitales fotogramétricas) para generación de ortofotos. Aquí presentamos varios proyectos realizados en los últimos años, cada uno con aportes valiosos a la producción cartográfica.

En el tema de metodologías combinadas, Smith et al. (2000), realizaron un estudio sobre la relación entre LIDAR y fotogrametría digital desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo. Describieron las tecnologías de estos sensores, la creación automática del MDS para ambos métodos y las influencias en su calidad. El estudio determinó que la calidad de precisión del MDS procedente del láser aerotransportado depende de la calidad del posicionamiento del GPS y los sistemas inerciales (IMU). La integración de ambos sistemas permitió mejorar el MDS proporcionándole capacidades adicionales para diferentes aplicaciones en comparación a las obtenidas independientemente. Los avances en este campo han estimulado la reducción del costo y la automatización de los procesos.

Las investigaciones de Disa et al. (2011, 2012) y Gunay et al. (2007), hacen referencia a un objetivo similar, generación de ortofotos verdaderas combinando imágenes aéreas digitales con MDT, MDS a partir de LIDAR pero con diferentes métodos y enfoques, realizan análisis de documentos, comparativas entre ortofotos y ortofotos verdaderas y análisis de resultados. Ellos establecieron que la calidad de la ortofoto verdadera depende en gran medida del MDS, y que la mezcla de datos de MDS combinado con MDT es el mejor método para generar ortofotos verdaderas con alta precisión, cosa que el LIDAR lo permite.

Además de la combinación de datos procedentes de ambos sensores, estos pueden ser integrados con otros datos auxiliares, cuestión que estudia Kunapo (2005) mediante la integración de datos espaciales y posterior clasificación de puntos LIDAR para obtención de MDE, siendo el método viable aunque es necesario aportar datos auxiliares de altura.

Guana (2012) realizó un estudio para seleccionar las mejores características para clasificación de los suelos utilizando el método particular Randomforest a partir de datos combinados LIDAR y ortoimagen. El sistema LIDAR demostró tener potencial en áreas urbanas. Sin embargo, la forma de seleccionar las mejores características para los diferentes usos aún es un reto. Los resultados demuestran que con el método particular se pueden obtener clasificaciones satisfactorias.

Siguiendo el tema de combinación, Huang et al. (2011) compararon tres métodos de fusión mediante algoritmos (vector de aproximación, reclasificación y postprocesamiento) aplicados a imágenes aéreas y datos LIDAR para zonas urbanas. La fusión de estos algoritmos no sólo resultó tener potencial para los datos LIDAR, sino también para la fusión de información de otros multisensores. Por los resultados obtenidos en zonas urbanas, estos métodos también podrían servir para zonas rurales.

Rottensteiner et al. (2003); Chen et al. (2004); Awrangjeb et al.(2010), describieron un enfoque similar, detección automática de edificios usando datos LIDAR e imágenes multispectrales, aunque utilizan metodologías y técnicas diferentes, Awrangjeb comenta las deficiencias de su método en zonas de pendiente y en áreas de edificios densos. En estos estudios se recogen principios de la tecnología LIDAR, esquemas de trabajo, detección y clasificaciones de edificios para generar MDS, análisis de los experimentos.

En sus investigaciones, Habib et al. (2008) desarrollaron una metodología para creación de un entorno urbano realista en 3D a través de la integración de LIDAR y datos fotogramétricos. En el describen la técnica de trabajo para generación de ortofoto verdadera, la obtención de un MDS refinado como resultado de la unión de MDT + el modelo de edificios y superposición en un modelo urbano para su visualización. Señalan los beneficios de utilizar ambos datos integrados entre ellos la obtención de un modelo digital de edificios mejorado, mayor precisión en las ortofotos

verdaderas; asimismo, que el uso de los datos LIDAR elimina la necesidad de puntos de control terrestre.

Schenk et al. (2002) presentaron un estudio sobre la descripción de dos aspectos de la fusión de imágenes aéreas y LIDAR. Pormenorizaron las características extraídas de sensores digitales, así como su utilización en la obtención de MDT, MDE y ortofotos. Realizaron comparaciones de métodos importantes para la reconstrucción de superficies y plantearon las primeras cuestiones en la existencia de una descripción general para estos casos. Concluyeron favorablemente respecto a reconstrucción de superficies ya que los sensores contribuyen con información que se complementan.

Las investigaciones de Hermosilla et al. (2001) evaluaron la detección automática de edificios combinando imágenes de alta resolución y datos LIDAR. Analizaron la calidad de dos enfoques de clasificación, una primera basada en umbrales con valores de alturas mínimas establecidas para diferenciar edificios y vegetación y la segunda en base a una clasificación estándar de extracción de características y selección. Establecieron problemas de complejidad en los procesos en la clasificación estándar debido a la gran cantidad de parámetros necesarios para su definición y finalmente demostraron que el enfoque de umbrales proporcionó los mejores resultados en los casos analizados.

En sus estudios Kokkas et al. (2006) desarrollaron un método semi-automático para la reconstrucción de edificios utilizando técnicas de fusión de datos para aumentar la precisión planimétrica de estos modelos. Definieron expresiones matemáticas del par estéreo, métodos de clasificación de datos LIDAR, reclasificación del MDS, análisis de los modelos reconstruidos. Concluyeron que el método en particular tiene capacidad de reconstruir a un alto nivel de detalle, considerando el techo de los edificios.

Trinder et al. (2011) realizaron un proyecto de investigación en optimización y validación para la clasificación de suelos usando imágenes aéreas multiespectrales y datos LIDAR. En la etapa optimización desarrollaron un método para ajuste de curvas y reducción de malla al mínimo, aplica la función de base radial (RBF-Radius Basis Function). Para validación utilizaron modelos Support Vector Machines (SVMs) comparados con otros clasificadores. Estos autores llegaron a conclusiones favorables para este método en particular, ya que cuanto mayor es la precisión de clasificación en general, los errores por clases son bajos comparados con otros métodos de clasificación.

En su trabajo de investigación sobre obtención automática de límites de edificios combinando imágenes digitales de alta resolución y datos LIDAR, Cheng et al. (2008) desarrollaron un método en cuatro etapas: procesamiento de datos, generación de edificios, extracción de segmentos de líneas y extracción de límites de segmentos. Utilizaron dos algoritmos, uno basado en la imagen del edificio y dirección inicial para estimar la orientación principal de los edificios y garantizar la precisión geométrica en la extracción de segmentos y el otro para identificar límites de segmentos basado en el análisis de la densidad de los puntos LIDAR y Kmeans-clustering. Los resultados demostraron ser una alternativa para determinar los límites de edificios.

Finalmente en el tema de metodología combinada, Abedinia (2008) realizó una investigación sobre un método para el registro de datos de imágenes aéreas y datos LIDAR utilizando la técnica Sift bajo procesamiento automatizado. Concluyó favorablemente respecto al uso de esta técnica si la intensidad de las imágenes de LIDAR se utiliza para este propósito, ya que en general una gran cantidad de puntos, coincidentes entre ambos conjuntos de datos, pueden ser extraídos.

En el tema de metodologías independientes por fases específicas; cuestión que estudió, Paparoditis (2006) en la fase de vuelo fotogramétrico. Este realizó un trabajo sobre el impacto del sistema de cámaras digitales en la automatización y flujo de trabajo en la producción cartográfica, manifestando que los sistemas han mejorado en gran medida la calidad de las imágenes y productos, asimismo en las líneas de productividad. En particular la calidad radiométrica de las ortoimágenes depende de la calidad de las imágenes aéreas capturadas por las cámaras y su tratamiento inicial.

Siguiendo el tema anterior, Maas et al. (2007), realizaron un estudio particular utilizando además de cámara, vídeos de alta resolución para obtención de aerotriangulación, MDE, ortofoto. Llevaron a cabo su investigación en zonas alpinas y de deslizamiento en Suiza, transportando los sensores en un helicóptero, con resultados prometedores de precisión tanto en planimetría y altimetría en los diferentes productos.

Otra fase específica es la orientación de imágenes, tema estudiado por Cramer (1999, 2001). En las dos investigaciones que realizó, planteó la posibilidad de utilizar la georeferenciación para orientar las imágenes eliminando la fase de aerotriangulación del método tradicional. Desarrolló el funcionamiento específico entre los datos obtenidos por el GPS y los sistemas inerciales, asimismo mencionó la repercusión que

ejerce en la trayectoria y los centros de proyección. Adicionalmente describió la necesidad de una calibración periódica, el empleo de expresiones matemáticas en el ajuste del bloque, sugiriendo utilizar un mínimo de puntos de apoyo en tierra para eliminar errores.

Continuando en la fase de orientación, la investigación de Miguelsanz (2004) propuso metodologías y flujos de trabajos para la orientación de imágenes utilizando la técnica de orientación directa (GPSD/INS diferencial) con estaciones de referencia. Realiza comparativas en el cálculo de los centros de proyección (CDP) de las imágenes, combinando los datos del sistema inercial aerotransportado con datos de estaciones a diferentes distancias. Los resultados del postproceso mostraron claramente que las diferencias en los CDP son mayores al utilizar estaciones alejadas. El estudio llevó a considerar que la técnica de orientación directa es una alternativa frente a las técnicas tradicionales de orientación, permitiendo reducir el apoyo de campo y agilizar la fase de aerotriangulación aérea.

Dentro del proceso de producción de ortofotos otra fase específica y muy importante es la del modelo digital del terreno, asunto estudiado por Jung et al. (2005), ellos realizaron una revisión actualizada al 2005 de las técnicas para reconstrucción de MDE, MDT con imágenes de alta resolución. Describieron las técnicas, ventajas, inconvenientes, aplicaciones para obtención de MDE e integración con imágenes y ortofotos verdaderas. Asimismo, llevaron a cabo una comparativa de técnicas fotogramétricas y escáner láser (LIDAR) generando un MDT para zonas rurales, donde muestra que la precisión depende de la función de interpolación elegida. Así, dependiendo de la resolución final que se quiere alcanzar la densidad de puntos láser pueden ser ajustados fácilmente. A mayor densidad detectada, mayor es el detalle obtenido.

Bretar et al. (2008), realizaron un estudio sobre la relevancia de utilizar MDT derivado del LIDAR, enfocado en la generación, características del MDT y procesos automáticos para clasificación del terreno. El estudio introduce imágenes ortorectificadas para el proceso de clasificación; así como, datos LIDAR para fines hidrológicos.

El estudio realizado por Liu (2008) enfocó la clasificación de datos LIDAR, métodos de interpolaciones, resolución de MDE, reducción de datos, generación de MDE y sobre algunos problemas críticos. Los elementos específicos como las líneas de ruptura

contribuyen significativamente la calidad del MDE, por lo tanto la reducción de datos (necesarios para el proceso de generación de MDE) debe hacerse teniendo en cuenta estos elementos. Asimismo, las líneas de ruptura, dada la alta densidad característica de los datos LIDAR, pueden ser extraídas directamente de estos datos e integrarlas a los MDE.

Li et al. (2010) desarrollaron un método de filtrado de los datos LIDAR para generar MDE y clasificar los puntos terreno y de superficie. El método se puede utilizar en diferentes tipos de terreno (urbanas, forestales y combinados), siendo necesario antes analizar y modificar los parámetros en una zona de prueba. En relación con lo anterior es preciso tener en cuenta que algunos puntos terrestres es imposible quitar con el filtrado, siendo necesario realizar una clasificación manual para obtener un MDE bien definido.

Siguiendo en el tema de modelo digital, Cai et al. (2004) propusieron un método para generar MDT utilizando un algoritmo específico que permitió clasificar zonas de pendiente pronunciada, conservando el mayor detalle o mejorar la definición del modelo en zonas con oclusiones. En este caso la clasificación fue aplicada en la estimación de inundaciones con resultados prometedores.

Gonçalves (2008), realizó su estudio evaluando tres métodos de clasificación de los datos LIDAR en zonas rurales, concretamente en zonas con riesgo de incendios. Determinó que los métodos presentados eran viables; sin embargo, manifiesta que subsisten algunas dificultades para separar vegetación alta y edificios.

La investigación sobre el registro de árboles para el modelo de ciudades en 3D fue realizado por Secord (2007), él propuso un método en dos pasos que consiste en realizar una segmentación seguida de una clasificación, utilizando un algoritmo y vectores de apoyo respectivamente. Este autor concluyó que la clasificación no se puede utilizar de manera general para mejorar el rendimiento en base al esquema de segmentación.

Buján et al. (2013), realizaron un estudio de evaluación y análisis sobre la posibilidad de clasificar paisajes rurales utilizando datos LIDAR de baja densidad. Llevaron a cabo el experimento aprovechando el lanzamiento de proyecto PNOA España utilizando densidades de 0.5 -1 pulsos/ m² y analizaron la posibilidad de clasificación de los

datos LIDAR multitemporal y multidensidad en 8 clases y la influencia de la densidad de puntos en la precisión.

Las investigaciones de Liu et al. (2007) propusieron un método para obtener puntos de control terreno y MDE para ortorectificación de imágenes utilizando datos LIDAR. Obteniéndose los puntos de control del mapa de intensidad LIDAR mientras que el MDE se generó a partir de la nube de puntos, quedando demostrado que una alta precisión de los datos anteriores ofrecen ortoimágenes con mayor precisión.

Xie et al. (2006), presentaron un modelo para describir exactamente edificios urbanos 3D para generación de ortofotos verdaderas a gran escala. Desarrollaron la estructura de datos (tres niveles) y representación del modelo de edificios. Asimismo, presentaron un método para extracción de edificios, que incluye parámetros de geometría sólida constructiva con diferentes alturas. Concluyeron satisfactoriamente ya que el método aumentó enormemente la eficacia de extracción.

Finalmente, para la fase de ortofotografía Qin et al. (2003), propusieron una metodología para ortorectificación automática de imágenes aéreas y detección de oclusiones de edificios para generar ortofotos verdaderas. Estos autores explican el modelo matemático y generación de ortoimágenes. La ortorectificación con esta metodología requirió disponer de un modelo con un solapamiento entre imágenes vecinas lo suficientemente grande para garantizar el 100% de visibilidad de zonas ocluidas.

5.- TECNOLOGÍA EMPLEADA

5.1 SENSORES DIGITALES AEROTRANSPORTADOS

5.1.1 Introducción

La tendencia actual dentro de la fotogrametría digital es poder obtener productos cartográficos en el menor tiempo posible y con la mayor precisión, en ese sentido la utilización de sensores digitales fotogramétricos y el sistema LIDAR nos permite una automatización en el proceso productivo como vuelo fotogramétrico, MDT, ortofoto, etc.

5.1.2 Cámaras digitales fotogramétricas aéreas

5.1.2.1 Introducción

Hoy en día, se puede hablar, no ya de cámaras exclusivamente, sino de sensores en general ya que dentro de ese gran grupo de instrumentos entran tanto las cámaras digitales, LIDAR, radar, magnetómetros y cualquier otro que capte datos de la tierra desde un medio aéreo o espacial.

En la figura 5.1.1 se muestra un resumen del actual estado de estos sensores. En el eje de las x aparece la resolución en metros que permiten alcanzar cada uno de los sensores o la necesaria para los diferentes segmentos de aplicación de la parte superior. Por ejemplo para aplicaciones de cartografía topográfica, como puede ser la catastral, los actuales sistemas ofrecen resoluciones que van desde los 2 m. (vuelo alto) a los 5 cm. Para estudiar recursos terrestres, los sensores satelitarios ofrecen resoluciones que se mueven entre los 50 m y los 10 m.

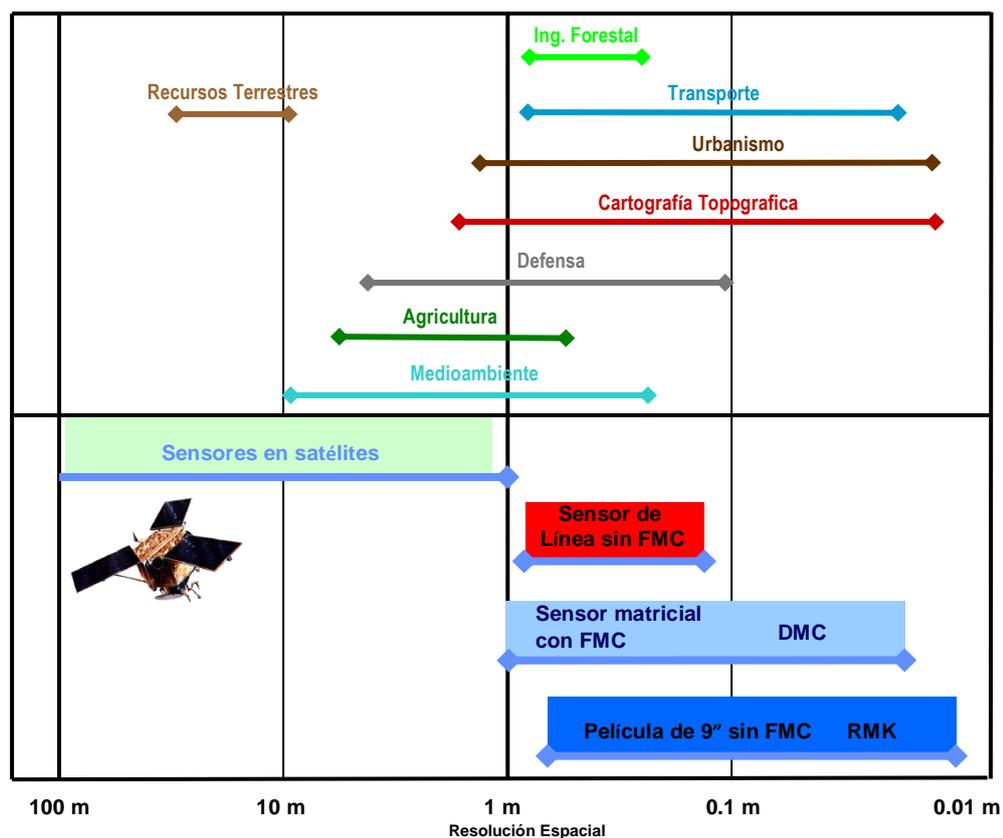


Figura 5.1.1.- Conexión sensor-resolución.
Fuente: Adaptado de Santos (2006).

Si se estudia la segunda fila de la figura (5.1.1), se pueden obtener las precisiones de los actuales sensores, de forma que los ubicados en satélites normalmente utilizados para teledetección empiezan desde los 100 m. Los sensores de línea o matriciales van desde 1 m. a los 5 cm.

5.1.2.2 Compatibilidad y registro en cámaras digitales aéreas

En el sistema digital, sólo es necesario volar una vez sobre la zona, ya que las imágenes se registran en los sensores de forma simultánea (blanco y negro, color o infrarrojo). Se almacenan en forma digital en discos duros y tras un breve postproceso se puede trabajar con ellas en una estación de trabajo fotogramétrica digital (DPW - *Digital Photogrammetric Workstation*) de forma directa e imprimirlas si fuera necesario. (Santos, 2009).

En este punto las imágenes se pueden emplear para alimentar un sistema de información geográfica (SIG), realizar ortofotos (tradicionales o true-ortho si contamos con datos LIDAR), realizar clasificaciones, etc.

Referente a la orientación exterior que es el sistema de georeferenciación del vuelo, en el caso de las cámaras digitales es continua, ya sea de barrido de línea o matricial, ya que los sistemas GPS/INS suministran coordenadas muy abundantes de la trayectoria (figura 5.1.2). El sistema GPS aporta coordenadas de ciertos puntos y la IMU ofrece las coordenadas de los puntos interpoladas entre dos ofrecidas por el sistema GPS.

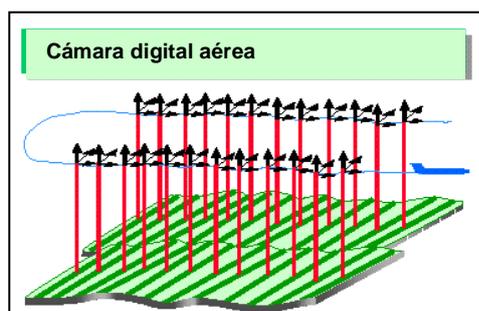


Figura 5.1.2.- Cámara fotogramétrica aérea digital.
Fuente: Adaptado de Santos (2006).

5.1.2.3 Características de las cámaras digitales aéreas

Para hacer visible la imagen latente en las cámaras digitales, esto se produce al incidir la luz reflejada por el objeto en sensores fotoeléctricos, obteniendo de esta forma la imagen registrada.

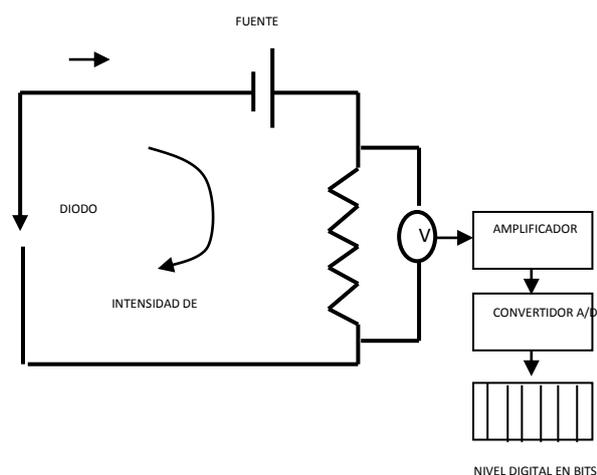


Figura 5.1.3.- Esquema cámara digital.
Fuente: Adaptado de Miguelsanz (2004).

El diodo es un dispositivo que deja pasar corriente eléctrica en una dirección y no en la contraria, de forma que si se ilumina dejará pasar corriente en ese sentido. Son

rectificadores de corriente, pasan de corriente alterna a continua. Se llamará fotodiodo si es sensible al paso de una señal luminosa.

El sensor o fotodiodo de una cámara digital es del tipo CCD - *Charged Coupled Device* de doble carga y será el responsable de formar la imagen. Los fotodetectores del tipo CCD (lo llevan las cámaras de vídeo y de fotografías caseras) se sitúan formado “arrays” (matrices) en un número que indicará el tamaño final de la imagen. Estos dispositivos se pueden colocar en forma lineal (y por tanto barren la zona sensible para formar la imagen) o en forma superficial (matricial o en dos dimensiones, fijos). Estas diferencias técnicas dan lugar a los dos tipos de cámaras (sensores) aéreas digitales que hoy existen en el mercado, lineales y matriciales.

En un principio se apostó por temas económicos por el sistema matricial y posteriormente lineal, pero en la actualidad conviven ambos. El sistema lineal es de más fácil construcción y por eso se tiende a resolver el problema del otro mecanismo con sensores matriciales pequeños, de forma que para obtener una imagen del mismo tamaño que la línea se unen 2 ó 4 sensores matriciales que toman las imágenes simultáneamente y las unen para formar una mayor, incorporando un sistema que compense el desplazamiento del avión durante la toma. (Santos, 2009).

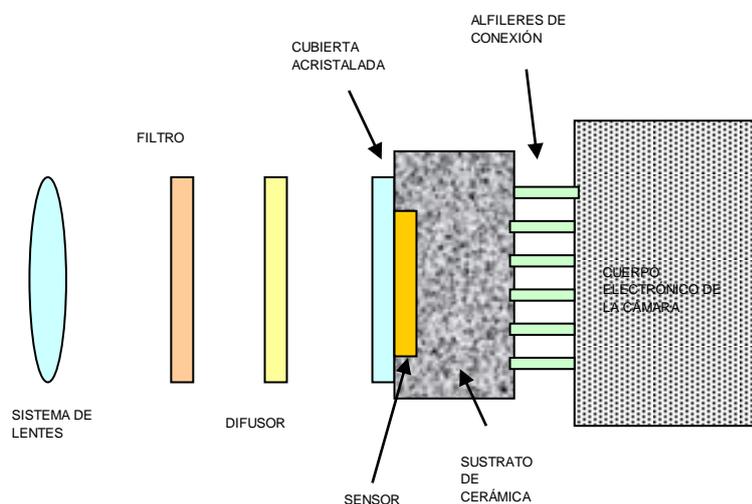


Figura 5.1.4.- Componentes de la cámara digital.
Fuente: Adaptado de Santos (2009).

Según se observa en la figura superior, la cámara digital se compone de:

- Sistema de lentes cuya calidad influye en el resultado final de la imagen.

- Filtros, se suelen situar entre la óptica y el sensor o delante de la lente y tienen diferentes utilidades:
 - Filtro de paso largo.- Transmiten por encima del umbral de corte.
 - Filtro de paso corto.- Son contrarios a los de paso largo, transmite por debajo del umbral de corte.
 - Filtro de interferencia.- Transmiten de forma homogénea en un rango limitado de longitudes de onda.
 - Filtros de color y dicróicos.- Aumentan el contraste o aíslan regiones espectrales y colores.
 - Filtros de densidad neutra.- Previenen el exceso de carga en los sensores ya que reducen la transmisión de energía. (Santos, 2006).

5.1.2.4 Tipos de cámaras digitales aéreas

En principio de su funcionamiento existen dos tipos de cámaras aéreas digitales, las lineales y matriciales (Haralik, 1999), que describimos a continuación.

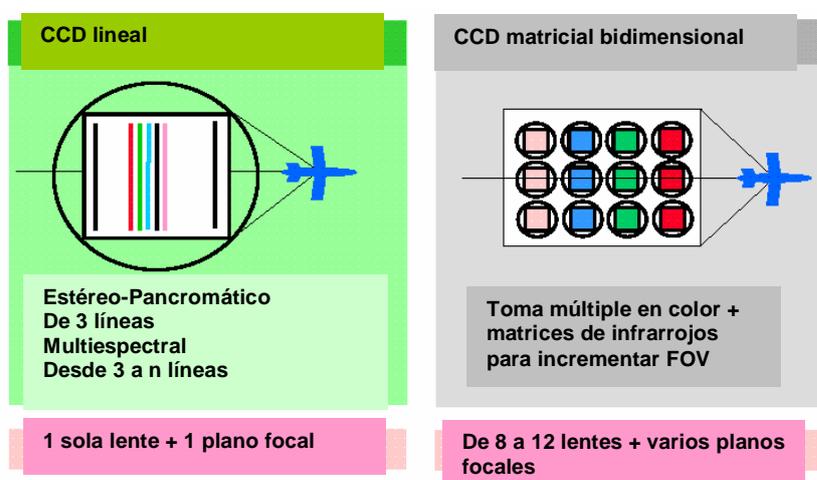


Figura 5.1.5.- CCD lineal-matricial.
Fuente: Adaptado de Santos (2006).

5.1.2.4.1 Cámaras digitales de línea

Las cámaras de línea barren el terreno de forma simultánea al avance del avión con 3 líneas pancromáticas. Tiene una única lente y un plano focal. El producto que se puede considerar representante de este tipo de cámaras es el sensor aerotransportado ADS-40 de Leica.

Entre sus características se encuentran con 8 sensores líneas CCD, todos situados en el plano focal.

- CCD pancromático
- CCD (R+G+B)
- 1CCD en el infrarrojo medio.
- 1CCD en el infrarrojo térmico.

Cada uno de los CCD (figura 5.1.7) tiene 12.000 píxeles (X2), el tamaño de cada pixel es de 6.5 micras. Tiene una focal de 62.5 mm y un ángulo de campo de visión (FOV- *Fiel of View*) de 52°. La estructura electrónica del sensor está formada por dos arrays escalonados desfasados medio pixel. Estos sensores (figura 5.1.6 A) están sustentados en el plano focal con la disposición que se ve en la figura 5.1.6 B.



Figura 5.1.6.- Estructura electrónica del sensor (A). Disposición de sensores (B).
Fuente: Adaptado de Santos (2006).

Disposición geométrica de las dos filas de fotodetectores en cada uno de los sensores pancromáticos (figura 5.1.7).

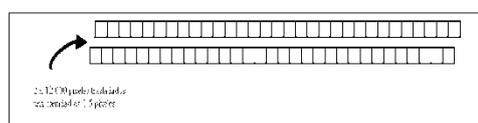


Figura 5.1.7.- CCD de cámaras digitales de línea.
Fuente: Adaptado de Santos (2006).

La toma de la imagen se realiza por barrido simultáneo en tres posiciones de la línea de toma, una hacia atrás otra hacia abajo (nadiral) y la tercera hacia delante, por tanto para una única posición del sensor existen 3 imágenes. Esas imágenes se combinan en postproceso para dar una imagen continua figura 5.1.8.

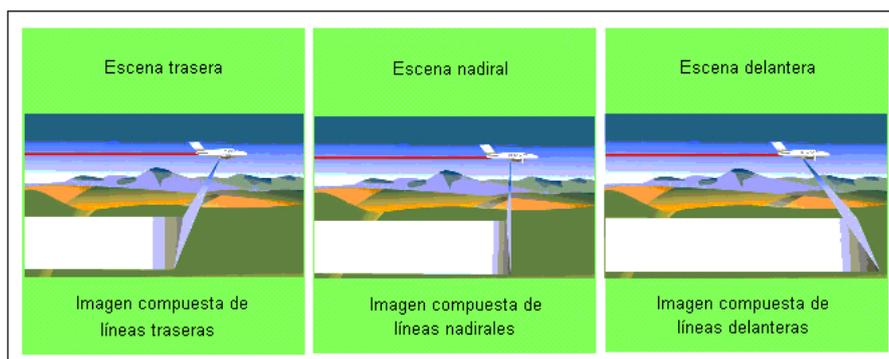


Figura 5.1.8.- Toma de imagen por barrido simultáneo.
Fuente: Adaptado de Santos (2006).

5.1.2.4.2 Cámaras digitales matriciales

Las cámaras matriciales toman imágenes al modo de las cámaras convencionales, tienen varios objetivos que disparan simultáneamente, unos en pancromático y otros en infrarrojo. Cuentan con varios planos focales y funden las imágenes en una única. Estas cámaras pueden constar en la actualidad de $nK \times nK$ elementos sensoriales (píxeles) siendo K 1024 elementos y n puede oscilar de 1 a 9. Los más utilizados son los $n = 3$ ó 4 (por lo tanto 3.000×3.000 píxeles que son 9×10^6 píxeles, es decir 9 Megapíxeles). Están disponibles en pancromático, color o falso color. Son cámaras muy estables, de geometría conocida y utilizan el sistema FMC para compensación del avance del avión. Trabajan con una definida perspectiva central. El principal inconveniente es la transferencia de los datos a suficiente velocidad y con suficiente precisión desde el sensor de estado sólido hasta el medio de almacenamiento. Se suelen utilizar de forma modular para solucionar los problemas de las matriciales sencillas (éstas se combinan de 2 en 2 ó de 4 en 4). Así se incrementa la dimensión sensorial de la toma, el ángulo de campo y la resolución espacial.

Suele llevar también una cámara de vídeo centrada en la montura. La imagen pancromática compuesta a partir de las 4 lentes convergentes se consigue pasando un proceso de muestreo y rectificación. Dos son sus representantes en el panorama comercial, la Vexcel Ultracam D de Inpho y Digital Mapping Camera (DMC) de Zeiss/Intergraph (Z/I).

5.1.2.5 Procesado geométrico de la imagen

El objetivo de la cámara DMC Z/I está compuesto por 8 conos. De ellos, 4 son pancromáticos y cubren cuatro diferentes zonas de la matriz rectangular de la imagen.

Esas zonas tienen solape entre ellas y en postproceso se unifican para obtener la imagen definitiva. Con estos cuatro conos se consigue una alta resolución geométrica (12 micras) que es la que realmente da el detalle de la imagen final. En el cuerpo de la cámara va montada también una cámara de vídeo para ayuda a la navegación y enriquecimiento de la información.

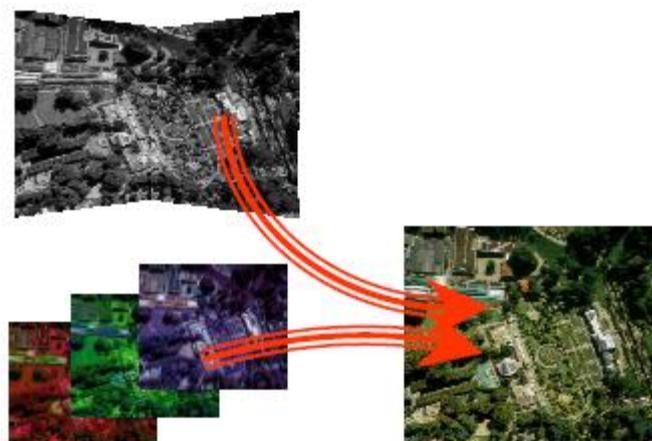


Figura 5.1.9.- Generación de una imagen en color de alta resolución mediante el ensamblaje de una imagen pancromática (arriba a la izquierda) y la fusión de las bandas color de baja resolución con la pancromática de alta resolución.

Fuente: Adaptado de Colomer (2005).

Otro conjunto de conos son los que aportan el color. Uno por cada color primario (RGB). Cada uno de ellos obtiene una imagen de la superficie total de la matriz. Es por ellos que “colorean” la imagen pancromática pero no aportan una gran resolución geométrica (40 micras). Por último el cono de infrarrojo funciona igual que los de color pero en esa zona del espectro.

En la figura 5.1.9 se presenta el esquema gráfico del funcionamiento del procesado de imágenes, en él se muestra la formación del mosaico, las cuatro tomas pancromáticas unidas mediante un ajuste robusto utilizando puntos de enlace de chequeo y aplicando los parámetros de calibración necesarios pasa de una proyección particular a una perspectiva central adecuada. En resumen se funden las imágenes pancromáticas, color e infrarrojo. (Santos, 2006).

5.1.3 Sistema LIDAR

5.1.3.1 Introducción

La tecnología LIDAR aerotransportada (LIDAR - *Light Detection and Ranging*) es un sistema que permite obtener una nube de puntos del terreno tomándolos mediante un escáner láser aerotransportado (ALS – *airborne laser scanner*). Para realizar este escaneado se combinan dos movimientos. Uno longitudinal dado por la trayectoria del avión y otro transversal mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz láser emitido por el escáner.

Para conocer las coordenadas de la nube de puntos se necesita la posición del sensor y el ángulo del espejo en cada momento. Para ello el sistema se apoya en un sistema GPS diferencial y un sensor inercial de navegación (INS - *Inertial Navigation System*). Conocidos estos datos y la distancia sensor-terreno obtenido con el distanciómetro se obtienen las coordenadas buscadas. El resultado es de decenas de miles de puntos por segundo.

5.1.3.2 Componentes del sistema LIDAR aerotransportado

El sistema LIDAR se compone de cuatro subsistemas (Gómez et al., 2005):

- 1.- Escáner laser (ALS - *Airborne Laser Scanner*)
 - 2.- Sensor inercial (INS - *Inertial Navigation System*).
- Los principales componentes del INS, son la unidad de medición inercial (IMU - *Inertial Measurement Unit*), un receptor GPS y una unidad de procesamiento.
- 3.- Interfaz de navegación para piloto y operador
 - 4.- Cámaras fotográficas, vídeos de pequeño formato

Durante el vuelo, se toman medidas en los tres subsistemas GPS, IMU y ALS de forma independiente pero con una etiqueta de tiempos acorde con el tiempo GPS. Estas etiquetas serán las que permitan sincronizar todas las medidas en postproceso. Además de las medidas realizadas con el láser, es necesario conocer las coordenadas de la antena GPS y la posición del ALS respecto a esta antena para poder dotar de coordenadas WGS84 a los puntos del terreno.

Las coordenadas de la antena en cada instante se conocerán después de hacer el postproceso y la distancia entre ambos sistemas se habrá medido previamente con una estación total o con un distanciómetro de precisión. Finalmente, la orientación entre la antena GPS y el centro del ALS vendrá dada por los sistemas inerciales.

Después del vuelo, los datos GPS y los datos IMU se integran mediante un filtro Kalman para determinar la trayectoria del vuelo y los giros en cada instante. Estos elementos más el ángulo de salida que ha formado el pulso láser con respecto a la vertical, se combinan para determinar la línea imaginaria que ha descrito el pulso láser en el espacio.

Finalmente la longitud del camino descrito por el rayo, los giros definidos por los sistemas inerciales, y la posición del escáner láser obtenido a partir de las medidas GPS, se utilizarán para determinar las coordenadas WGS84 de los puntos medidos.

Una vez se ha llegado a este punto, se tienen que realizar dos conversiones más, del sistema WGS84 al datum nacional, y el paso de alturas elipsólicas a cotas ortométricas.

Cada uno de los componentes del sistema LIDAR se tratará en profundidad más adelante.

5.1.3.3 Captura de puntos del terreno

En el levantamiento LIDAR, el vuelo describe pasadas rectas y paralelas. El sensor LIDAR, mediante el escáner, va realizando medidas en oscilación perpendicular a la trayectoria, de forma que va midiendo distancias al suelo, de forma puntual, muy rápida. (Friess, 2004).

El esquema siguiente (figura 5.1.10) de trazado de línea quebrada proviene de la composición del movimiento rectilíneo de la trayectoria del avión con el movimiento oscilatorio del sensor.

Cada uno de los círculos representa una “huella” (footprint) del láser, es decir el tamaño del cono que tiene como vértice el sensor.

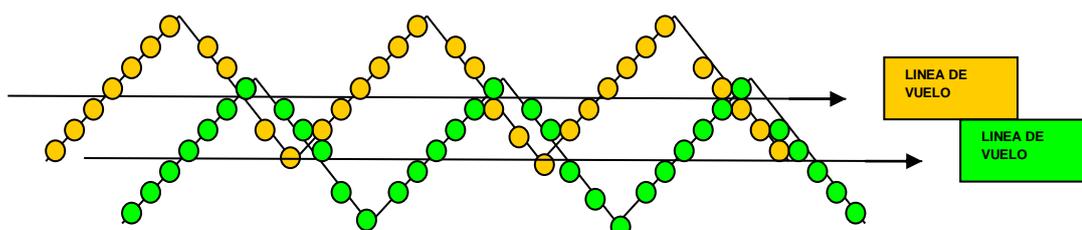


Figura 5.1.10.- Disposición de una muestra de puntos sobre el terreno.
Fuente: Adaptado de Santos (2009).

A partir del conglomerado de puntos aleatorios, formado por los pulsos láser, el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se genera mediante un ráster por interpolación informática de los puntos, que forma una matriz regular. En realidad la figura de captación de datos forma una senoide amplia.

5.1.3.3.1 Tipo de aeronave a utilizar

La toma de datos puede hacerse desde un avión o desde un helicóptero, dependiendo del tipo de trabajo. En el primer caso se prima la productividad, se vuela más alto y se abarca una zona mayor, mientras que si se vuela la zona con un helicóptero, se puede volar más lento, a menos altura, y se obtiene mayor densidad de puntos.

En el mando de la aeronave se debe encontrar un piloto experimentado en trabajos con el sistema y en tierra un mecánico encargado del mantenimiento del aparato y de las labores logísticas para el abastecimiento de combustible.

5.1.3.3.2 Altura de vuelo y velocidad

La altura máxima a la que puede volar un avión/helicóptero con un sistema LIDAR debería estar condicionada por la frecuencia de emisión del sistema láser, aunque en la práctica este intervalo de tiempo es suficientemente pequeño como para no ser el elemento determinante. El parámetro que establece el límite en la distancia será la pérdida de energía de la señal, que a partir de una cierta altura de vuelo no retornará al escáner láser.

La potencia y la sensibilidad del sistema son condicionantes de la altura de vuelo. En un sistema moderno la máxima altura está en 4.000 m sobre el suelo. Por otra parte si la altura mínima es baja permite grandes densidades de puntos en áreas pequeñas,

pero está limitada por la aeronavegabilidad, es decir la mínima altura a la que puede volar el avión que normalmente es de 200 m sobre el suelo.

Sobre la velocidad de vuelo del avión, se puede indicar que al aumentar la velocidad aumenta el espaciado y por tanto disminuye la densidad de datos y asimismo se debe considerar que:

- El aumento de velocidad se puede compensar mediante sistemas con mayores frecuencias de pulsación y escaneo.

Si no es posible aumentar la frecuencia se debe reducir la velocidad. Por debajo de determinadas velocidades es preferible recurrir a helicópteros. (Santos, 2009).

5.1.3.3 Información recibida del láser

El barrido LIDAR está basado en la emisión de haces de rayos de láser desde el sensor que se reflejan en el suelo, y retornan a donde se capturan (“eco”).

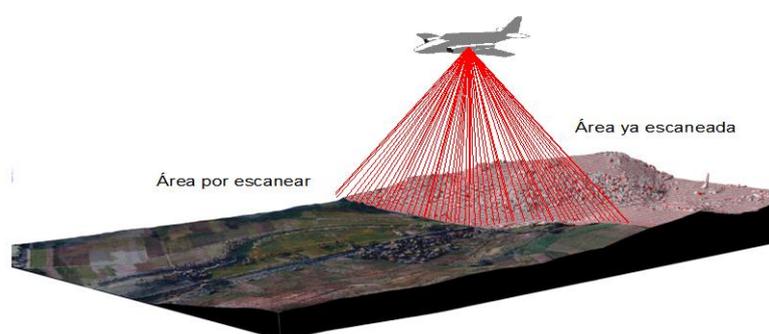


Figura 5.1.11.- Barrido de LIDAR.
Fuente: Adaptado de Stereocarto (2007).

De cada disparo del láser se recibe la siguiente información:

- Distancia al objetivo
- Potencia de la señal
- Múltiples rebotes de la señal. Pero la información que se necesita recoger de cada punto láser son sus coordenadas 3D, el valor de la intensidad y diferentes rebotes de la señal láser.

De acuerdo con la intensidad del punto podemos obtener la altura del terreno mediante cálculo, diferenciando así el MDE y MDT. Los datos de la altura de los elementos que están sobre la superficie del terreno se obtienen como diferencias entre el primer y último impulso de la señal láser. Los valores de la intensidad de la medida láser son muy útiles para realizar la clasificación de los puntos.

5.1.3.3.4 Múltiples ecos

Hay que destacar que un sistema LIDAR puede discriminar entre múltiples respuestas recibidas de un mismo pulso permitiendo determinar las superficies intermedias, como líneas de tensión o coberturas vegetales. En la actualidad, existen escáneres de varios tipos: los que reconocen hasta 7 ecos, solo el primer pulso, solo el último o el primero y el último, etc. Dependerá el tipo de trabajo que se realizará para utilizar un escáner u otro.

En algunos casos la magnitud del pulso también se graba (*intensidad*). A partir de este grupo de retornos de LIDAR se usan métodos automáticos y manuales para identificar cada retorno (eco) como un retorno “de suelo”, o de “vegetación”, o “de edificio”, etc.

A partir de la gran cantidad de pulsos recibidos (se emiten alrededor de 10.000 y 80.000 pulsos por segundo y se recibe el 95 % de los pulsos emitidos más sus ecos), se genera un modelo digital de elevaciones de altísima densidad. Como mínimo un DTM LIDAR es tres veces más denso que un DTM fotogramétrico. Se obtiene una nube de puntos superabundante que permite modelar el terreno con el máximo detalle. Esta nube de puntos tiene un ratio de “puntos medidos / espacio” mayor que con cualquier otra técnica existente.

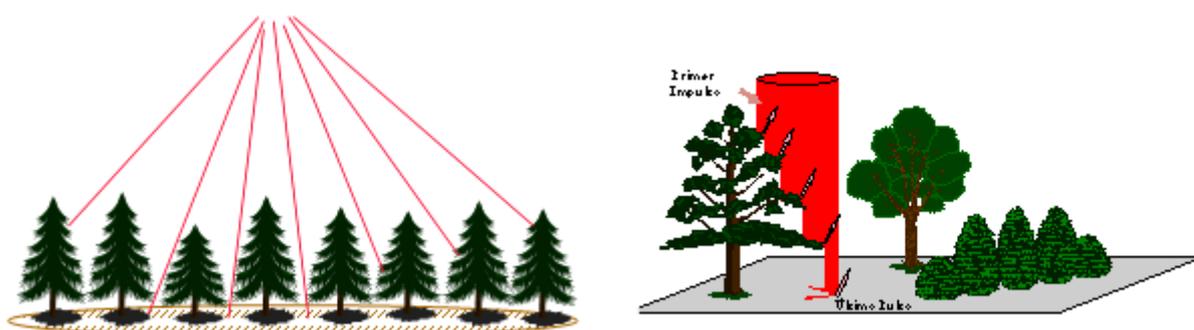


Figura 5.1.12.- Representación ángulos y frecuencias altas del barrido LIDAR.
Fuente: Adaptado de Stereocarto (2007).

5.1.3.4 Precisión del LIDAR

5.1.3.4.1 Principales fuentes del error posicional (X,Y,Z)

Las precisiones que se obtienen con LIDAR varían según la altitud y el ángulo de barrido, variando entre 15 a 30 cm la precisión altimétrica. Generalmente el error horizontal (X, Y) es mayor que el error vertical (Z). Hacer una valoración de la precisión horizontal de los datos LIDAR resulta un poco complicado. Los láser utilizados en los sensores comerciales de LIDAR son parecidos pero tienen una diferencia del diámetro de la base del cono que forma cada rayo láser de entre 0.20 a 0.33 m. Esa diferencia define la huella (footprint) del LIDAR en lo que respecta al ángulo de escáner y altura de vuelo (entre 0.24 a 0.60 m). Las huellas pequeñas son más adecuadas para pasar entre huecos de la cubierta vegetal. (Santos, 2005).

Las causas del error posicional (x,y,z) en el proceso de toma de datos de LIDAR están asociadas con:

- El equipo GPS a bordo del avión, para definir las coordenadas del punto de cada toma.
- La IMU para estimar la posición entre los puntos fijos de GPS (puede ser un desplazamiento largo).
- La IMU para monitorizar la dirección en la que apunta el láser.

5.2 SISTEMA DE NAVEGACION INERCIAL

5.2.1 Introducción

Un sistema de navegación inercial (INS - *Inertial Navigation System*) es un sistema de ayuda a la navegación que se compone de una unidad de medida inercial (IMU - *Inertial Measure Unit*), un sistema de posicionamiento global (GPS - *Global Positioning System*), un software y una unidad de proceso (PCS).

El objeto de la navegación inercial es determinar la posición, velocidad y actitud de la aeronave con la mayor precisión posible a partir de las medidas de la IMU.

La IMU se compone de sensores inerciales: acelerómetros y giróscopos, los primeros miden aceleración lineal y los segundos velocidad de giro en el vehículo en que van montados.

La navegación inercial o autónoma no depende de medidas externas y por tanto no es susceptible a interferencias (accidentales o provocadas) ni a manipulación o error externo.

En esencia, el funcionamiento se basa en la utilización de unos medidores llamados acelerómetros que, cuando se acoplan a un vehículo, miden la aceleración de éste en una dirección. De acuerdo con las leyes matemáticas, la aceleración se transforma en velocidad, y ésta en posición.

Para obtener la posición de un sólido rígido (3D) en el espacio, se necesitan conocer al menos 6 grados de libertad, estos normalmente son 3 traslaciones y tres giros.

5.2.2 Apoyo aéreo cinemático

Se refiere a la determinación de las coordenadas precisas del centro de proyección de cada una de las imágenes obtenidas por la cámara aérea en el momento de exposición.

Para ello, se recurre a la utilización del sistema GPS y así conseguir la determinación precisa de la posición del avión en el momento de exposición de la cámara. El principal propósito es la reducción del número de puntos de control necesarios para realizar el proceso de triangulación aérea.

Así pues, las posiciones GPS, de la cámara actuarán como observaciones muy necesarias que se complementarán con datos de efemérides de los satélites para obtener los parámetros de orientación externa de una manera práctica, precisa y rápida. (Miguelsanz, 2004).

5.2.3 Componentes del sistema de navegación inercial (INS)

Un INS se compone de:

- Unidad de medida inercial (IMU - Inertial Measure Unit)
- Receptores GPS
- Sistema de control (PCS) y software de postprocesamiento

5.2.3.1 Sistema inercial IMU

Una IMU se compone de un trío de acelerómetros y giróscopos, circuitos electrónicos y una CPU que realiza el conjunto de operaciones de la señal y compensación por temperatura.

Los datos de los acelerómetros y de los giróscopos son aumentos de velocidad y relaciones angulares entorno a tres ejes perpendiculares definidos por esos giróscopos y cuyos datos son transferidos por un puerto serie a la PCS en relaciones comprendidas entre 200 Hz y 1000 Hz. Entonces PCS integra las aceleraciones lineales y las relaciones angulares en el navegador inercial analítico para obtener posición, velocidad y orientación de la IMU referida a la tierra. La precisión es el factor prioritario por lo cual la IMU ha de ser pequeña y liviana e ir montada cerca de la entrada de datos del sensor para evitar los desplazamientos y flexiones entre el sensor y la IMU.

Estas unidades están compuestas internamente por tres ejes. Sobre cada uno (sistema ortogonal 3D) se montan los sensores, un acelerómetro y un giróscopo. Es importante destacar la existencia de un reloj que asigna tiempo a los valores medidos por los sensores inerciales. (Jordan, 2006).

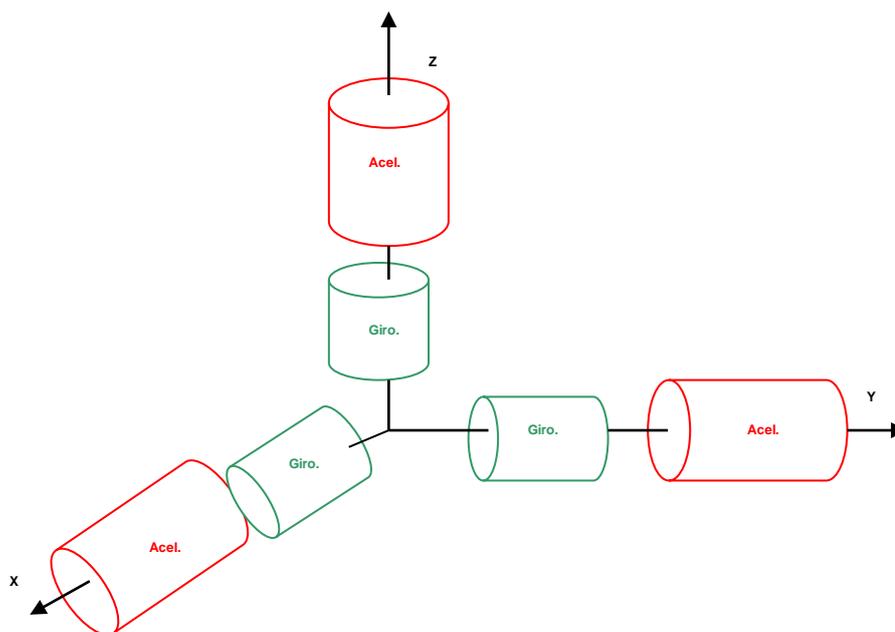


Figura 5.2.1.- Distribución de giróscopos y acelerómetros en IMU.
Fuente: Adaptado de Santos (2009).

Los datos que ofrece la IMU son la velocidad angular y aceleración lineal de cada uno de sus ejes con el valor de tiempo frecuente y correspondiente para estos seis valores.

Los acelerómetros permiten medir las aceleraciones de cada eje que han sido provocadas por fuerzas externas y fuerzas de la gravedad que se producen por el movimiento del vehículo.

Lo que se pretende es descartar los efectos de la gravedad, para lo cual es imprescindible conocer los desplazamientos con respecto a la vertical del acelerómetro.

Este sistema resulta de gran aporte a la navegación de precisión en tiempo real para el navegador inercial analítico, donde el PCS (sistema de control de navegación), es el elemento principal. Obtenidos los datos por los sensores (GPS/IMU), seguido del tratamiento en el PCS sirven de entrada para la gestión del vuelo y para sincronizar el tiempo entre la unidad IMU, el GPS y el sensor que captura los datos (cámara o LIDAR).

Todo lo mencionado arriba se obtiene por medio de la grabación de un impulso en el momento exacto de la captura de datos (sea exposición fotográfica o salida y retorno de la señal láser).

Respecto a los errores asociados al sistema, se deben considerar como los más importantes los originados por las vibraciones del vehículo, los demás se clasifican en:

- Errores de alineación de los sensores en cada eje.
- Falta de linealidad en las medidas de los sensores.
- Falta de sincronización de los sensores.
- Errores en los factores de escala.
- “Biases”: inclinaciones, sesgos o tendencias estadísticas de las medidas.

5.2.3.2 Receptor GPS

El receptor GPS cuya antena va montada sobre el fuselaje del avión, puede ser monofrecuencia o bifrecuencia, es decir trabajará con la portadora L1 (centrada en la frecuencia 1.575,42 Mhz) o con las portadoras L1 y L2 (centrada en la frecuencia 1.227,60 Mhz), respectivamente.

5.2.3.3 Sistema de control (PCS) y software de postprocesamiento

El PCS integra las aceleraciones lineales y las relaciones angulares en el denominado navegador inercial analítico para obtener posición, velocidad y orientación de la IMU referido a la tierra.

Así pues, el PCS contiene el receptor GPS, un sistema de almacenaje masivo que escribe datos a unas tarjetas de memoria para ordenadores personales (PCMCIA - *Personal Computer Memory Card International Association*) y un microprocesador que funciona en tiempo real integrando el software de navegación. La solución de navegación en tiempo real se usa como dato de entrada en el sistema de manejo del vuelo y gestiona la sincronización del tiempo entre la cámara, la IMU y el GPS mediante la grabación de un impulso de corriente en el momento de exposición. Este sistema de procesamiento deberá permitir una integración óptima de las observaciones GPS con las mediciones de la IMU.

El software de postprocesamiento se usa para calcular una solución de navegación inercial integrada procesando los datos de la IMU y del GPS durante el vuelo, con observaciones GPS grabados en el receptor de referencia terrestre. Calcula una solución GPS por diferencia de fase y entonces la mezcla con los datos inerciales

usando procesamiento directo e inverso obteniéndose así una trayectoria directa y otra inversa.

5.2.4 Integración de GPS/IMU

En síntesis, los sistemas integrados GPS/IMU permiten reducir la mayor parte de los problemas que surgen al utilizar ambos sistemas por separado, ya que son complementarios, cuando uno pierde su posibilidad de funcionamiento correcto, toma el relevo el otro.

5.2.4.1 Sincronización de tiempos en los sistemas integrados GPS/IMU y sensor

Cada uno de los tres subsistemas GPS, IMU, sensor (Cámara, LIDAR) tiene su propio registro de tiempos así como su propia frecuencia, lo cual obligará a interpolar para el caso de las frecuencias muy altas.

La finalidad de la sincronización es que los tres subsistemas compartan la misma escala de tiempos, pudiendo ser los tiempos del sistema GPS.

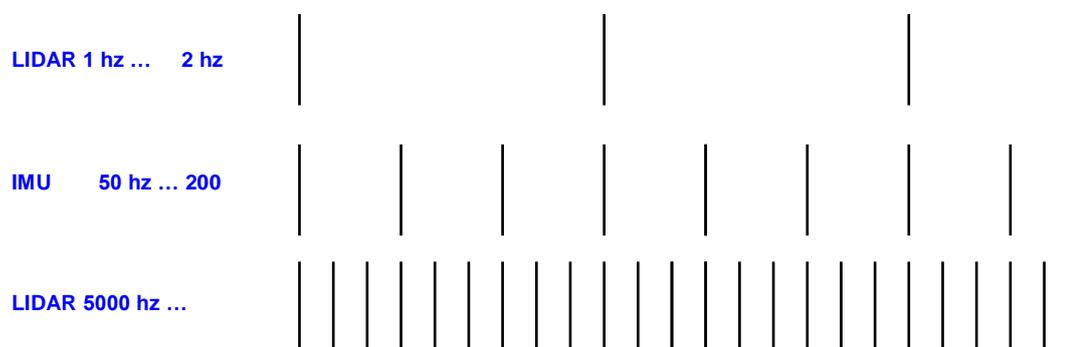


Figura 5.2.2.- Frecuencias de registros de tiempos en los tres sistemas.
Fuente: Adaptado de Santos (2009).

De la figura 5.2.2 se deduce que la información temporal obtenida con el sistema GPS, es de mayor precisión que la obtenida con la IMU, por lo cual la trayectoria definida por los sistemas inerciales debe ser corregida “diferencialmente” con la trayectoria ofrecida con GPS (figura 5.2.3), que cuenta con un sistema de tiempos con mayor precisión.

Un avión no debe confiar su navegación a acelerómetros y giróscopos, ya que los errores de ambos se van juntando, por lo cual es recomendable pasar un control de calidad al GPS.

El GPS no proporciona información de cómo varía la orientación, pero cada cierto tiempo fija la posición para corregir las variaciones de la ruta que ofrece la IMU.

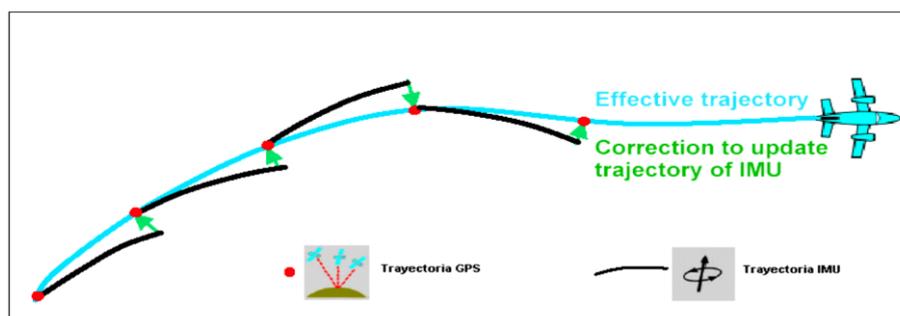


Figura 5.2.3.- Rectificaciones a la trayectoria IMU por el sistema GPS.
Fuente: Adaptado de Stereocarto (2007).

El GPS proporciona gran precisión absoluta al sistema y la IMU facilita buen posicionamiento relativo. Asimismo se utiliza para calcular y corregir errores en la navegación inercial.

5.2.4.2 Arquitectura de integración entre IMU y GPS

Existen tres metodologías diferentes para acoplar e integrar el sistema IMU y GPS (Brown & Hwang, 1997), estos son:

- Método no acoplado
- Método ligeramente acoplado
- Método acoplado

En las dos primeras el GPS da: posición, velocidad y tiempo y la IMU: posición, velocidad y orientación. En el tercer caso los dos sistemas funcionan como sensores que obtienen medidas de las variaciones de velocidad y orientación.

a.- Método no acoplado

En este método tanto la IMU como el GPS generan soluciones a la navegación de manera independiente. La unión la efectúa una unidad externa. Este tipo de unión tiene las siguientes ventajas:

- Es una estructura fácil, económica y rápida de realizar.

- Permite tener una cierta tolerancia a los fallos de los componentes del subsistema.
- Admite ofrecer una solución de navegación tan precisa como si fuera la IMU funcionando sola, esto porque usa un algoritmo de selección.

El inconveniente que presenta es que si no hay acoplamiento entre la IMU y GPS no se comunican, por lo que no se resuelven problemas de derivas del INS.

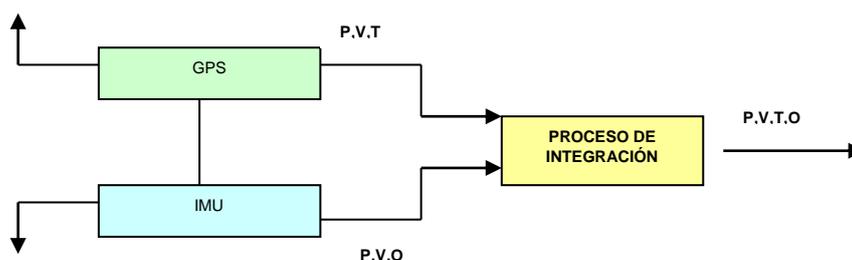


Figura 5.2.4.- Método no acoplado.
Fuente: Adaptado de Miguelsanz (2004).

b.- Método ligeramente acoplado

De todas las soluciones que ofrece ésta metodología, la que se toma es la que proporciona el GPS, la IMU sirve de ayuda para controlar los fallos del sistema. Se utiliza un filtro Kalman para poner en línea y actualizar los valores de velocidad y tiempo con los datos que proporciona la IMU, de esta forma se logra mantener el error de navegación dentro de unos límites admisibles por el sistema.

Entre las ventajas que ofrece este método se tiene:

- Su implementación es simple y genérico.
- Permite recuperar con facilidad las ambigüedades perdidas después de un fallo corto de tiempo.
- Aprovecha la información de la IMU si existen menos de 4 satélites por encima del horizonte.

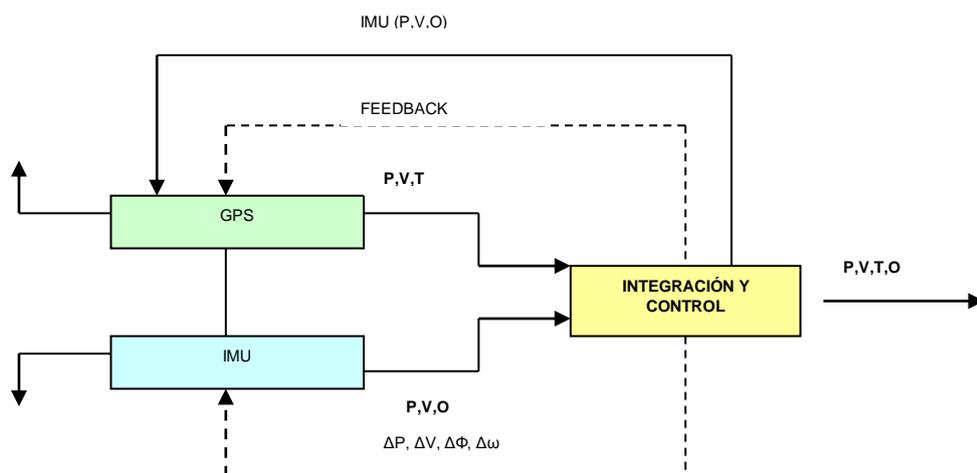


Figura 5.2.5.- Método ligeramente acoplado.
Fuente: Adaptado de Miguelsanz (2004).

c.- Método acoplado

Este método se diferencia con respecto al anterior en que el GPS y los componentes inerciales sólo funcionan como sensores. Tanto la IMU como el GPS se utilizan como indicadores de la aceleración inercial y variación angular y fuentes de código. Los datos GPS e IMU se combinan en el procesador y se emplea la información de velocidad para rastrear los satélites.

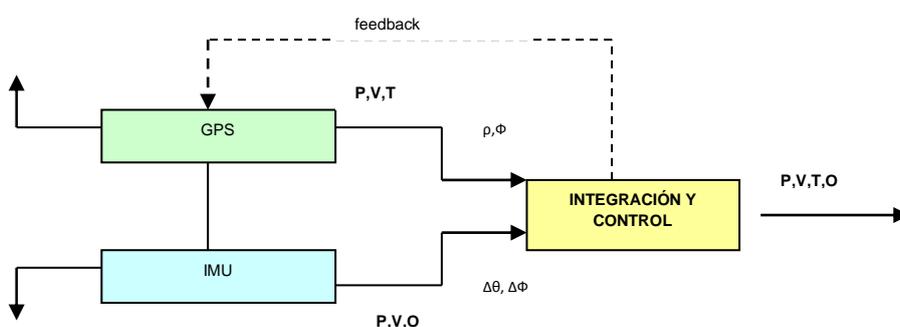


Figura 5.2.6.- Método acoplado.
Fuente: Adaptado de Miguelsanz (2004).

5.2.4.3 Sistema de referencia y parámetros de orientación en la navegación

La matriz de orientaciones que describe la orientación de un sólido rígido en el espacio se puede parametrizar de varias formas. En fotogrametría se utilizan tres giros alrededor de cada eje y se designan como omega (ω), phi (Φ), kappa (κ) y en navegación se emplean pitch (p), roll (\textcircled{R}) y heading (h) o yaw (y).

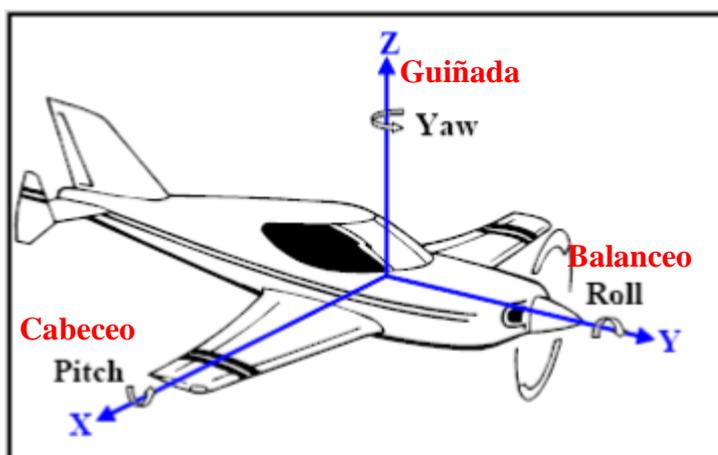


Figura 5.2.7.- Marco de referencia en el vehículo aéreo.
Fuente: Adaptado de AeroLaser System S.L. (2009).

En navegación el sistema de referencia es un sistema local que varía con el movimiento del avión. En éste las direcciones de los ejes X,Y,Z apuntan respectivamente al norte, este y dirección de la plomada.

De manera que se puede deducir que el (h) heading es el ángulo entre el eje longitudinal de vehículo en proyección con el plano horizontal y la dirección norte. El ángulo (y) o guiñada lo es entre el eje longitudinal del vehículo y el eje del sistema de navegación.

Los tres acelerómetros y tres giróscopos que conforman la IMU determinan para una terna de ejes ortogonales la fuerza específica y la velocidad angular, con respecto a un marco de referencia inercial.

5.2.4.4 Calibración del sistema GPS/ IMU

La calibración de todos los sensores usados en el sistema integrado debe hacerse antes de la misión de medida, ya que es necesario conocer el estado del sistema previo al vuelo fotogramétrico.

Esta fase engloba dos partes bien diferenciadas:

- Calibración entre sensores.
- Calibración individual de los sensores.

5.2.4.4.1 Calibración entre sensores

Se refiere a la determinación de la localización relativa y la orientación entre la cámara y los sensores de navegación, así como la diferencia de sincronización temporal debido al retardo en la transmisión de datos.

La calibración del sistema es importante cuando la relación entre los diferentes sensores y sus sistemas de coordenadas está bien definida.

- **Excentricidad entre la cámara, IMU y antena GPS**

Para relacionar la posición y la orientación suministrada por el sistema GPS/IMU con el centro de perspectiva de la cámara se tienen que aplicar las distancias espaciales entre los diferentes componentes de los sensores.

Estas distancias espaciales o excentricidades se pueden medir por métodos geodésicos convencionales o usando técnicas más precisas basadas en metrología, dimensional o microgeodesia.

Tales distancias son las siguientes:

- Vector de coordenadas de la cámara respecto a la IMU.
- Vector de coordenadas de la antena GPS respecto del centro de proyección de la cámara.

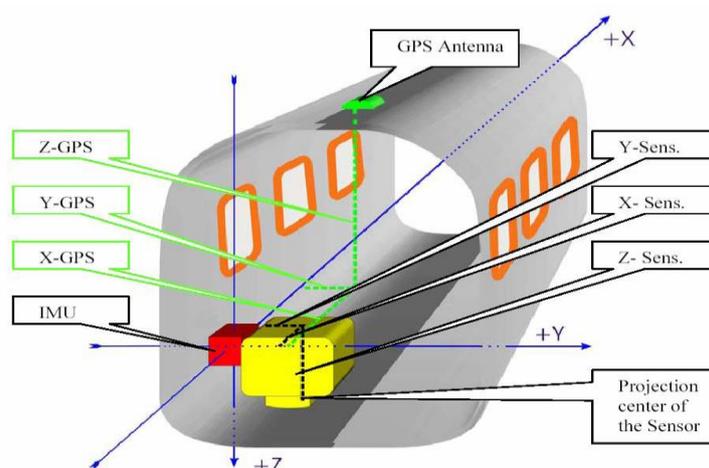


Figura 5.2.8.- Distancias entre cámara-GPS-IMU.
Fuente: Adaptado de GTBibérica S.L.

Para eliminar el vector de traslación entre la IMU y la cámara, y con ello una fuente de error, se recurre a un montaje conjunto de la IMU sobre la parte superior de la cámara.

La ventaja que presenta este montaje es que la IMU refleja todos los movimientos que el avión transmite a la cámara a través de la plataforma giroestabilizada (gimbale) absorbiendo todas las vibraciones que le llegan.

5.2.4.4.2 Calibración individual de los sensores

Se puede incluir la calibración de los parámetros de orientación interna de la cámara, calibración de variaciones constantes de la IMU, factores de escala, sesgos y variaciones de giróscopos y acelerómetros etc.

Algunos errores sobre los giróscopos producen un efecto como es la oscilación de Schuler¹. En otros casos se genera un crecimiento ilimitado de los errores sobre dichos giróscopos y tienen que ser corregidos con GPS.

Por tanto, tan importante como el valor del error actual es la estabilidad una vez calibrado. Debido a la calidad de los sensores inerciales usados, la precisión es muy alta para cortos espacios de tiempo, entre 3 y 5 segundos, pero se degrada cuando el periodo de tiempo de observación es próximo a 1 hora. De esta manera, se introducen errores aleatorios debido a la presencia de imprecisiones en el alineamiento inicial.

¹ Error en los giróscopos o acelerómetros que se repite con una determinada frecuencia.

5.3 ORIENTACIÓN DE IMÁGENES AÉREAS DIGITALES

5.3.1 Introducción

La orientación de imágenes aéreas es el proceso mediante el cual se determina en cada centro de proyección sus parámetros externos, posición X, Y, Z, ángulos omega, phi, kappa (ω , Φ , k).

Hoy en día se cuenta con equipos GNSS/INS que pueden ir a bordo del avión durante el vuelo fotogramétrico como el receptor bifrecuencia GPS y el sistema inercial IMU, que permiten obtener directamente las orientaciones externas.

Existen varios métodos para determinar los parámetros externos en cada centro de proyección:

- Aerotriangulación digital con puntos de fotocontrol distribuidos en todo el bloque.
- Georeferenciación directa, trabaja directamente con los datos GPSD/INS del vuelo.
- Orientación integrada con sensores (ISO) combinación de los dos anteriores.

5.3.2 Aerotriangulación digital aérea

Concepto.- Conjunto de técnicas fotogramétricas, que permiten obtener a partir de un mínimo número de puntos de control terrestre y mediante mediciones realizadas sobre las imágenes aéreas digitales (obtenidas por cámara digital o mediante escaneo), los parámetros de orientación externa – orientación relativa y absoluta (ω , Φ , k , X_0 , Y_0 , Z_0) de una pasada o bloque. Y además las diferentes fases de que consta el proceso tienen cierto grado de automatización. (Ackerman, 1993).

La obtención de estos parámetros de cada par estereoscópico (coordenadas del centro de proyección y giros) requiere de la existencia de:

1.- Puntos de control terrestre.- Son puntos que pertenecen al terreno con coordenadas conocidas obtenidas en campo y perfectamente identificados en las imágenes.

2.- Puntos de enlace.- Son puntos identificados en las imágenes de los que no se conocen sus coordenadas del terreno. Su papel en el proceso de la aerotriangulación consiste en introducir dos ecuaciones por cada imagen en la que se mida frente a las 3 incógnitas de sus coordenadas terreno. Por tanto, así se aumenta la redundancia en el ajuste del bloque y permite la conexión entre modelos y pasadas.

Estos dos tipos de puntos se deben situar en las posiciones de Grüber, y de esa forma cada uno de ellos aparecerá en de 2 a 6 imágenes distintas y su utilidad será mayor. Si se trata de un bloque, deben estar cercanos a su perímetro. (Santos, 2009).

5.3.2.1 Fases de la aerotriangulación

Se distinguen cuatro fases en la aerotriangulación (Lerma, 2002):

1.- Preparación y formación del bloque

- Selección de los fotogramas.
- Definición de las pasadas.
- Análisis de recubrimientos longitudinales y transversales.
- Datos de cámara y de puntos de apoyo en campo.

2.- Definición de los “puntos de paso”

Son los puntos que conectan los diferentes fotogramas que componen el bloque (se obtienen en gabinete, no en campo).

- Identificación y selección de puntos de paso en las ubicaciones necesarias para que cada punto aparezca en la mayor cantidad de fotogramas posibles. Asignación de números y nombres únicos en función de la pasada y del fotograma.
- Transferencia de puntos homólogos, mediante un transferidor de puntos (PUG) o mediante correlación automática.
- Medición de las coordenadas imagen de estos puntos. Este proceso puede ser estereoscópico o monoscópico en restituidores analíticos y digitales y de forma automática, semiautomática o manual.

3.- Medición de las coordenadas imagen de los puntos de apoyo

De los puntos de apoyo se obtienen las coordenadas terreno y de estos puntos se necesitan las coordenadas de la imagen.

4.- Compensación del bloque

Se puede utilizar cualquiera de los métodos existentes, por ejemplo mínimos cuadrados (m.m.c.c.). Sus fases son:

- Corrección de los datos
- Análisis de los datos
- Detección de errores groseros
- Depuración de los resultados
- Determinación de los parámetros.

Seguidamente se describen algunas fases de importancia en la aerotriangulación:

5.3.2.2 Elección y transferencia automática de puntos

El proceso de selección, transferencia y medición de los puntos de enlace en la actualidad está basado en una fase previa de inicialización sobre las áreas de enlace situadas en las posiciones Von Grüber así como en una exacta identificación de puntos conjugados por técnicas de correlación + imágenes piramidales.

Mediante las técnicas de correlación el sistema mide primero y transfiere después grupos de puntos de enlace y no puntos individuales dado que se busca el mayor número de repeticiones de las observaciones para mejorar los resultados. En los sistemas convencionales sólo se medían 1 ó 2 puntos.

El conjunto de todos estos puntos pasan a formar parte del ajuste del bloque en el cual se emplean estimadores que permiten:

- Eliminar errores que provengan de la correlación.
- Suministrar correctos parámetros de orientación de cada imagen.
- Obtener coordenadas ajustadas de los puntos de enlace.

5.3.2.3 Puntos de enlace

Son los puntos que sólo aparecen en 2 imágenes.

Las técnicas de correlación que se utilizan no pueden detectar malas correlaciones entre puntos de enlace que sólo caen en dos imágenes.

En la siguiente imagen (figura 5.3.1), se aprecia la representación de un punto de enlace bien correlado. Dicho punto se encuentra en seis diferentes imágenes y todos los rayos convergen en el punto objeto.

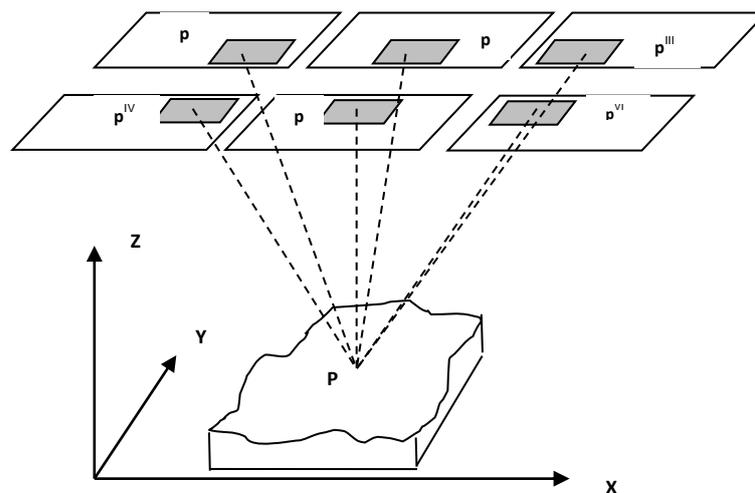


Figura 5.3.1.- Ubicación puntos de enlace (1).
Fuente: Adaptado de Santos (2009).

Seguidamente se muestra un punto de enlace que está sólo en dos imágenes y está mal correlado, es decir sólo se ha encontrado un punto conjugado, así no se puede tener comprobación de la ubicación del mismo, esto no ocurriría si tendría un tercer punto conjugado en otra imagen. Si se contara con ello se puede localizar el error por intersección de rayos homólogos. En la figura 5.3.2 se muestra una mala identificación de un punto homólogo comprobado por un tercero localizado sobre otra imagen.

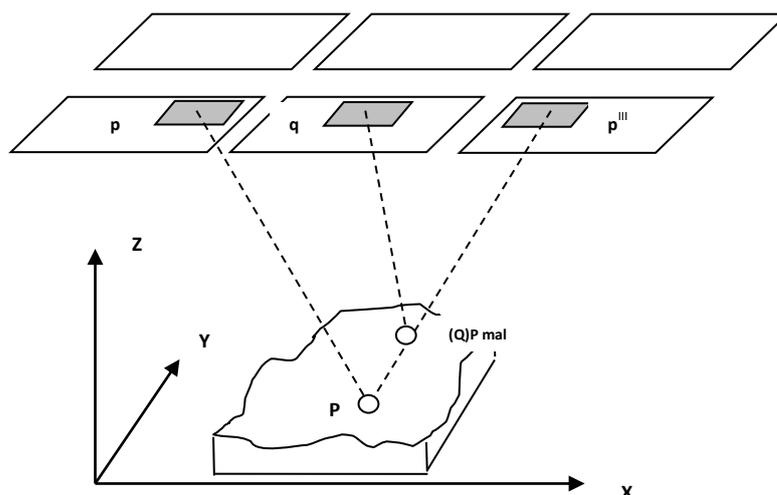


Figura 5.3.2.- Ubicación de puntos de enlace (2).
Fuente: Adaptado de Santos (2009).

En este caso el proceso a seguir es la eliminación de todos los puntos de enlace que sólo están en dos imágenes.

De esa manera se elimina la posibilidad de fallo del proceso automático de selección y transferencia de puntos. Estos puntos eliminados se sustituyen por otros elegidos por el operador humano. Una vez seleccionado el punto, se almacenan sus coordenadas imagen y se transfiere el recubrimiento a otras imágenes de forma interactiva usando técnicas de correlación. De esa forma se van rellenando las zonas vacías por puntos de enlace, que casi siempre están ubicadas en la periferia del bloque y en las zonas de unión entre pasadas.

5.3.3 Georeferenciación directa (GPSD/INS) de imágenes aéreas

5.3.3.1 Introducción

La tecnología de georeferenciación directa (GPSD/INS), surge de la combinación de dos desarrollos de ingeniería: la navegación de precisión, con sensores GPS e inerciales que resuelve el problema de la orientación externa de imágenes aéreas sin acudir a soluciones de ajuste de bloque y los desarrollos de las cámaras digitales que integrados con los sensores de navegación simplifican las tareas de orientación, se evita tener que utilizar gran cantidad de apoyo o calcular la aerotriangulación.

5.3.3.2 Modelo geométrico de la georeferenciación directa

La georeferenciación geométrica supone determinar en cualquier instante de tiempo (t) la posición del centro proyectivo de la cámara aérea (o de cualquier otro sensor imagen) en el sistema de referencia local o marco de referencia (m), es decir definir la trayectoria del vector $r_{cp}^m(t)$, y la matriz de rotación $R_c^m(t)$ del sistema de referencia de la cámara (c) al sistema de coordenadas de referencia local (m).

La fórmula final general de georeferenciación directa es la siguiente:

$$r_i^m = r_{INS}^m(t) + R_b^m(t) * [r_c^b + \lambda_i R_c^b * r_i^c]$$

Donde se tiene los siguientes observables:

r_i^m	Vector incógnita, corresponde a un punto i del terreno en el sistema de referencia cartográfico (m).
$r_{INS}^m(t)$	Vector posición del sistema inercial. Interpolado a partir de las posiciones GPS y del sistema inercial en el instante t de exposición.
$R_b^m(t)$	Matriz ortogonal que transforma los vectores del sistema de referencia inercial (b) en el sistema o marco de referencia cartográfico o local. Interpolada a partir de la salida del sistema inercial en el instante (t) de exposición.
λ_i	Factor de escala, determinado mediante técnicas estereoscópicas, de escaneado con altímetros láser o modelos digitales del terreno.
R_c^b	Matriz que transforma vectores en el sistema de referencia de la cámara (c) en el sistema de referencia inercial (b). Se obtiene por métodos de calibración .
r_c^b	Vector excentricidad entre el sistema de referencia (c) de la cámara y el sistema de referencia Inercial. Se obtiene, igualmente, por procedimientos de calibración .
r_i^c	Coordenadas imagen de un punto cualquiera i en el sistema de referencia de la cámara aérea o sensor (c).

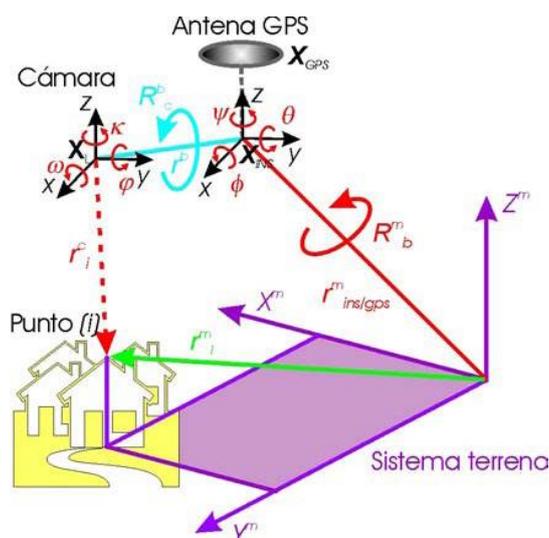


Figura 5.3.3.- Elementos de georeferenciación directa.
Fuente: Adaptado de Portalés & Lerma (2003).

5.3.3.3 Componentes que intervienen en el proceso de cálculo

Los elementos que intervienen en la obtención de los parámetros de orientación externa por georeferenciación directa, son los siguientes:

- **Sistema GPS/ INS**

Compuesto por una IMU donde se registran las aceleraciones y las relaciones angulares que se producen en vuelo debido a los movimientos del avión. Además, lleva incorporado una unidad de procesos en la que va inmerso el receptor GPS junto con una unidad de almacenamiento de datos y componentes electrónicos que constituyen el hardware de proceso en tiempo real.

- **Estaciones de referencia terrestre**

Las estaciones de referencia GPS proporcionan un importante servicio en lo que se refiere a la disponibilidad de observables GPS de alta precisión de forma permanente.

Las distancias típicas entre estaciones de referencia y móvil para un receptor de doble frecuencia es de 20 Km hasta 60 Km.

Asimismo la estación de referencia deberá ubicarse muy cerca de la zona de vuelo. Un proyecto de gran extensión necesita varias estaciones que cubran completamente la zona.

Generalmente se procesan varias estaciones de referencia en el postproceso en la georeferenciación directa. (Berné & Priego de los Santos, 2004).

5.3.3.4 Métodos para obtención de datos

Tradicionalmente, la determinación de los parámetros de orientación externa de la cámara (posiciones x,y,z y las actitudes ω, ϕ, κ) se ha llevado a término de manera indirecta utilizando puntos de apoyo medidos sobre el terreno, con la introducción de las tecnologías GPS/INS integradas a los modernos sensores aerotransportados montados en el avión, hoy en día es posible obtener directamente estos parámetros con la tecnología de georeferenciación directa. A continuación se indican los métodos que permiten obtener calidad de estos datos.

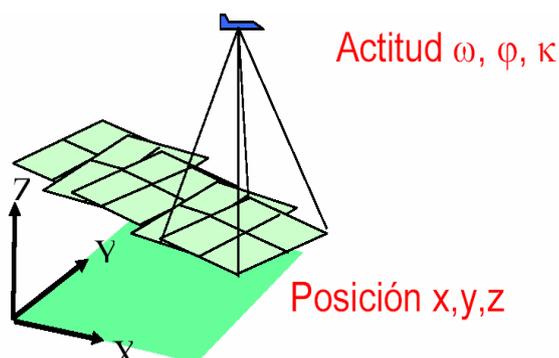


Figura 5.3.4.- Parámetros de orientación externa (posición y ángulos).
Fuente: Adaptado de GTBibérica S.L.

5.3.3.4.1 Método para obtener datos IMU (omega, phi, kappa) de precisión

- La diferencia más significativa el número de muestras por segundo (frecuencia)
- 64 Hz, 128 Hz y 256 Hz.
- Para fotografía aérea, con intervalo de disparo de más de 1 seg. Es suficiente con 64 Hz.

Es muy importante:

- Una instalación precisa y bien alineada (en ULTRACAM está prefijada)
- Calibrar regularmente la desalineación entre ejes (Boresight Misalignment)
- Medir con mucha precisión el lever arm.

5.3.3.4.2 Métodos para obtener datos GPS (XYZ) de precisión

- **GPS diferencial**

Se requiere:

- Estación propia
- Redes de estaciones fijas

- **GPS diferencial. Post-proceso con estaciones en tierra**

Con éste modo de cálculo se alcanzan resultados con precisiones de:

- 5 cm en X,Y
- 5 a 10 cm en Z

La desventaja de éste método es que se necesita un receptor GPS cercano a la zona de vuelo y realizar el post-proceso.

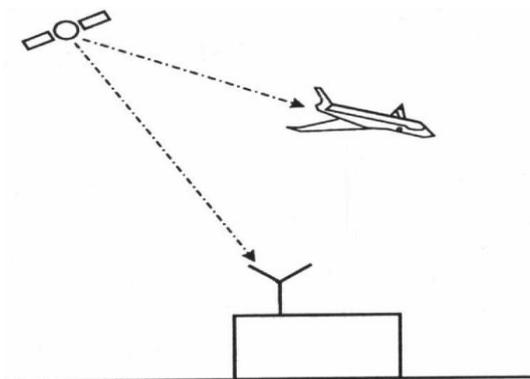


Figura 5.3.5.- Diferencial GPS.
Fuente: Adaptado de GTBibérica S.L.

- **Método de posicionamiento absoluto (PPP - Precise Point Positioning)**

Se requiere un software especializado para aplicar el método de cálculo PPP. Un ejemplo de software que se utiliza para este tipo de cálculos es Pospac MMS GNSS_inertial de Applanix.

Las precisiones que llegan alcanzar son:

- 10 cm en XY
- 10-15 cm en Z, llegando hasta 50 cm.

Las ventajas que ofrece el método son:

- No necesita de estaciones en tierra.
- No necesita realizar un postproceso

Las desventajas son las siguientes:

- Se debe esperar de 6 horas a 14 días para obtener efemérides de satélites, dependiendo de la precisión con la que se desee trabajar se elige el tipo de órbitas.
- No es suficiente en cámaras de barrido.

Para alcanzar las precisiones indicadas anteriormente el sistema integrado de orientación directa exige que todos sus componentes trabajen acoplados y sincronizados (equipo inercial, GPS y cámara aérea).

5.3.3.5 Efemérides de los satélites

Definición.- Las efemérides son tablas de valores, contienen información de la posición precisa de los satélites.

El International GNSS Service (IGS) es un servicio de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG - *International Association of Geodesy*) y tiene por misión capturar, archivar y distribuir datos y productos (efemérides) GPS y GLONASS de alta calidad.

Las efemérides ofrecidas por el IGS vienen en diferentes formatos, siendo el más utilizado el fichero estándar formato SP3 "c".

La información principal que contienen estos ficheros son:

- Datos orbitales precisos
- Parámetros de correcciones de los relojes de los satélites

Los cuales son empleados en la minimización del error geométrico en la determinación de la trayectoria.

5.3.3.5.1 Sistema de navegación GPS

GPS es un sistema de navegación por satélite consistente en una constelación de 24 satélites orbitando a una distancia de 20.200 km sobre la Tierra.

Los avances en la tecnología y las nuevas demandas en el sistema actual han llevado a los esfuerzos para modernizar el sistema de GPS y ejecutar la generación de satélites GPS III y generación sistema de control operacional siguiente (OCX- *Operational Control System*) para mejorar la precisión y disponibilidad de las señales de navegación GPS.

5.3.3.5.2 Características de la señal GPS

Para la transmisión, cada satélite emplea dos frecuencias coherentes entre sí: L1 y L2, ambas múltiplos del oscilador de referencia a 10,23 MHz. Posteriormente, estas portadoras se modulan con códigos pseudoaleatorios empleando la técnica de espectro ensanchado.

El código C/A (Coarse Acquisition) modula la portadora L1, la cual transporta el mensaje de navegación y es la base del servicio estándar (SPS). Este código consiste en una secuencia pseudoaleatoria de 1,023 MHz que se repite cada 1023 bits. Se ha escogido de una familia de códigos ortogonales conocida con el nombre de códigos de Gray, y cada satélite tiene uno distinto que le sirve de identificativo.

Por su parte, el código P (Precise) modula tanto la portadora L1 como L2, siendo la base del servicio preciso (PPS). Este código posee una frecuencia de 10,23 MHz y un período de $2^{48} - 1$ bits (muy largo), lo cual proporciona una duración de 7 días. Todos los satélites tienen el mismo generador de código P, pero a cada uno se le asigna uno de los 40 segmentos incorrelados de 7 días de duración. De este modo, los satélites no se interfieren entre sí y pueden ser identificados.

5.3.3.5.3 Datos de efemérides disponibles GPS

Para la determinación de los vectores de posición y velocidad de los satélites en un marco de referencia terrestre para cualquier instante se dispone de tres sistemas, estos son: datos del almanaque, efemérides transmitidas, y efemérides precisas.

- **Datos del almanaque**

El fin de los datos almanaque es el de proveer al usuario de datos menos exactos para facilitar la búsqueda de los satélites por parte del receptor o para las tareas de planificación tales como el cálculo de las máscaras de la visibilidad del horizonte. El almanaque es transmitido por el mensaje de los satélites y esencialmente contiene parámetros de la representación de la órbita, parámetros de corrección de los relojes del satélite, y otras informaciones.

- **Efemérides transmitidas**

Se basan en observaciones de cinco de las estaciones de monitoreo del segmento de control del sistema GPS. Estas estaciones reciben permanentemente las señales emitidas por los satélites y envían las observaciones a la estación de control maestro, quien se encarga de calcular las órbitas de los satélites.

La precisión de las coordenadas de los satélites a partir de las efemérides transmitidas es generalmente de 1 a 3 m.

- **Efemérides precisas**

En este caso las efemérides precisas son determinadas por el IGS, en base a los datos recogidos por sus estaciones de referencia GPS distribuidas por todo el globo terrestre.

La solución final de las efemérides (de precisión) que procesa el IGS (código igs), resulta de una combinación ponderada entre todos sus centros de análisis, siendo su actualización semanal y no está disponible hasta 13 días después de concluida la semana GPS, a las 24 horas UTC de cada sábado.

A continuación (cuadro 5.3.1) se muestran los productos de efemérides GPS ofrecidos por el IGS.

		Precisión	Tiempo de Espera	Actualizaciones	Intervalo de Muestra	Localización de archivos
Efemérides del satélite GPS / Relojes Satélite & Estación.						
Difusión	Órbitas	~ 100 cm	Tiempo real	--	cada día	CDDIS(US-MD) SOPAC(US-CA) IGN(FR)
	Reloj del Satélite	~ 5 ns RMS ~2.5 ns SDev				
Ultra Rápido (Predicción medio)	Órbitas	~ 5 cm	Tiempo real	En 03, 09, 15, 21 UTC	15 min	CDDIS(US-MD) IGS CB(US-CA) SOPAC(US-CA) IGN(FR) KASI (KOREA)
	Reloj del Satélite	~ 3 ns RMS ~1.5 ns SDev				
Ultra Rápido (Observado medio)	Órbitas	~ 3 cm	3 – 9 horas	En 03, 09, 15, 21 UTC	15 min	CDDIS(US-MD) IGS CB(US-CA) SOPAC(US-CA) IGN(FR) KASI (KOREA)
	Reloj del Satélite	~ 150 ps RMS ~50 ps SDev				
Rápida	Órbitas	~ 2.5 cm	17 – 41 horas	En 17 UTC diariamente	15 min	CDDIS(US-MD) IGS CB(US-CA) SOPAC(US-CA) IGN(FR) KASI (KOREA)
	Relojes Sat. & Est.	~ 75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min	
Final	Órbitas	~ 2.5 cm	12-18 días	Cada jueves	15 min	CDDIS(US-MD) IGS CB(US-CA) SOPAC(US-CA) IGN(FR) KASI (KOREA)
	Relojes Sat. & Est.	~ 75 ps RMS ~20 ps SDev			Sat. : 30s Stn.:5 min	

Cuadro 5.3.1.- Productos de efemérides GPS.
Fuente: Adaptado de IGS.

5.3.4 Orientación integrada con sensores (ISO)

La orientación integrada es una mezcla de los dos métodos anteriores, método indirecto, realizando la aerotriangulación y complementado con el método de georeferenciación directa (orientación directa) se utiliza las mediciones GPS/INS provenientes del receptor GPS y la IMU, así como puntos de apoyo en el terreno y puntos en la imagen.

Cuando se utiliza la georeferenciación directa, la precisión se limita únicamente al sistema GPS/INS.

Dependiendo del tipo de proyecto puede que los valores obtenidos directamente con el sistema GPS/INS sean suficientes en precisión. En el caso de que se necesite mayor exactitud de la que ofrece el sistema, se debe recurrir también a puntos de apoyo en el terreno para “refinar” los datos GPS/INS provenientes de los sensores aerotransportados en el avión.

5.4 GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (MDE)

5.4.1 Introducción

Un modelo digital del terreno (MDT) es la representación simplificada, en un formato accesible a los ordenadores, de la topografía del terreno (alturas sobre el nivel del mar) (Cebrián & Mark, 1986). Para ello se considera que las elevaciones forman una superficie tridimensional ondulada, en la que dos dimensiones se refieren a los ejes de un espacio octogonal plano (X e Y), y la tercera mide la "altura" (Z).

Los modelos de elevaciones pueden ser obtenidos mediante diferentes técnicas, como topografía clásica, restitución fotogramétrica, correlación. Hoy en día se impone cada vez con más fuerza el uso de modelos digitales del terreno obtenidos a partir de la técnica con láser aerotransportado (LIDAR - *Light Detection and Ranging*), ya que ofrece una serie de ventajas significativas respecto a las técnicas utilizadas tradicionalmente, destacando la precisión, fiabilidad, rentabilidad y la rapidez.

Para obtener el modelo se forman grandes conjuntos de datos con las cotas o elevaciones del terreno que están asociadas con sus respectivas posiciones planimétricas, todo ese conjunto de datos conforman la base de datos digitales de elevaciones.

5.4.2 Técnicas de obtención de MDE

Existen diferentes técnicas para obtener un modelo de elevación, seguidamente se describe de manera general los datos que se necesitan y el método seguido en cada una de ellas.

5.4.2.1 Por topografía clásica

La digitalización de la información sobre alturas contenida en el mapa topográfico forma una de las fuentes más importantes para la elaboración de un MDT. Lo único que es preciso digitalizar en este caso son las curvas de nivel y a veces las cotas de altitud puntuales.

Estas curvas de nivel constituyen una fuente especialmente conveniente para generar un MDT. Su densidad varía del modo más adecuado para obtener una representación fidedigna del fenómeno de la altitud.

5.4.2.2 Restitución fotogramétrica

Otra fuente de información es la restitución fotogramétrica, mediante un modelo estereoscópico, de pares de fotografías aéreas del terreno (Arozarena, 1992). Para ello, y para otras funciones cartográficas, se han desarrollado dispositivos y aparatos que facilitan, en gran medida, estas tareas y generan, finalmente, un fichero informático conteniendo, en la mayoría de las ocasiones, una rejilla densa de puntos con tres valores numéricos, las coordenadas geográficas X e Y y la altura Z (Cebrián y Mark, 1986). En este caso, se puede decir que se cuenta ya con un MDT en formato ráster. No obstante, en ocasiones puede ser necesario hacer más densa aún la rejilla de puntos generada o realizar algún tipo de transformación, en estos cambios será necesario emplear procedimientos de interpolación.

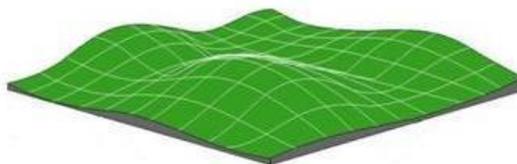


Figura 5.4.1.- Representación de un modelo digital de elevación en formato ráster.
Fuente: Adaptado de INEGI (a).

5.4.2.3 A partir de datos LIDAR

El LIDAR en esta aplicación es una técnica madura y compite o complementa a otras técnicas de captura masiva como son la fotogrametría o el radar interferométrico.

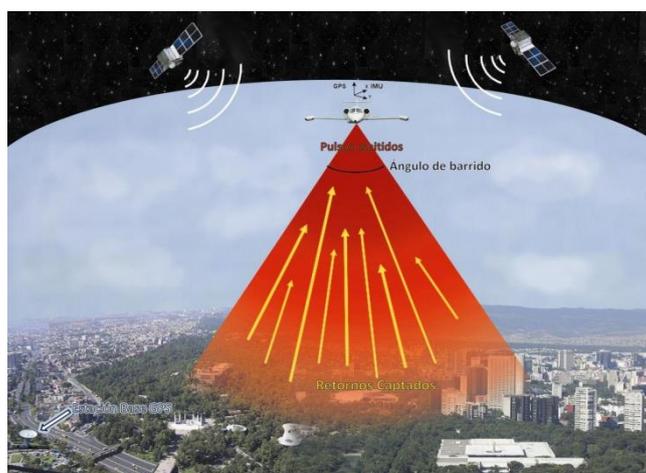


Figura 5.4.2.- Esquema de los componentes que intervienen en la tecnología LIDAR.
Fuente: Adaptado de INEGI (a).

En general, en zonas con poco relieve el empleo de LIDAR suele ser preferible a la fotogrametría o siempre que se requiera gran precisión en altitud o gran densidad de puntos medidos.

Los programas de clasificación automática permiten extraer de los puntos medidos aquellos que pertenecen al terreno con gran fiabilidad, aunque debido a la complejidad del terreno y el gran número de puntos capturados siempre se encontrará algunos mal clasificados. Estos errores de clasificación deben ser corregidos manualmente.

En una campaña LIDAR los productos habituales serán los puntos irregulares clasificados como pertenecientes al terreno o no y el modelo digital del terreno sin vegetación ni edificios. (Ruiz & Kornus, 2003).

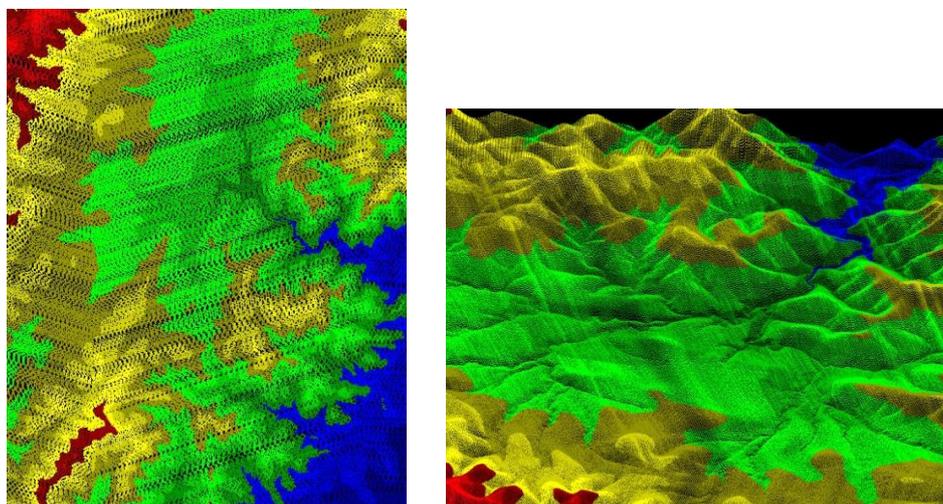


Figura 5.4.3- Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno en formato *. LAS (A). Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno vista en 3D (B).

Fuente: Adaptado de INEGI (a).

Normalmente, los MDT procedentes de LIDAR carecen de *líneas de quiebre*² pero esta carencia se ve compensada con una densidad muy alta de puntos masivos. Sobre las superficies de agua el LIDAR proporciona muy pocos puntos debido a la reflexión especular del pulso láser que impide en ocasiones que el eco regrese al sensor. A esta dificultad se une el hecho de que en las márgenes del río la vegetación suele ser muy abundante. En ríos y canales es muy recomendable introducir líneas de quiebre que unan puntos próximos con la misma cota porque de esta manera mejora mucho el modelo del terreno.

² Denominadas también como líneas de inflexión, líneas de rotura (breaklines), definen la posición de elementos lineales sin valores de altitud explícitos que rompen la continuidad de la superficie.

Por ser un sistema basado en GPS las alturas medidas serán elipsoidales. Se debe disponer de un geoide para poder pasar a alturas ortométricas.

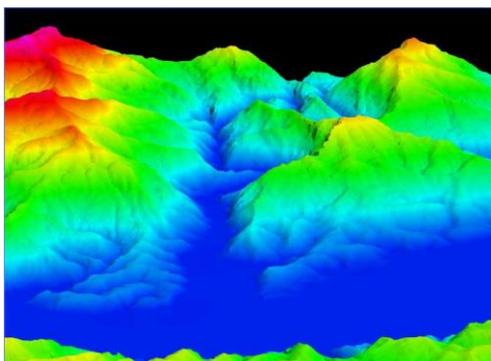


Figura 5.4.4.- Modelo digital del terreno a partir de LIDAR con vista en perspectiva.
Fuente: Adaptado de INEGI (a).

5.4.2.4 Por interpolación espacial

Con la información de base reunida de alguna manera la construcción de un MDT suele necesitar realizar una fase de interpolación espacial. La interpolación espacial es un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral, donde se estima un valor de la altura), conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales, con valores verdaderos).

Los procedimientos de interpolación son muy distintos según se desee obtener el modelo ráster. Se pueden clasificar de varias formas:

- Métodos globales frente a procedimientos locales

Se diferencian en el número de puntos muestrales que se usan para calcular el valor de la altura en los puntos no muestrales de la rejilla ráster.

- Métodos exactos y aproximados

La distinción entre ellos reside en si el resultado del proceso de interpolación reproduce exactamente los valores en los puntos muestrales o lo hace solo aproximadamente.

- Métodos directos y métodos analíticos

Los primeros asumen alguna suposición sobre la autocorrelación espacial de la altura en los puntos muestrales y los segundos llevan a cabo una fase de análisis de esta cuestión antes de proceder a la interpolación propiamente dicha.

5.4.2.5 Por correlación

El MDT y MDE se consigue mediante extracción de puntos discretos de la imagen utilizando un operador de interés.

Los puntos homólogos seleccionados se rebuscarán utilizando un algoritmo de intersección de líneas epipolares en imágenes con recubrimiento múltiple utilizando luego las ecuaciones de colinealidad.

Conociendo las coordenadas imagen de los puntos y unos parámetros de orientación externa aproximados se podrán obtener las coordenadas X, Y, Z de los puntos seleccionados.

De cada punto homólogo del primero localizado en una imagen permite plantearse dos ecuaciones, con tres incógnitas, las que serán las coordenadas terreno del punto. De estas, la Z es la que interesa para obtener el MDT. Si el punto escogido está situado en una zona Von Grüber, los puntos homólogos aparecerán en 6 imágenes como máximo, de esta manera se podrá plantear un ajuste por mínimos cuadrados para obtener las coordenadas terreno que se busca. (Santos, 2009).

5.4.3 Recomendaciones a tener en cuenta para realizar los MDE'S

Para la correcta ejecución de los trabajos es necesario planificar los pasos, antes de abordar cualquier tarea relacionada con los modelos digitales altimétricos. De esa forma se garantiza la calidad, homogeneidad de los productos y adecuación a las prescripciones técnicas así como se facilitan tanto las tareas de producción, como de control y gestión del trabajo.

Por lo tanto la planificación de un trabajo de modelos altimétricos conlleva los siguientes pasos:

- Definir el bloque: lo primero se configura los parámetros generales del bloque de trabajo.
 - Localización y tamaño del bloque.
 - Tipología de modelos a generar: MDT, MDSO.
 - Formatos de entrega: grid, etc.
 - Datos de orientación de las imágenes
 - Especificación de los parámetros de generación (paso de malla, trazado de líneas de ruptura, etc.).
 - Establecimiento de las tolerancias.
 - Localización y características de las imágenes.
- Escoger la estrategia idónea en adecuada con las exigencias del pliego. La estrategia consiste en elegir el conjunto enlazado de soluciones a cada una de las bases de datos altimétricas (líneas de ruptura, edición estereoscópica, etc.).
- Asimismo elegir el software más adecuado para llevar a cabo los pasos configurados por la estrategia en las diferentes estaciones de trabajo disponibles en el mercado.
- Realizar los gráficos de seguimiento del trabajo. Se trata de una herramienta indispensable, tanto en formato digital como en papel, para llevar el control del estado del trabajo y poder localizar e inspeccionar las posibles incidencias. (Felicísimo, 1994).

5.5 PROCESO DE ELABORACIÓN DE ORTOFOTOS

5.5.1 Introducción

Al proceso que permite la obtención de la ortofotografía digital se denomina ortoproyección (en la que se pasa de la representación en perspectiva cónica del territorio a una perspectiva ortogonal), que aplicado a fotografías o imágenes digitales aéreas, mediante las herramientas adecuadas corrigen las deformaciones, manteniendo toda la información de la fotografía aérea, permitiendo además medir a escala, tanto distancias como superficies, garantizando el ajuste con mapas existentes en la misma.

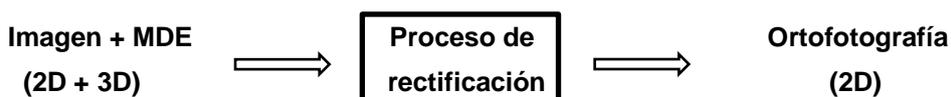


Figura 5.5.1.- Imagen digital aérea para ortorectificar (A). Imagen digital ortorectificada (B).
Fuente: Adaptado de INEGI (b).

5.5.2 Métodos de ortorectificación digital

Básicamente son los métodos que permiten transformar una imagen cónica a ortogonal, eliminando el desplazamiento producido por la inclinación del eje de la toma y, en caso de rectificarse conjuntamente con un modelo digital del terreno, se elimina también el efecto orográfico.

El esquema básico de ortorectificación es:



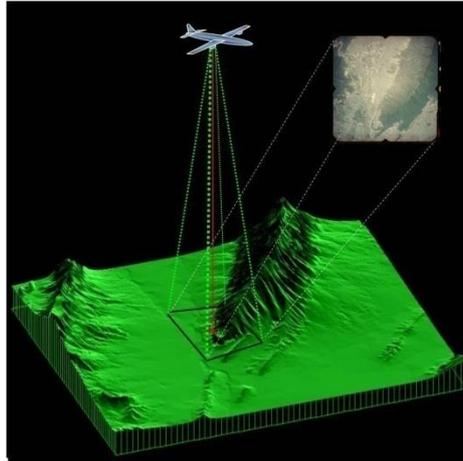


Figura 5.5.2.- Bosquejo de obtención de ortofoto.
Fuente: Adaptado de INEGI (b).

Los métodos más frecuentes de rectificación de imágenes digitales son:

- Rectificación polinómica

Con este método se corrige las proyecciones de la imagen a partir de una red de puntos de control, relacionando por medio de ecuaciones polinómicas sus coordenadas en la imagen original (x, y) con sus coordenadas en la imagen rectificadas (x', y'):

$$\begin{aligned} x &= x^i A y' \\ y &= y^i B y' \end{aligned}$$

El orden del polinomio depende del número de puntos de control utilizados, a mayor número de puntos no siempre se consiguen mejores resultados, todo depende de las características del terreno.

$$\begin{aligned} x^i &= (1, x', x'^2, x'^3, \dots) \\ y^i &= (1, y', y'^2, y'^3, \dots) \end{aligned}$$

A, B son las matrices de los coeficientes de los polinomios.

$$\begin{array}{cccc} A & a_{00} & a_{01} & a_{02} & \dots \\ & a_{10} & a_{11} & a_{12} & \dots \\ & a_{20} & a_{21} & a_{22} & \dots \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} \quad \begin{array}{cccc} B & b_{00} & b_{01} & b_{02} & \dots \\ & b_{10} & b_{11} & b_{12} & \dots \\ & b_{20} & b_{21} & b_{22} & \dots \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array}$$

Los desplazamientos debidos al relieve no se corrigen adecuadamente con este método, y tampoco considera las características específicas del sistema de captura de las imágenes.

Se suele emplear para rectificar imágenes de satélite, ya que en ellas los desplazamientos debidos al relieve son muy pequeños.

- Rectificación proyectiva

Es un método donde se establece la relación existente entre dos planos, el plano medio definido por las coordenadas terreno (X, Y) y el plano definido por las coordenadas imagen (x, y). La relación entre planos queda definida por 8 parámetros, que pueden calcularse a partir de cuatro puntos de control, utilizando para ello la transformación bidimensional proyectiva:

$$X \frac{a_1x' + b_1y' + c_1}{a_3x' + b_3y' + 1} \qquad Y \frac{a_2x' + b_2y' + c_2}{a_3x' + b_3y' + 1}$$

La rectificación proyectiva se suele emplear cuando los terrenos o superficies son prácticamente horizontales o llanos.

- Rectificación diferencial

Este es el método más utilizado para la obtención de ortofotografías, por ser el que mejores resultados proporciona. Se basa en la construcción de un modelo digital ráster (empleando para ello el valor altimétrico de un modelo digital del terreno y el valor radiométrico de cada pixel de la imagen) donde el tamaño de la rejilla queda definido por el tamaño del pixel, y se proyecta ortogonalmente sobre un plano.

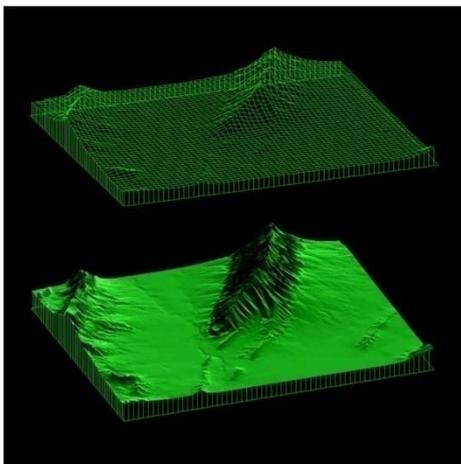


Figura 5.5.3.- MDE para rectificación.
Fuente: Adaptado de INEGI (b).

La relación entre la proyección ortogonal y la cónica viene dada por las ecuaciones de colinealidad:

$$X \quad c \frac{m_{11} X \quad X_0 \quad m_{12} Y \quad Y_0 \quad m_{13} Z \quad Z_0}{m_{31} X \quad X_0 \quad m_{32} Y \quad Y_0 \quad m_{33} Z \quad Z_0}$$

$$Y \quad c \frac{m_{21} X \quad X_0 \quad m_{22} Y \quad Y_0 \quad m_{23} Z \quad Z_0}{m_{31} X \quad X_0 \quad m_{32} Y \quad Y_0 \quad m_{33} Z \quad Z_0}$$

En estas ecuaciones las coordenadas de la imagen (x, y) se obtienen en función de las coordenadas terreno (X, Y, Z) y los parámetros de orientación externa ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$).

5.5.3 Técnicas de remuestreo

Cuando se realiza una rectificación, generalmente la posición de los píxeles proyectados no coincide con la posición de los píxeles originales, lo que supone que el nivel de gris de los nuevos píxeles ha cambiado. Para poder asignarles un valor de gris a los nuevos píxeles se suelen utilizar diferentes métodos de remuestreo (*resampling*):

- Vecino más próximo

Como indica su nombre, este método asigna a cada celda de la ortofoto el valor de gris del pixel más cercano en la imagen original. Se trata del método más simple y rápido de aplicar, sin embargo, geoméricamente sus resultados no son tan precisos como los obtenidos con los métodos siguientes.

Siendo P el punto más cercano, su posición vendrá dada por las coordenadas:

$$X_p \text{ interger } x \ 0.5$$

$$Y_p \text{ interger } y \ 0.5$$

- Interpolación bilineal

Lo que hace este método es un promedio de los valores de gris de los cuatro píxeles más próximos de la imagen original, ponderando según la distancia; de tal forma que tienen mayor influencia los píxeles más cercanos.

Suele ser el método más utilizado, aunque tiene el inconveniente de difundir los contrastes espaciales de la imagen original.

- Interpolación bicúbica

En este caso el método realiza el promedio de los niveles de gris de los 16 píxeles más próximos. Es el más preciso de todos y el que mejor efecto visual tiene, pero supone un volumen de cálculo mucho mayor. (Vozmediano, 2006).

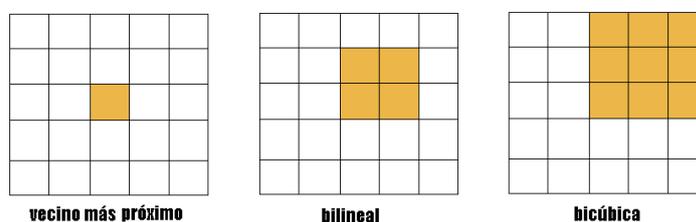


Figura 5.5.4.- Métodos de remuestreo.
Fuente: Adaptado de Velilla (1999).

5.5.4 Ajuste radiométrico de las ortofotos

Se aplica el ajuste radiométrico sobre todo a las ortofotografías que componen un ortofotomosaico, de manera que equilibren sus diferencias de brillo y contraste para que el mosaico resultante sea lo más homogéneo posible.

Las diferencias radiométricas y cromáticas pueden originarse por varias causas: por el degradado óptico, por las variaciones ambientales y de luminosidad de una toma a otra, etc...

Las imágenes procedentes de cámaras digitales ofrecen mayor calidad radiométrica y espectral, ya que entre otras cosas no se ven afectadas por los procesos de revelado y escaneado.

5.5.4.1 Análisis estadísticos e histogramas de la ortofoto

Realizar cualquier ajuste sobre las ortofotos parte del análisis de su nivel de radiancia para cada banda (una banda si es en blanco y negro, tres si es en color RGB) y del grado de homogeneidad existente entre los píxeles que la componen.

Una valoración puede efectuarse aplicando operaciones estadísticas con los datos de intensidad de tono de gris o nivel digital (ND) de cada banda (b), como la media (M):

$$M_b = \frac{\sum_{i=1}^n ND_{i,b}}{n}$$

n = número de píxeles de la banda.

que indica el brillo o luminosidad de la banda, o la desviación típica (σ):

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ND_{i,b}^2}{n} - M_b^2}$$

que indica el grado de contraste, siendo menor cuanto más pequeño sea su valor.

Otra valoración puede desprenderse del análisis del histograma, que muestra gráficamente o por tablas la distribución de píxeles en cada banda de la ortofoto según su intensidad de tono de gris. Permite determinar la tonalidad dominante en cada banda, y su anchura está relacionada con el contraste (a mayor anchura mayor contraste).

5.5.4.2 Ajuste del histograma

El ajuste lo que hace es emparejar los histogramas de distintas ortofotos para conseguir que tengan características radiométricas similares. Para realizar el ajuste se utiliza un histograma de referencia $h_1 (v_{ref})$, que se puede escoger de una ortofoto

concreta o del promedio de distintas ortofotos, y el histograma de la ortofoto a modificar $h_0(v_{mod})$.

La relación entre los dos histogramas se establece por $c_1(v_{ref}) = c_0(v_{mod})$, donde c es la función de densidad acumulada del histograma:

$$c_i V_j \quad v_f \quad h_i V_j$$

La ecuación de ajuste del histograma puede escribirse entonces como:

$$V_{ref} \quad c_1^{-1} \quad c_0 \quad V_{mod}$$

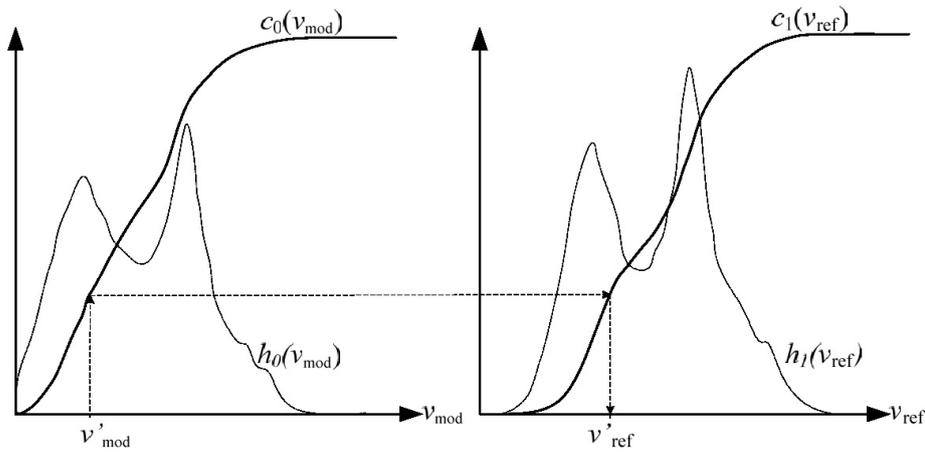


Figura 5.5.5.- Método de ajuste del histograma. Fuente: Adaptado de Vozmediano (2006).



Figura 5.5.6.- Ortofoto con ajuste radiométrico. Fuente: Adaptado de INEGI (b).

5.5.5 Confección de ortofotomosaicos

Cuando la superficie a documentar no es posible plasmar directamente en una sola ortofotografía, el procedimiento que se sigue es generar todas las ortofotografías necesarias, con un cierto grado de recubrimiento entre ellas, y unir las para formar un *mosaico*. Para obtener un buen resultado es conveniente que las ortofotografías estén perfectamente geo-referenciadas y a la misma escala.

Antes de proceder a unir las ortofotografías es necesario aplicar un ajuste radiométrico, para que todas posean características radiométricas similares y su unión no sea altamente visible.

Para la confección de mosaicos sólo se tienen en cuenta las zonas de solape entre ortofotografías contiguas. Sobre esas zonas se marcan las líneas de unión, que pueden ser determinadas manualmente o, en algunos programas, automáticamente. Si son digitalizadas por el operador se procura que estén en aquellas áreas donde la unión quede lo más disimulada posible, como: caminos, en fotogrametría aérea. Posteriormente, el programa se encarga de cortar las ortofotos por la línea de unión y hacer un suavizado o degradado del corte para disimular la franja de unión.

A continuación se pueden ver algunos métodos de unión automática de ortofotografías.

5.5.5.1 Métodos de unión de ortofotografías

Dentro de los métodos de unión automática de ortofotografías se distinguen dos grupos:

- Por una parte, los métodos que no determinan líneas de unión, sino que la unión se efectúa entre los píxeles coincidentes en todo el área de solape:
 - **Mezclando el valor de los píxeles coincidentes**, se calcula el valor *medio* de los píxeles de las dos ortofotos, se mezcla asignando pesos a cada pixel como el *inverso de la distancia* al centro de la ortofoto o se mezcla asignando pesos a cada pixel como el *inverso del cuadrado de la distancia* al centro de la ortofoto.

- **Dándole mayor peso al pixel más claro.**
 - **Dándole mayor peso al pixel más oscuro.**
- Por otra parte, están los métodos que determinan automáticamente líneas de unión. Sobre este tipo de métodos los más interesantes son los que utilizan criterios geométricos:
 - **Según la proximidad al centro de la ortofoto**, se establece el valor del pixel que se encuentra más cerca del centro de la ortofoto, se cree que cuanto más cerca este el pixel al centro menor serán las deformaciones geométricas.
 - **Según la distancia a los límites de la ortofoto**, se escogen los píxeles que se encuentren más alejados de los límites de la ortofoto. Las líneas de unión estarán entre los límites de las dos ortofotos.
 - **Según la distancia al centro de la ortofoto y a los límites de la ortofoto.** (Vozmediano, 2006).

6.- ESTUDIO EXPERIMENTAL

6. ESTUDIO EXPERIMENTAL

En esta segunda fase del trabajo se realiza el estudio experimental de la investigación, fin fundamental del estudio, se basa en los conocimientos técnicos desarrollados en la parte teórica. Se presentan los trabajos de la investigación, que en esencia argumentan la tesis.

El experimento comprende dos objetivos, el primero aborda el proceso de elaboración y ejecución de la metodología propuesta para obtener ortofotos de forma automática y en la segunda se realiza una comparativa de los resultados con una fuente de mayor exactitud y en las especificaciones técnicas del PNOA.

6.1 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE ORTOFOTOS EN AMÉRICA DEL SUR

Las especificaciones técnicas de la metodología propuesta, considera la combinación de las últimas tecnologías de cámara digital con sistema láser aerotransportado (LIDAR - *Light Detection and Ranging*), sistema de posicionamiento global (GPS - *Global Positioning System*) con sistema de navegación inercial (INS - *Inertial Navigation System*) (GPSD/INS), sumado a ello la evolución de técnicas de postproceso en la generación de ortofotos.

Para la elaboración de la metodología se ha tomado como referente las especificaciones técnicas del PNOA España (2010a,b) que cumple las normativas estándares de calidad a nivel nacional e internacional, y además se encuentra en continua adaptación al desarrollo de las nuevas tecnologías.

En el siguiente cuadro 6.6.1 se muestra un resumen del pliego técnico de la metodología propuesta con los parámetros más relevantes por fases y su comparación con la metodología del PNOA.

La metodología propuesta completa se encuentra en el anexo I.

Metodología del PNOA			Metodología propuesta para América del Sur		
Especificaciones técnicas de precisión	Método de cálculo	Datos de mayor exactitud	Especificaciones técnicas de precisión	Método de cálculo	Datos de análisis
Vuelo fotogramétrico (VF)					
Planimetría y altimetría de los CDP: RMSExyz ≤ 0.10 m	Por técnica GPS/INS diferencial con estaciones de referencia terrestre.	· Coordenadas CDP y ángulos de orientación. · Coordenadas CDP de aerotriangulación.	Planimetría y altimetría de los CDP: RMSExyz ≤ 0.10 m	Por técnica PPP sin estaciones de referencia terrestre.	Coordenadas CDP y ángulos de orientación.
Ángulos de orientación: Omega y phi <0.005° y kappa < 0.010°.			Ángulos de orientación: Omega y phi <0.005° y kappa < 0.010°.		
Orientación de imágenes (OI)					
Planimetría y altimetría: RMSExyz ≤ 0.25 m	Por aerotriangulación.	· Coordenadas CDP de aerotriangulación	Planimetría y altimetría: RMSExyz ≤ 0.25 m	Por orientación directa. (Orientación externa: por orientación relativa y ajuste en bloque)	Parámetros de orientación externa.
Modelo digital del terreno (MDT)					
Altimetría: RMSEz ≤ 1.00 m RMSEz ≤ 2.00 m (error máximo).	A partir de nube de puntos LIDAR calculado con técnica GPS/INS con estaciones de referencia terrestre.	· Datos LIDAR · MDT grid (formato Ascii Arcinfo)	Altimetría: RMSEz ≤ 1.00 m RMSEz ≤ 2.00 m (error máximo).	A partir de nube de puntos LIDAR calculado con técnica GPS/INS sin estaciones de referencia terrestre.	· Datos LIDAR · MDT grid (formato Ascii Arcinfo)
Ortofoto (OF)					
Planimetría: RMSExy ≤ 0.50 m	Se genera a partir de fotograma, orientación externa por aerotriangulación y MDE.	Ortofoto RGB	Planimetría: RMSExy ≤ 0.50 m	Se genera a partir de fotograma, orientación externa por orientación directa y MDT.	Ortofoto RGB

Cuadro 6.1.1.- Resumen de metodología propuesta para obtención de ortofotos Vs metodología del PNOA.
Fuente: Elaboración propia.

6.2 VUELO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL COMBINADO

6.2.1 Introducción

En esta parte, se trata de describir la obtención de la cobertura fotogramétrica digital de la zona de estudio, con la finalidad de utilizar las imágenes digitales en la generación de ortofotos.

Se ha elegido un vuelo fotogramétrico digital combinado, cámara fotogramétrica digital con el sistema láser aerotransportado (LIDAR - *Light Detection and Ranging*), tamaño de pixel (GSD - *Ground Sample Distance*) nominal de 0.225 m. realizado en un mismo día, 27 julio de 2010 en Cáceres – Extremadura.

6.2.2 Zona de estudio

Se hace necesario que la zona haya sido volada recientemente con las últimas tecnologías, y que tuviera una topografía variada y condiciones de vuelo óptimas.

Un aspecto importante a considerar en la zona elegida son las condiciones meteorológicas, ya que el estudio propone y ejecuta una metodología para países de América del Sur, donde se presentan zonas con abundante nubosidad permanente, lo que dificulta la visibilidad al momento de realizar el vuelo fotogramétrico.

Se ha escogido una zona de estudio que cumple los requisitos arriba mencionados, esta zona se encuentra en la provincia de Cáceres, comunidad autónoma de Extremadura y se trata de una zona específicamente volada para la generación de ortofotografías digitales, con recubrimiento longitudinal de 61% y transversal de 33.88% realizado con un vuelo fotogramétrico de GSD nominal de 22.5 cm y altura media de vuelo de 2250 m. sobre el terreno.

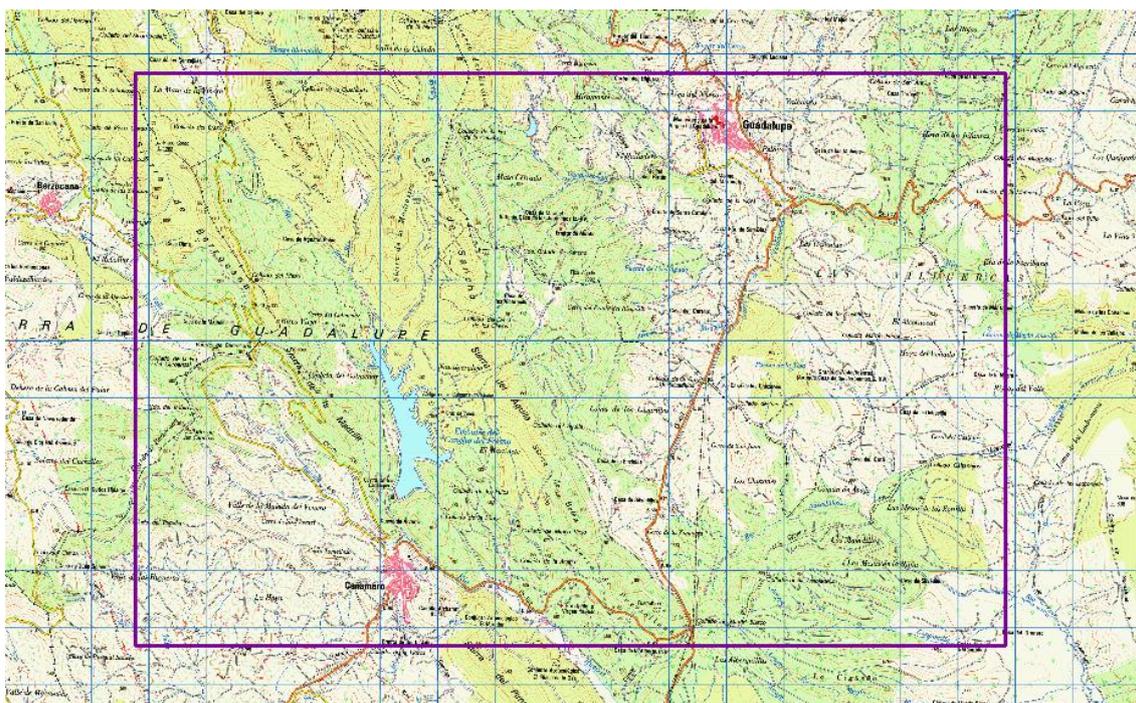


Figura 6.2.1.- Localización de la zona de estudio en el MTN50 ráster (Cáceres- Extremadura).
Fuente: Adaptado de CNIG.

6.2.3 Descripción de la zona de estudio

Para este estudio se ha considerado una zona de montaña, que comprende una superficie de 15040.52 Has, y tiene una pendiente media de 34.66 %. Se ha elegido considerando la variabilidad de la topografía del terreno, y que haya sido volada el mismo día.

La zona, está localizada en la hoja 707 del Mapa Topográfico Nacional escala 1/50.000 del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) - Instituto Geográfico Nacional de España (IGN España) que corresponde a la provincia de Cáceres, ubicado a 88 km. Dentro de la zona se encuentran los municipios de Cañamero y Guadalupe.

Las pasadas que recubren esta zona son: 90,94, 95, 96, 97,98, 99, 101,102, 104 y 107, con un total de 223 fotografías.

6.2.4 Sistema de referencia geodésico

Todo el trabajo se ha realizado en el sistema de referencia terrestre europeo 1989 (ETRS89 *European Terrestrial Reference System 1989*).

Proyección cartográfica (UTM – *Universal Transverse Mercator*)

6.2.5 Medios técnicos empleados

- Sensor de captura de imágenes digitales
- Sensor de captura de datos LIDAR que se describe más adelante en el apartado correspondiente.
- Aeronave y disposición

6.2.5.1 Descripción del sensor de captura de imágenes digitales

ELEMENTOS	ESPECIFICACIONES
Sensor empleado	Digital Mapping Camera (DMC)
Número de serie del sensor	DMC01-0020
Resolución espectral	5 bandas (rojo, verde, azul, infrarrojo cercano, pancromático)
Control automático de la exposición	Incluido
Sistema FMC	Time Delay Integration
Plataforma Giroestabilizada	T-AS 144429 Compensación de 5 deg. en roll y pitch y 30 deg. en heading. Permite control automático de deriva.
Sistema de navegación	ASMS de Integrgraph 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 Millenium: -12 canales bifrecuencia siguiendo las portadoras L1 y L2. -Registro de observaciones superior 0.1 segundos. -Modo 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 GPS: 10 a 30 cm.
Sistema inercial (IMU/INS)	PosAV-510 - Frecuencia de registro: 200 Hz. - Precisión 0.005 deg en omega y phi, 0.010 deg en kappa.
Fecha de calibración	2010

Cuadro 6.2.1.- Descripción de elementos de la cámara DMC Z/I.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 6.2.2.- Cámara DMC Z/I.
Fuente: Adaptado de Stereocarto.

Las condiciones de los parámetros básicos en imágenes virtuales con resolución multispectral y alta resolución quedan resumidas en los siguientes cuadros:

PARÁMETROS	ESPECIFIC. ALTA RESOLUCIÓN
Distancia focal (m)	0.120
Tamaño del sensor (pixel)	13824 x 7680
Tamaño del pixel (μm)	12
Punto principal (mm)	X = 0.0 ; Y = 0.0
Parámetros de distorsión	Imágenes libres de distorsión
PARÁMETROS	ESPECIFIC. RESOLUCIÓN MULTIESPECTRAL
Distancia focal (m)	0.030
Tamaño del sensor (pixel)	3456 x 1920
Tamaño del pixel (μm)	12
Punto principal (mm)	X = 0.0 ; Y = 0.0
Parámetros de distorsión	Imágenes libres de distorsión

Cuadro 6.2.2.- Características de los parámetros de vuelo.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.5.2 Aeronave y disposición

Marca y modelo	Cessna C-402
Matrícula	EC-HSI
Características generales	<p>Motores: 2, continental de inyección turboalimentados TS10-520-Vb de 325HP cada uno.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Peso Máximo al despegue: 6850 lb. - Autonomía: 6:30 horas/2.000 Km. - Velocidad de crucero: 180 Kts/300 Km/h. - Altura máxima de vuelo: 7.924 m. - Equipos de navegación: HSI, GPS, RNAV, VOR, RMI, A/P, radio altímetro, radar meteorológico. - Adaptado para poder montar simultáneamente dos sensores.

Cuadro 6.2.3.- Características de la aeronave.
Fuente: Elaboración propia.

La cámara se sitúa en la ubicación tradicional, en una perforación del fuselaje, conectada a diferentes elementos que componen el equipo global (figura 6.2.3), estos son:

- Centro de control de la unidad de medida inercial (IMU - *Inertial Measure Units*)
- Discos de almacenamiento masivo
- Interface del navegador

A su vez el piloto mediante el *plot display* puede ir siguiendo todo el trabajo que se realiza y la ruta de navegación. El sistema de posicionamiento global (GPS - *Global Positioning System*) mediante el control del sensor interconecta al piloto con la cámara y permite detectar posibles variaciones de la trayectoria. Es necesaria una perfecta ubicación de la cámara con respecto al receptor GPS, conociendo todos los vectores de situación para así poder calcular las coordenadas de los puntos de toma de forma continua.

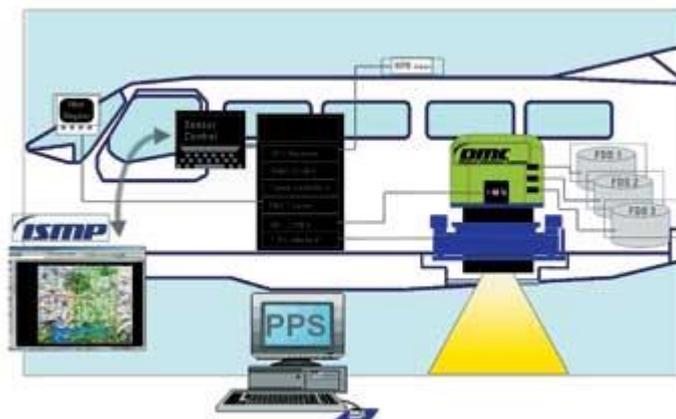


Figura 6.2.3.- Componentes del sistema y disposición en el avión.
Fuente: Adaptado de Santos (2006).

Un dispositivo que incorpora el sistema y que es de gran importancia para mejorar la calidad de las imágenes es el FMC mediante *Time Delay integration* (TDI). Este permite compensar el movimiento hacia delante del avión que provoca una clara falta de definición de los objetos fotografiados. El sistema utilizado TDI utiliza la captación previa de la imagen y posteriormente un retraso en el tiempo de incorporación a la matriz definitiva.

El esquema de funcionamiento (figura 6.2.4) del sistema FMC consiste en que el sistema va capturando las imágenes en RGB y en vez de situarlas directamente donde correspondería, van saltando a la siguiente posición que mediante el retraso correspondiente son situadas en la última línea de la matriz imagen ya compensadas.

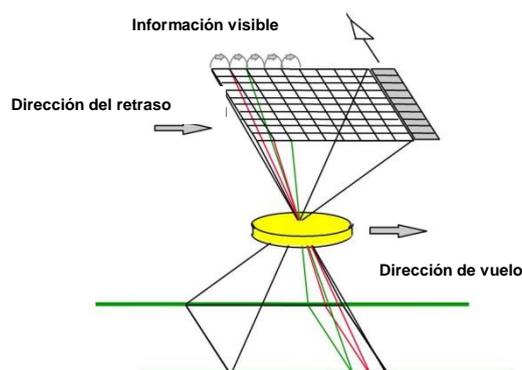


Figura 6.2.4.- Esquema de funcionamiento del sistema FMC.
Fuente: Adaptado de Santos (2006).

6.2.6 Planificación

La planificación del vuelo se ha realizado teniendo en cuenta las especificaciones técnicas para un vuelo combinado (cámara + LIDAR).

En la realización del vuelo se ha verificado que las condiciones meteorológicas y de visibilidad en la zona de trabajo fueran las idóneas para la realización de los trabajos fotogramétricos.

El área total volada para el proyecto de la comunidad de Extremadura ha sido de 792527.58 hectáreas. Para nuestro estudio de investigación se ha escogido una zona rural de montaña volada el mismo día (27 de julio del 2010).

Los parámetros de la cámara digital utilizados en la planificación fueron los siguientes:

- Altura de vuelo sobre el terreno: 2250 m.
- GSD: 0. 225 m.
- Recubrimiento longitudinal: 61 %
- Recubrimiento transversal: 33.88 %
- Campo de visión transversal (FOV): 69.3°

De la planificación se han obtenido los siguientes resultados:

Número total de pasadas necesarias para todo el proyecto de Extremadura: 133

Número total de fotografías: 5795

Número de pasadas para la zona de estudio, provincia de Cáceres: 11

Número de fotografías para la zona de estudio, provincia de Cáceres: 223

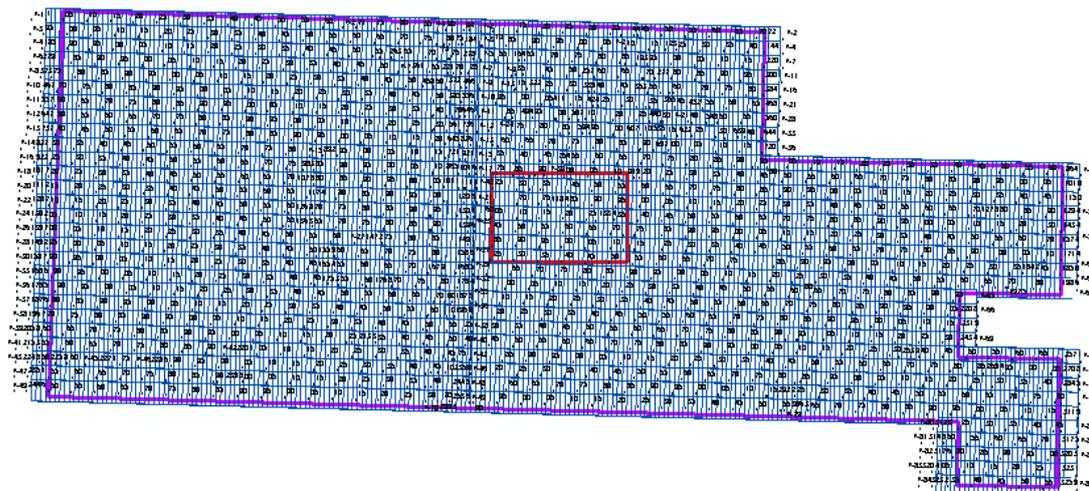


Figura 6.2.5.- Gráfico de vuelo zona de estudio (Cáceres _Extremadura).
Fuente: Elaboración propia.

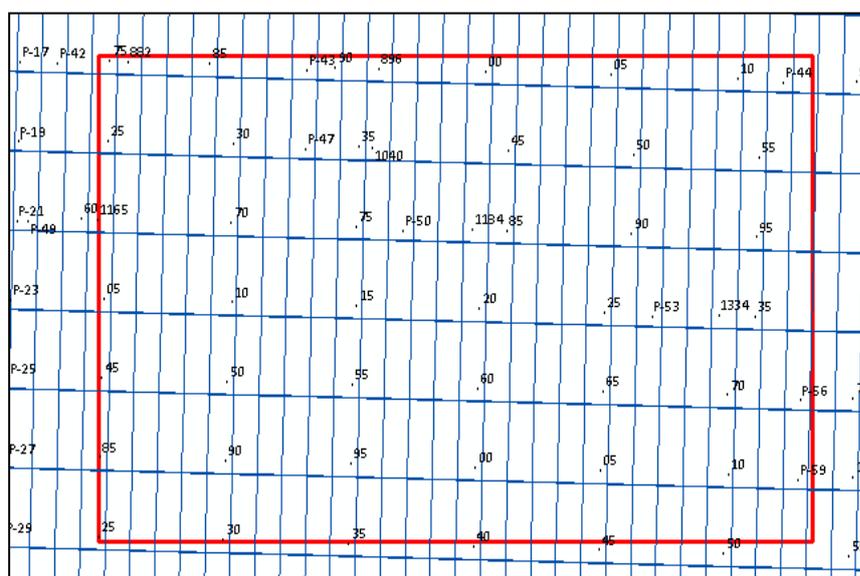


Figura 6.2.6.- Detalle del gráfico de vuelo zona de estudio (Cáceres _Extremadura).
Fuente: Elaboración propia.

Los productos capturados en vuelo son los datos de cada uno de los sensores en un formato propio del fabricante.

En el caso de la cámara digital, por cada disparo de ésta se capturan 8 imágenes, una por cada uno de las cámaras individuales que conforman el sistema. Cuatro de estas imágenes son pancromáticas y otras cuatro multiespectrales (rojo, verde, azul e infrarrojo próximo). Estas imágenes son capturadas con una resolución radiométrica de 12 bits por pixel. Al mismo tiempo el sistema GPS y el sistema de navegación inercial (INS - *Inertial Navigation System*) capturan la información de navegación y el

tiempo GPS en que la cámara efectúa cada una de las exposiciones, esta información será empleada posteriormente para calcular los parámetros de orientación externa de cada fotografía.

Los datos brutos capturados por los sensores son procesados en gabinete para obtención de los productos de acuerdo a las especificaciones técnicas propuesta en el estudio.

Los productos derivados de la cámara digital son:

Imagen	Resolución radiométrica	Resolución geométrica
Composición color RGB (rojo, verde, azul)	8 bits	22.5 cm
Composición falso color infrarrojo IR, rojo, verde)	8 bits	22.5 cm

Cuadro 6.2.4.- Imágenes obtenidas por la cámara digital.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.7 Postproceso de las imágenes digitales

El postproceso de imágenes digitales consiste en la normalización y corrección de las imágenes brutas captadas por el sensor aerotransportado.

Este procedimiento permite que las imágenes sean útiles para explotarlas posteriormente. Los procesos que se siguen son:

- **Correcciones radiométricas.** Consiste en la corrección de píxeles defectuosos y en la posterior ecualización del histograma de frecuencias, balanceado y contraste de la imagen.
- **Correcciones geométricas.** Se basan en la corrección de las distorsiones de imagen de cada sensor óptico y la corrección entre el centro geométrico y el centro óptico de cada dispositivo de carga acoplada (CCD - *Charge-Coupled Device*). En ésta fase se consigue lo que se denominan imágenes de nivel 1.

6.2.7.1 Mosaico de imágenes simples pancromáticas para formar la imagen virtual.

Los módulos de los cuatro sensores pancromáticos (de 7k x 4k píxeles) están dirigidos hacia la escena con leves ángulos de inclinación que dan lugar a una representación conjunta con forma de mariposa. Entre las cuatro imágenes existen zonas comunes de

solape, que se utilizan para la rectificación y mosaicado de la imagen final de perspectiva cónica de 13865 x 7680 píxeles. (Santos, 2009).

Apoyándose en la búsqueda de puntos homólogos mediante correlación automática entre las cuatro imágenes, se consigue ensamblar las mismas obteniendo de este modo la imagen virtual pancromática. Esta imagen virtual es sometida a un nuevo proceso de corrección radiométrica que iguala el brillo y el contraste de las cuatro imágenes individuales de que se compone. Finalizado este paso se consiguen las imágenes de nivel 1 a.

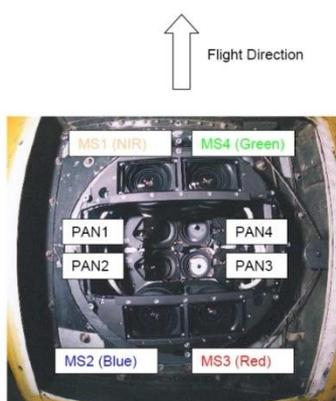


Figura 6.2.7.- Configuración de las cámaras digitales en el sistema DMC.
Fuente: Adaptado de Stereocarto (2007).

6.2.7.2 Obtención de imágenes a color por composición

Para el caso de las imágenes a máxima resolución, se combinan los canales multiespectrales con el pancromático, realizando un proceso de pansharpening (para mejorar de la resolución espacial de imágenes), el software de postproceso ofrece la posibilidad de emplear dos técnicas diferentes de fusión: *Intensity-Hue-Saturation* (IHS) o Brovey, la elección entre una y otra dependerá de las características del terreno y de la altura de vuelo. Tras este proceso se obtienen las **imágenes de nivel 1b**.

Finalmente, las **imágenes de nivel 2** resultan de aplicar a las imágenes de nivel 1b los parámetros de orientación externa que se obtienen por georeferenciación directa.

A continuación se muestra parte de las **imágenes digitales (RGBI)** del vuelo fotogramétrico correspondientes a la zona experimental.



Figura 6.2.8.- Imagen digital_96_2827-rgbi.
Fuente: Elaboración propia.

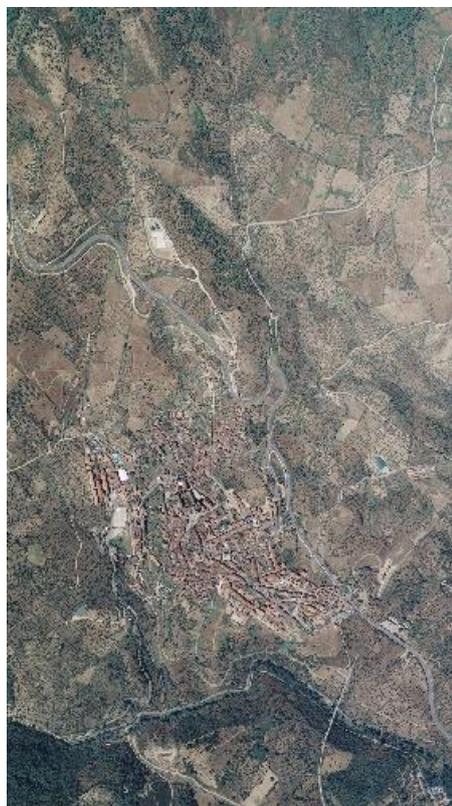


Figura 6.2.9.- Imagen digital _96_2828-rgbi (A). Imagen digital 96_2829-rgbi (B).
Fuente: Elaboración propia.

6.3 ORIENTACIÓN DE IMÁGENES

6.3.1 Introducción

Con las nuevas tecnologías ha surgido el método de orientación directa GPS/INS como alternativa a las técnicas tradicionales de orientación en campo, de los sensores aerotransportados.

Esta técnica de orientación permite obtener directamente las orientaciones externas (posiciones XYZ, ángulos omega, phi, kappa) es decir no se necesitan los puntos de apoyo de campo, ni calcular la aerotriangulación.

Para el cálculo mediante la orientación directa se requieren datos del GPS, de los sistemas inerciales obtenidos durante el vuelo y datos de efemérides precisas, posteriormente después del postprocesado de la trayectoria GPS/INS se obtienen los 6 parámetros de orientación externa que se utilizarán en la ortorectificación.

6.3.2 Elementos para obtener los parámetros de orientación externa

Los elementos necesarios son:

- Unidad de medida inercial, PosAV-510 con una frecuencia de registro de 200 Hz.
- Unidad de procesos en la que va metido el receptor GPS, en este caso modelo Novatel.
- Antena bifrecuencia situada en la parte superior del fuselaje del avión.
- Efemérides precisas GPS

La distancia de la antena GPS al centro de proyección de la cámara ha sido de 1.22 m.

6.3.3 Efemérides precisas GPS

Servicio Internacional de GNSS (IGS - *International GNSS Service*) recoge archivos (tablas de datos), analiza y distribuye datos de efemérides enviados por los satélites GPS y GLONASS con precisiones suficientes para cumplir los objetivos de una amplia gama de aplicaciones científicas, de ingeniería, estudios, etc.

6.3.3.1 Descarga automática de efemérides

Las efemérides precisas están disponibles en internet, a partir de un cierto tiempo de la observación que depende del tipo de producto (ultra-rápida, rápida o final).

Para descargar los datos de efemérides de internet lo más recomendable es acceder a la página del IGS o por medio de los softwares de postprocesamientos del vuelo fotogramétrico que incluye la descarga directamente, como es el caso del software POSPac MMS de Applanix, éste software busca automáticamente en una base de datos la fecha y hora que inicialmente se ha introducido, (para el caso en estudio se introduce el 27 de julio del 2010) dentro del radio especificado, en unos instantes nos muestra la selección localizada. A continuación se elige los formatos que nos interesa utilizar y el tipo de órbita, y automáticamente el software se conecta a la web del IGS y descarga los datos de efemérides solicitado.

En el estudio se ha utilizado efemérides precisas finales formato igsXXXXX.sp3 (estándar aceptado ampliamente) que contiene precisión de las medidas de pseudodistancia de los satélites observados, las correcciones de los relojes de los satélites, datos orbitales, parámetros de la rotación terrestre, determinados por el IGS, mediante combinación ponderada de todo sus centros de análisis, para lo cual se debe esperar 13 días.

A continuación se muestra los datos de efemérides empleado en el proceso de orientación de las imágenes (formato sp3c).

```

#cP2010 7 27 0 0 0.00000000 96 ORBIT IGS05 HLM IGS
## 1594 172800.00000000 900.00000000 55404 0.00000000000000
+ 32 G01G02G03G04G05G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15G16G17
+ G18G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 3 2 2 2
++ 2 2 2 2 2 2 2 0 3 2 2 2 2 2 2 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%c G cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%f 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.000000000000000000
%f 0.00000000 0.0000000000 0.000000000000 0.0000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod emr esa gfz grg jpl mit ngs sio
/* REFERENCED TO IGS TIME (IGST) AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* PCV:IGS05_1585 OL/AL:FES2004 NONE Y ORB:CMB CLK:CMB
* 2010 7 27 0 0 0.00000000
PG01 5221.183527 15209.162956 -21232.020053 999999.999999
PG02 -13636.304531 -19853.640854 -11702.850597 276.030677 10 7 11 112
PG03 23528.833942 10250.979668 -7870.946542 586.889636 7 8 8 129
PG04 -5963.053513 -25680.168530 -268.291132 133.352289 10 6 10 97
PG05 -15150.741540 -6077.840802 -20979.961469 -17.735251 9 9 8 125
PG06 20149.804256 13448.423119 -10899.646344 557.784166 9 6 8 123
PG07 7760.612283 -18744.658463 -17056.288435 -1.833310 7 8 8 145
PG08 907.311627 -25272.476042 -7149.959927 6.254286 12 8 7 83
PG09 -15070.094391 -1471.926858 21278.114847 20.670780 6 8 7 163
PG10 -4771.668907 -15709.197691 -20996.266071 -48.038588 9 5 7 128
PG11 16104.764671 -4748.746572 20335.352202 -78.288619 7 7 5 98
PG12 -22012.809218 9479.834851 11315.612802 -89.467371 9 9 10 140
PG13 15604.125353 -7991.364158 -20105.866162 300.995200 11 8 8 146
PG14 5473.086894 16359.300847 20379.695934 72.039536 8 7 8 101
PG15 -25919.194689 -5242.749752 3136.762641 -233.395702 11 11 12 102
PG16 10822.069086 10361.343813 -21908.377787 -93.415075 9 6 8 119
PG17 -2457.231425 -16300.284259 20974.000092 163.820352 11 6 8 98
PG18 -16297.619347 19997.686119 5679.638598 83.272180 7 7 4 117
PG19 25466.305186 6935.710379 4278.115343 -52.764285 8 8 9 131
PG20 21820.410557 -11307.365526 9874.063580 52.896864 5 4 10 101
PG21 -6151.384933 21141.770208 -14042.748862 -76.708371 9 7 8 132
PG22 -6453.032769 20758.189082 15366.497524 166.638632 8 6 6 103
PG23 22983.068592 -2341.622875 -13415.698674 361.268313 11 8 8 103
PG24 9117.015387 24181.536114 6797.120692 307.723461 5 8 7 99
PG25 -20710.204140 16300.884885 3549.329615 999999.999999
PG26 -23877.010922 -11727.084280 -3575.496409 999999.999999
PG27 -16269.691840 -6129.860473 20811.074851 173.934042 8 9 6 121
PG28 9118.672207 -20657.922308 14227.268978 -9.305835 10 7 8 93
PG29 -16407.167098 8381.613752 -19027.244405 137.361156 11 10 7 125
PG30 -18926.889247 18576.249825 503.883290 264.039186 8 8 7 115

```

Figura 6.3.1.- Primera página de los datos de efemérides para la orientación de imágenes (1). Fuente: Elaboración propia.

* 2010	7	27	11	15	0.00000000									
PG01	-10830.409707	-10968.601198	-21754.971754	999999.999999										
PG02	13536.638017	15036.830264	-17444.740630	276.152151	8	6	8	119						
PG03	-24932.757825	-9682.850928	-121.157700	587.097788	7	4	4	128						
PG04	6784.291349	24203.484290	-8171.510646	133.677506	5	5	4	124						
PG05	19985.107039	1944.914128	-17442.263397	-17.881654	8	5	4	129						
PG06	-22732.513471	-13433.933960	-3417.379050	557.199615	6	4	4	105						
PG07	-6645.210904	23254.723318	-10775.982987	-1.838562	6	6	6	118						
PG08	-243.030808	26233.488232	1179.749260	6.253240	7	3	6	69						
PG09	13927.508866	-5818.088944	21304.691477	20.767626	5	6	5	86						
PG10	10442.113310	11704.852692	-21642.532395	-48.070687	6	3	6	131						
PG11	-13491.508569	11116.019888	19655.457654	-78.391874	4	5	6	93						
PG12	23589.443588	-11482.778811	3603.872742	-89.308341	9	7	7	117						
PG13	-9488.539186	11202.915186	-22275.244939	300.966934	7	5	3	130						
PG14	-10902.069058	-18622.798062	15722.358943	72.203385	5	4	6	102						
PG15	24065.462715	3691.913188	10777.317268	-233.154150	9	4	6	89						
PG16	-16387.130510	-6204.656986	-20013.190793	-93.559998	8	7	5	95						
PG17	8296.331821	18561.824778	17308.172852	163.889024	7	4	6	112						
PG18	13315.646482	-18966.131303	12910.052720	83.365909	7	5	4	122						
PG19	-23431.814445	-5145.703592	11766.908325	-52.884741	8	4	4	116						
PG20	-22822.480985	13324.665957	2219.859320	52.878916	8	6	5	106						
PG21	4726.357292	-24706.653162	-7107.177873	-76.815725	6	4	5	138						
PG22	1463.521595	-17824.164560	19778.942346	166.613548	5	4	4	72						
PG23	-18288.526055	4798.947088	-18805.901618	361.200822	8	6	5	133						
PG24	-9605.160113	-20707.664324	13885.654127	307.852921	5	5	3	118						
PG25	20007.216229	-16875.019212	-4755.109757	999999.999999										
PG26	23747.869875	11249.061512	4555.300537	-88.227699	8	6	7	106						
PG27	15146.033474	-497.049879	22496.592145	174.096795	5	6	4	85						
PG28	-4491.201705	17922.833107	19451.596186	-9.253420	6	3	5	98						
PG29	10347.267943	-11410.822351	-21545.297849	137.470091	6	6	5	100						
PG30	17628.670781	-18518.783488	-7511.264893	264.166046	5	1	5	110						
PG31	-7637.749570	-23089.835472	-10259.994665	-21.601614	5	5	6	115						
PG32	-24409.864009	5709.036408	8553.689969	-47.419457	4	4	3	116						
* 2010	7	27	11	30	0.00000000									
PG01	-8787.426635	-12360.563961	-21918.810945	999999.999999										
PG02	13518.606351	16928.040119	-15674.904363	276.154781	8	7	8	112						
PG03	-24703.986899	-9941.630310	-2883.461199	587.101590	8	3	5	115						
PG04	6509.227156	24994.936187	-5489.077723	133.684645	5	5	4	126						
PG05	18338.770241	3223.847398	-18986.064977	-17.884809	8	5	3	126						
PG06	-22090.528650	-13495.158789	-6140.756600	557.186754	7	2	5	97						
PG07	-6930.726647	21896.076636	-13192.119382	-1.838505	6	5	6	118						
PG08	-445.810328	26199.250016	-1772.229319	6.253580	7	3	5	97						
PG09	14198.352610	-3259.672411	21661.301280	20.769327	5	5	5	102						
PG10	8379.713406	13019.493876	-21758.092976	-48.071692	6	4	6	131						
PG11	-14312.101925	8887.141822	20227.082410	-78.394160	4	4	6	111						
PG12	23237.940354	-10978.083853	6413.555155	-89.304650	9	7	7	121						
PG13	-11627.148757	9934.319793	-21860.865499	300.966367	8	4	4	131						
PG14	-9209.119570	-17811.803496	17633.192861	72.206788	5	4	5	104						
PG15	24944.221914	4368.990310	8231.235938	-233.148728	9	5	6	159						
PG16	-14439.170157	-7510.134010	-21014.198456	-93.563203	8	7	5	109						
PG17	6423.158024	17731.440683	18892.871517	163.890500	7	3	6	106						
PG18	14584.606091	-19433.352294	10544.581427	83.368035	8	6	4	122						

Figura 6.3.2.- Página intermedia de los datos de efemérides para la orientación de imágenes (2).
Fuente: Elaboración propia.

PG15	-25044.614635	-4441.381118	7881.156688	-232.891794	9	7	5	127
PG16	14181.813602	7692.260193	-21119.913170	-93.716470	8	8	4	107
PG17	-6150.081586	-17619.787859	19085.711672	163.962664	8	7	7	119
PG18	-14736.630665	19490.655920	10208.596789	83.469053	9	8	8	110
PG19	24459.768580	6018.750173	8944.829373	-53.014870	8	5	9	130
PG20	22626.829492	-12717.960604	5369.561743	52.859126	7	5	6	114
PG21	-5208.113884	23542.446554	-10049.699783	-76.933486	5	3	5	138
PG22	-3621.692230	19001.334452	18330.698086	166.584976	4	7	7	106
PG23	20295.208571	-3652.808349	-16942.223945	361.127683	9	8	9	99
PG24	9441.845423	22267.901839	11361.253082	307.995250	4	4	6	120
PG25	-20414.726856	16958.235629	-1719.605117	999999.999999				
PG26	-24030.364173	-11676.469834	1198.332205	999999.999999				
PG27	-15472.859385	-2222.510055	22175.434907	174.258319	9	9	5	112
PG28	6534.709068	-19033.574947	17663.979674	-9.199912	7	8	6	146
PG29	-12778.986285	10063.955213	-20900.440575	137.587959	6	4	6	127
PG30	-18379.836309	18718.728929	-4398.873700	264.310791	8	8	8	118
PG31	7484.280373	24271.994151	-7246.611042	-21.484249	4	7	3	97
PG32	23445.045460	-4843.923693	11449.489623	-47.803903	7	6	5	132
* 2010	7	27	23	45	0.00000000			
PG01	6557.525849	14073.170882	-21651.013078	999999.999999				
PG02	-13572.165574	-18819.737820	-13340.208707	276.286964	9	10	7	86
PG03	24106.130029	10143.240345	-5957.692815	587.324052	7	6	11	133
PG04	-6195.187783	-25535.614262	-2329.690478	134.037042	7	7	7	109
PG05	-16406.582429	-4888.379474	-20341.807292	-18.044480	8	6	5	143
PG06	21020.191474	13481.652799	-9106.303750	556.546915	7	5	9	127
PG07	7380.984737	-20062.045014	-15656.386477	-1.841761	5	8	8	123
PG08	702.336386	-25764.722029	-5085.343681	6.258763	7	7	6	101
PG09	-14674.600435	358.379347	21590.560692	20.869982	8	9	6	97
PG10	-6115.904667	-14643.013033	-21440.156256	-48.110298	6	6	7	121
PG11	15364.324286	-6357.004646	20442.820108	-78.507603	8	8	5	129
PG12	-22568.577918	10153.758882	9470.419686	-89.130885	9	7	7	144
PG13	14060.505065	-8685.595961	-20942.086331	300.935430	8	8	9	117
PG14	7025.769772	16907.687264	19436.476532	72.384095	8	5	5	114
PG15	-25648.848789	-4943.903247	5179.218535	-232.886156	9	7	6	130
PG16	12233.122440	9177.428271	-21711.267151	-93.720038	8	8	4	98
PG17	-4065.257242	-16830.534685	20304.468376	163.964439	8	7	6	112
PG18	-15726.931816	19837.504768	7638.679944	83.470799	9	9	9	106
PG19	25132.813628	6600.772043	6292.096739	-53.017295	8	6	9	130
PG20	22226.225241	-11971.906098	8036.092045	52.858907	7	6	6	110
PG21	-5717.397611	22236.193912	-12444.786156	-76.935638	5	2	5	139
PG22	-5330.141226	20033.252743	16720.973501	166.584481	6	7	8	87
PG23	21915.725909	-2832.549698	-14993.880089	361.126146	9	9	9	106
PG24	9309.056938	23425.399921	8872.549280	307.998271	4	4	7	118
PG25	-20598.035623	16780.874515	1132.614218	999999.999999				
PG26	-23998.690307	-11816.994412	-1691.357453	999999.999999				
PG27	-15894.464183	-4533.197556	21510.029705	174.260703	9	9	6	114
PG28	8111.198822	-19994.399891	15772.703648	-9.198716	7	8	7	147
PG29	-14900.217250	9035.199383	-19944.472402	137.590605	6	5	7	129
PG30	-18778.702554	18711.698482	-1575.141332	264.313244	8	9	8	122
PG31	7365.220984	24990.598428	-4453.353131	-21.481978	5	7	4	81
PG32	22391.027238	-3881.765925	13788.890591	-47.811791	7	6	5	135
EOF								

Figura 6.3.3.- Última página de los datos de efemérides para la orientación de imágenes (3).
Fuente: Elaboración propia.

6.3.3.2 Método Precise Point Positioning (PPP)

PPP es un método de posicionamiento absoluto cuyas diferencias respecto a los métodos clásicos son varias. A diferencia de los modelos diferenciales consiste en determinar época a época, las coordenadas absolutas. (Agea, 2011).

Para lograr posicionamiento PPP preciso es necesario modelar efectos puesto que ninguno se cancela como en dobles diferenciales.

Los efectos que se necesitan modelar son aquellos que afectan a las señales del sistema global de navegación por satélite (GNSS) (refracción ionosférica) y a la ubicación en sí.

Este método permite obtener los parámetros de orientación externa absoluta. Los datos necesarios que se requieren para el cálculo son:

- Rinx obtenido del vuelo fotogramétrico (GPS/IMU)
- Datos de las orbitas precisas y relojes de los satélites (efemérides) obtenidas del IGS.
- Datos de las variaciones de la antena GPS al centro de proyección de la cámara.

El postprocesado se realiza de forma automática.

En el cálculo de postproceso no son necesarios datos de estaciones de referencias terrestres o de otras estaciones base, siendo una ventaja que presenta PPP frente al método doble diferencial.

El método PPP permite alcanzar una precisión en posición del orden del centímetro a nivel global y tiene innumerables aplicaciones en campos tan diversos como la geodesia, geomática, la cartografía, la meteorología, y la sincronización de tiempos. (Posicionamiento preciso, 2009).

6.3.4 Definición del bloque

Se definen los bloques de los fotogramas que se van a orientar, seguidamente se prepara lo siguiente:

- Las pasadas que definen el bloque.
- El fichero de los datos GPS, obtenidos en el vuelo que contiene las coordenadas de 3D de los fotocentros (x,y,z) y los valores de los giros omega , phi y kappa (ω, ϕ, k).
- Los fotogramas que contiene cada pasada.
- Los datos de calibración de la cámara fotogramétrica.

- Orientación de las imágenes, respecto de la posición natural de la cámara.

En el presente estudio se trata de un solo bloque que abarca la parte central de la hoja 707 del MTN50 oficial en coordenadas UTM (ETRS89), no hay necesidad de dividir el trabajo, debido a que se utiliza el método de orientación directa no hace falta calcular la aerotriangulación.

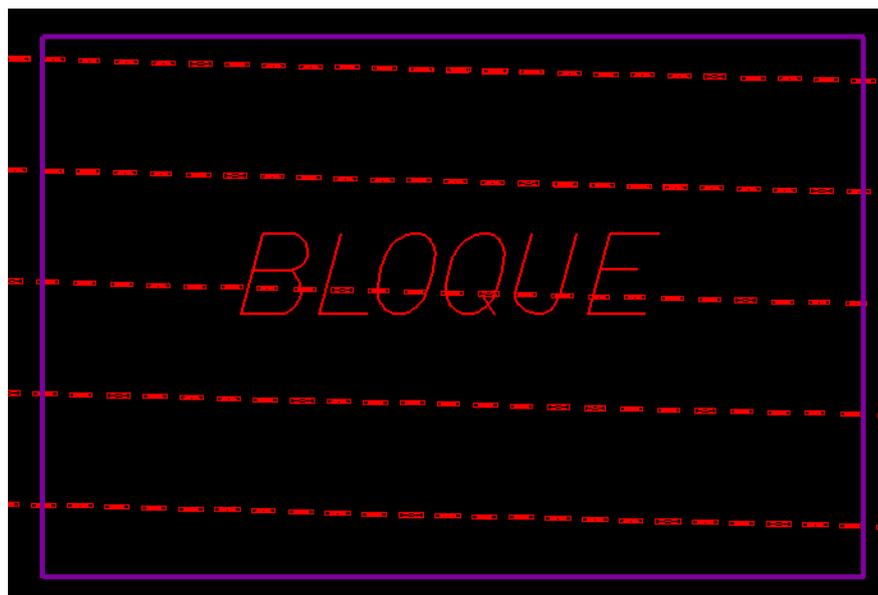


Figura 6.3.4.- Bloque zona de estudio para orientación.
Fuente: Elaboración propia.

6.3.5 Metodología de cálculo de orientación externa por orientación directa

A continuación se describe el procedimiento seguido para la obtención de los parámetros de orientación externa de las fotografías por orientación directa.

1. Se extrae y revisa los datos registrados por la unidad de medida inercial, siendo estos datos relaciones angulares, aceleraciones lineales y observaciones GPS.
2. Los datos obtenidos en la fase anterior se convierten a un formato legible por el software de proceso para el caso se ha utilizado POSPac MMS 5.3 de Applanix y nuevamente se realiza una comprobación de los datos registrados por la IMU y el receptor GPS.
3. Se obtiene la trayectoria inicial, a partir de los datos GPS del receptor móvil con registro de coordenadas cada segundo.

4. Se calcula la trayectoria final relajada en sentido directo e inverso, con el método de postprocesamiento por PPP que requiere de los datos de efemérides precisas obtenidas del IGS.

Se consideran dos trayectorias, una en sentido directo desde que el avión despegue realiza la toma fotográfica y vuelve al aeropuerto; y otra en sentido inverso, aterriza, realiza la toma fotográfica y despegue.

Para ello se compara la trayectoria GPS generada mediante PPP a un segundo de secuencia temporal con la trayectoria generada por las observaciones tomadas por la IMU de relaciones angulares y aceleraciones lineales con 0.005 segundos de secuencia de registro.

La primera trayectoria quedará marcada por tres coordenadas en el espacio, mientras que esta última quedará definida por tres coordenadas en el espacio más tres valores angulares.

De esa comparación resulta la trayectoria final suavizada definida por 6 grados de libertad en la que se conserva la precisión absoluta del método PPP y la precisión relativa proporcionada por los giróscopos y acelerómetros.

Finalmente la interpolación se realiza en la trayectoria suavizada de las marcas de tiempo registradas por cada toma fotográfica en cada instante de tiempo. Como la frecuencia de registro de la IMU es mayor que la del GPS, la trayectoria final del vuelo quedará definido por tres coordenadas y tres ángulos cada 0.005 segundos, de esta manera la interpolación es más precisa y confiable.

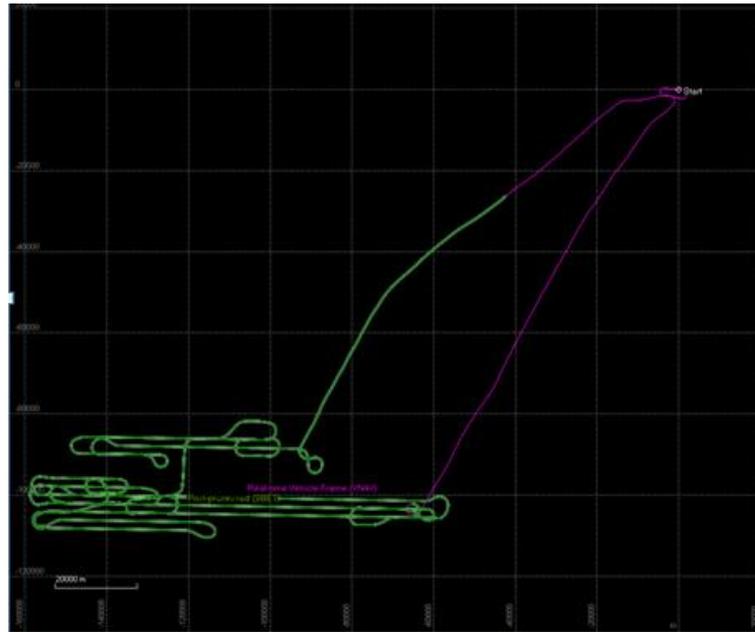


Figura 6.3.5.- Trayectoria final procesada.
Fuente: Elaboración propia.

```

*****
POS Exterior Orientation Computation Utility
Copyright (C) 1997-2010 by Applanix Corporation      [Dec 10 2010]
All rights reserved.
*****

Input Parameters]
IME UNITS=sec
BET FILE=G:\CALCULO\100727-C402-DMC20\100727-C402-DMC20\Mission 1\Proc\sbet_Mission 1.out
MS FILE=G:\CALCULO\100727-C402-DMC20\100727-C402-DMC20\Mission 1\Proc\sbet_Mission 1.out
VENT FILE=G:\CALCULO\100727-C402-DMC20\100727-C402-DMC20\Mission 1\Extract\event1_Mission 1.dat
VENT TIME SHIFT=0.000000
HOTOID FILE=
HOTOID EVENT OFFSET=0.000000
HOTOID TIME TOLERANCE=0.300000
APPING DATUM=WGS84
EMIMAJOR AXIS=6378137.000000
NV FLATTENING=298.000000
ROJECTION = TM
ORESIGHT=      -0.4400      -0.6000      9.5200
EVER ARM=      0.0000      0.0000      0.0000
TM Projection]
ENTRAL MERIDIAN=-3.000000
ATITUDE GO=0.000000
CALE FACTOR=0.000000
ALSE EASTING=500000.000000
ALSE NORTHING=0.000000
RID CORRECTION=NONE
DATA]
ID EVNT# TIME E N ORTHO O P K LAT LONG EH R P H SE SN SH SO SP SK SR SP SH
 2 219694.329545 319041.738 4381794.861 3194.148 -0.44623 0.87287 177.37008 39.56677520
 3 219701.989629 318368.088 4381814.619 3192.467 -0.41762 0.86513 177.65009 39.56681073
 4 219709.679716 317694.579 4381831.209 3197.267 -0.24860 1.14770 178.06059 39.56681722
 5 219717.444812 317021.013 4381850.197 3200.928 -0.42840 1.03575 177.13111 39.56684476
 6 219725.194892 316346.566 4381862.932 3194.270 -0.19408 0.73160 178.05399 39.56681528
 7 219732.874968 315672.730 4381882.199 3188.896 -0.60558 0.57056 176.99355 39.56684422
 8 219740.530046 315000.280 4381904.900 3194.684 -0.23983 0.87037 176.60150 39.56690385
 9 219748.250136 314326.693 4381916.342 3197.831 -0.13510 0.90008 178.07616 39.56686133
10 219755.975217 313652.095 4381931.257 3196.756 -0.43592 0.67587 178.58421 39.56684933
11 219763.645311 312978.757 4381952.185 3195.101 -0.57688 0.63217 178.01402 39.56689121
12 219771.310386 312305.139 4381973.595 3194.269 -0.09315 0.75577 176.11221 39.56693684
13 219778.995469 311631.264 4381986.859 3199.272 -0.36428 0.78098 178.45819 39.56690854
14 219852.176248 305568.277 4382146.816 3277.853 0.12896 0.52015 177.33136 39.56699580
15 219860.171335 304893.919 4382158.386 3272.944 -0.27561 0.34346 178.81283 39.56694685
16 219868.116423 304220.636 4382177.825 3272.123 -0.04372 0.54544 177.20601 39.56696845
17 219876.086511 303547.204 4382195.548 3273.754 -0.42348 0.63739 178.52678 39.56697404
18 219884.106597 302873.836 4382215.544 3275.747 -0.03626 0.79479 178.07102 39.56699959
19 219892.186674 302200.385 4382236.484 3280.247 0.16643 0.88427 178.00403 39.56703308

```

Figura 6.3.6.- Trayectoria procesada en formato texto.
Fuente: Elaboración propia.

Es necesario indicar que cuando se trata de un vuelo con cámara digital no es necesario realizar la orientación interna de las imágenes porque las coordenadas foto y las del instrumento coinciden.

En los siguientes cuadros se muestran los resultados de cálculo de las precisiones de las coordenadas de los centros de proyección:

PAS/FOTO	SX	SY	SZ	SO	SP	SK
90-2766	0.036	0.033	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2767	0.036	0.033	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2768	0.035	0.033	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2769	0.035	0.033	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2770	0.035	0.032	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2771	0.035	0.033	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2772	0.035	0.032	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2773	0.035	0.032	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2774	0.035	0.032	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2775	0.035	0.032	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2776	0.035	0.033	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2777	0.035	0.033	0.069	0.004	0.004	0.012
90-2778	0.035	0.033	0.069	0.004	0.004	0.012
94-2816	0.035	0.030	0.066	0.004	0.004	0.012
94-2817	0.035	0.030	0.065	0.004	0.004	0.012
94-2818	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.013
94-2819	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.013
94-2820	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.013
94-2821	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.013
94-2822	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.013
95-2729	0.035	0.035	0.067	0.004	0.004	0.011
95-2730	0.035	0.035	0.067	0.004	0.004	0.011
95-2731	0.035	0.035	0.067	0.004	0.004	0.011
95-2732	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.011
95-2733	0.035	0.035	0.067	0.004	0.004	0.011
95-2734	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.011
95-2735	0.035	0.035	0.067	0.004	0.004	0.011
95-2736	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.011
95-2737	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.011
95-2738	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.011
95-2739	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.011
95-2740	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.011
95-2741	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.011
95-2742	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.010
95-2743	0.035	0.035	0.068	0.004	0.004	0.010
95-2744	0.035	0.035	0.069	0.004	0.004	0.010
95-2745	0.036	0.035	0.068	0.004	0.004	0.010
95-2746	0.036	0.035	0.069	0.004	0.004	0.010
96-2823	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.013
96-2824	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.013
96-2825	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.014
96-2826	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.014
96-2827	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.014
96-2828	0.035	0.029	0.065	0.004	0.004	0.014
96-2829	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2830	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2831	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2832	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2833	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2834	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2835	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2836	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2837	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2838	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2839	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2840	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014
96-2841	0.035	0.029	0.064	0.004	0.004	0.014

Cuadro 6.3.1.- Primera página del cálculo de precisiones de las coordenadas de los centros de proyección.
Fuente: Elaboración propia.

	PAS/FOTO SX	SY	SZ	SO	SP	SK
104-3121	0.036	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3122	0.035	0.033	0.055	0.004	0.004	0.011
104-3123	0.036	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3124	0.035	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3125	0.035	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3126	0.035	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3127	0.035	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3128	0.036	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3129	0.036	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3130	0.036	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3131	0.036	0.033	0.056	0.004	0.004	0.011
104-3132	0.036	0.033	0.056	0.004	0.004	0.010
104-3133	0.035	0.033	0.056	0.004	0.004	0.010
104-3134	0.035	0.033	0.056	0.004	0.004	0.010
104-3135	0.035	0.033	0.056	0.003	0.004	0.010
104-3136	0.035	0.033	0.056	0.003	0.004	0.010
104-3137	0.035	0.033	0.055	0.003	0.004	0.010
104-3138	0.036	0.033	0.056	0.003	0.004	0.010
104-3139	0.035	0.033	0.055	0.003	0.004	0.010
107-3058	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3059	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3060	0.036	0.032	0.058	0.004	0.004	0.010
107-3061	0.036	0.032	0.058	0.004	0.004	0.010
107-3062	0.035	0.032	0.058	0.004	0.004	0.010
107-3063	0.036	0.032	0.058	0.004	0.004	0.010
107-3064	0.036	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3065	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3066	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3067	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3068	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3069	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3070	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3071	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3072	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3073	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3074	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3075	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3076	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3077	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3078	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3079	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3080	0.036	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3081	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3082	0.036	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3083	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3084	0.035	0.032	0.056	0.004	0.004	0.010
107-3085	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3086	0.036	0.033	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3087	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3088	0.036	0.033	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3089	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3090	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3091	0.035	0.032	0.056	0.004	0.004	0.010
107-3092	0.035	0.032	0.056	0.004	0.004	0.010
107-3093	0.035	0.032	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3094	0.035	0.033	0.057	0.004	0.004	0.010
107-3095	0.035	0.033	0.057	0.004	0.004	0.010

Cuadro 6.3.2.- Última página del cálculo de precisiones de las coordenadas de los centros de proyección.
Fuente: Elaboración propia.

6.3.6 Precisión de cálculo relativo

A continuación se muestra las precisiones obtenidas en el cálculo, interpretada como error medio cuadrático, para las coordenadas de los centros de proyección y la separación máxima existente entre la trayectoria directa e inversa, para los mismos fotocentros.

Precisiones	X (m)	Y (m)	Z (m)
RMSE	0.035	0.033	0.061
Separación trayectoria	0.150	0.100	0.150

Cuadro 6.3.3.- Errores medios cuadráticos de posición X,Y,Z.
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la precisión obtenida en los ángulos de orientación se puede decir que es independiente del proceso de cálculo GPS y que únicamente dependen de los errores propios de los acelerómetros y giróscopos montados en la unidad inercial.

En el siguiente cuadro se muestra las precisiones obtenidas en los ángulos de orientación:

Precisiones	ω	ϕ	k
RMSE (°)	0.004	0.004	0.011

Cuadro 6.3.4.- Errores medios cuadráticos para ángulos de orientación (omega, phi, kappa).
Fuente: Elaboración propia.

Para el control absoluto que viene a ser la comprobación de la calidad de los parámetros de orientación externa, se ha comprobado con puntos de control obtenidos de la aerotriangulación de fuente de mayor exactitud. Este punto se detallará más adelante en el apartado de análisis de la calidad posicional.

6.4 OBTENCIÓN DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN CON TECNOLOGÍA LIDAR

6.4.1 Introducción

En la fase del modelo digital de elevación, el fin fundamental es la obtención de modelo digital del terreno (MDT), se reproduce el relieve del terreno que presentan las zonas de interés dentro de unos márgenes de exactitud determinados.

En el presente apartado se describe desde la obtención de datos brutos (raw data) con vuelo LIDAR, hasta la obtención del modelo digital de superficie del terreno.

6.4.2 Descripción del vuelo LIDAR

El sensor utilizado para obtener los datos LIDAR ha sido el ALS50-SN073 de Leica, en un vuelo combinado con cámara digital para la toma de datos.

El ALS50 presenta los siguientes componentes que van instalados en el avión:

- Escáner: situado en la ventana del avión utilizada para cámara fotogramétrica
- Unidad de control: el operador regula desde ella todas las funciones del sistema.
- Ordenador de control
- Software de postproceso
- Sistema GPS
- Sistema inercial (IMU - *Inertial Measure Units*)



Figura 6.4.1- Componentes de sistema LIDAR ALS50.
Fuente: Adaptado de Stereocarto (2007).

El vuelo LIDAR se resume en lo siguiente:

Nombre del proyecto: comunidad autónoma de Extremadura

Nombre de la zona: Cáceres - Extremadura

Número de vuelos: 7

Fecha de los vuelos: 15, 22, 23,24, 25, 26 y 27 de julio 2010

Fecha de vuelo de la zona de estudio: 27 de julio 2010

Tamaño de los bloques: 2.000 * 2.000 m

Densidad: hasta 12 puntos/m²

Sistema de coordenadas: ETRS89

Geoide: Europeo

Precisión relativa: 0.19 m.

6.4.2.1 Parametrización del vuelo LIDAR

- **Altura de vuelo**

Por tratarse de un vuelo combinado la altura ha sido la misma que la aplicada con la cámara digital (2250 metros sobre el terreno), recubrimiento entre pasadas de 30% y ancho del barrido LIDAR de 69.6 m.

El ALS50-SN073 utilizado puede operar entre 200 m y 6.000 m sobre el terreno

- **Velocidad de vuelo**

Si la velocidad es mayor, el espaciado y disminución de la densidad de puntos será mayor.

Un incremento de la velocidad se puede compensar mediante sistemas con mayor frecuencia de pulsación y escaneo.

La velocidad crucero en el presente trabajo ha sido de 180 Kts/300 km/h.

- **Campo de visión transversal (FOV)**

Viene a ser la amplitud angular del campo de visión del escáner, en el estudio el ángulo de barrido promedio ha sido de 70°. A mayor campo de visión, mayor área. Admite trabajar a menores alturas.

- **Frecuencia del pulso láser**

Se refiere al número de pulsos láser emitidos por segundo. Una mayor frecuencia permite mayor velocidad de vuelo para un mismo espaciado y obtener mallas más densas. El ALS 50 permite una frecuencia de 83 kHz.

- **Frecuencia de escaneo**

Es la frecuencia con que el sistema realiza el barrido transversal. Si son mayores permiten menor espaciado longitudinal y mayor velocidad de vuelo. Esta frecuencia depende del FOV.

- **Espaciado de malla**

Depende de la frecuencia de pulsación y de escaneo entre líneas.

A continuación se indica otros datos técnicos del vuelo LIDAR

Configuración del Sensor	
Sensor empleado	ALS50
Número de serie	SN073
Altura de vuelo (m)	200 – 6.000
Frecuencia de pulsación (Hz) (pulsos/seg.)	Hasta 150.000
Precisión a priori (cm en altimetría)	Hasta 10
Número de retornos capturados	4
Campo de visión (FOV en °)	10 - 75
Captura de intensidades	una por pulso
Tecnología MPiA (Multiples Pulses in Air)	Sí
Densidad de puntos (puntos/m ²)	Hasta 12

Cuadro 6.4.1.- Parámetros del vuelo LIDAR_Configuración del escáner (1).
Fuente: Elaboración propia.

Resultados del escaneo	
Angulo de barrido completo, FOV (°)	70
Frecuencia de escaneo de cada línea (Hz)	43.23
Frecuencia del pulso láser (Hz)	38100
Máximo espaciamento transversal (en el nadir) (m)	4.84
Máximo espaciamento longitudinal (en los extremos) (m)	4.84
Densidad de puntos (promedio)(ptos/m ²)	0.47
Espaciamento entre puntos (m)	1.19
Área/puntos (promedio (m ² /pto)	8.47
Precisión estimada (1 sigma)	Nadir-FOV extremo
error transversal (m)	0.28 – 0.41
error longitudinal (m)	0.27 – 0.39
error altimétrico (m)	0.08 – 0.19

Cuadro 6.4.2.- Parámetros del vuelo LIDAR_escaneo resultado (2).
Fuente: Elaboración propia.

6.4.2.2 Productos capturados en vuelo

El sistema LIDAR captura la siguiente información para cada pulso

- Número de retorno
- Intensidad de la señal retornada
- Ángulo de barrido
- Tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso
- Posición del sensor (GPS/IMU)

6.4.2.3 Productos derivados del LIDAR

Los datos brutos capturados por el sensor son procesados en gabinete para la obtención de los productos finales, en el presente estudio el producto derivado es un modelo digital de superficie para ortofoto (MDSO), como resultado de la interpolación del MDT + líneas de ruptura, en formato de malla regular de 5 metros de resolución geométrica.

6.4.3 Prescripciones técnicas del modelo digital del terreno

Las condiciones que se aplican tanto para el MDT y MDSO han sido las establecidas en la metodología propuesta que se resumen en el siguiente cuadro:

Fase/parámetro	Especificaciones
Modelo digital del terreno	
Método	Técnicas LIDAR para la obtención de la malla. A partir de ficheros LAS ajustados, clasificados y editados.
Líneas de ruptura	Trazado manual por restitución estereoscópica en los casos en los que malla obtenida por técnicas LIDAR no definiera correctamente el terreno.
Paso de malla	5 m
Precisión	RMSZ menor o igual a 1 m.
Modelo digital de superficie para ortofoto	
Método	Por interpolación del MDT+líneas de ruptura.

Cuadro 6.4.3.- Especificaciones técnicas del MDT.
Fuente: Elaboración propia.

6.4.4 Cálculo de trayectoria GPS/IMU

Con la información registrada en el avión de:

- Raw láser, datos brutos procedentes del sensor en formato *.scn
- Datos inerciales (GPS/IMU), procedentes del sistema inercial

Y datos de las orbitas precisas y relojes de los satélites (efemérides) obtenidas del IGS se procede a calcular la trayectoria GPS, para lo cual se ha utilizado el software IPAS Pro de Leica Geosystems.

Los datos de efemérides se ha obtenido con el propio software IPAS Pro, que se descarga automáticamente, se introduce el día requerido (para el presente estudio, 27 de julio de 2010) y la institución más fiable (IGS), y en minutos se obtiene la descarga de los ficheros en formatos *sp3 y *clk (que contienen información de los datos orbitales observados y parámetros del reloj).

GPS Measurements

GPS File: ...

GPS Time Start: 217841 Week: 1594 DoW: 2 Stop: 230388 Week: 1594 DoW: 2

Ephemerides

Precise Orbit: ...

GPS Time Start: 172800 Week: 1594 DoW: 2 Stop: 258300 Week: 1594 DoW: 2

Precise Clock: ...

GPS Time Start: 172800 Week: 1594 DoW: 2 Stop: 258900 Week: 1594 DoW: 2

Download Data

Service: ...

Service Name: International GNSS Service

FTP: igsb.jpl.nasa.gov

Download To: ...

Download	Data File	Week #	Description
<input checked="" type="checkbox"/>	igs15942.sp3.Z	1594	Final orbit
<input type="checkbox"/>	igs15942.clk_30s.Z	1594	Final clock (30s)
<input checked="" type="checkbox"/>	igs15942.clk.Z	1594	Final clock
<input type="checkbox"/>	igr15942.sp3.Z	1594	Rapid orbit
<input type="checkbox"/>	igr15942.clk.Z	1594	Rapid clock

Figura 6.4.2.- Obtención automática efemérides con software IPAS Pro de Leica.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez extraídos los datos del sistema inercial y convertido a formato legible por el software de cálculo, se analiza la trayectoria del GPS obtenida, teniendo en cuenta:

- Precisión en coordenadas XYZ de cada uno de los puntos de la trayectoria.

Es necesario indicar que en este proceso de cálculo no se utiliza estaciones de referencia terrestre porque está considerado hacerlo de esta manera (por razones de escasa densificación de redes GNSS en los países de América del Sur donde se pretende aplicar la metodología propuesta).

El cálculo de la trayectoria GPS concluye con un suavizado de la misma a partir de los datos procedentes de la IMU, que convertirán el cálculo GPS en un cálculo más preciso y riguroso.

Del proceso de cálculo GPS/IMU se obtiene un fichero solución (*.sol) el cual contiene toda la información correspondiente a la trayectoria.

La precisión obtenida después del postproceso de la trayectoria ha sido la siguiente:

Precisiones	X (m)	Y(m)	Z(m)
RMSE	0.061	0.041	0.110

Cuadro 6.4.4.- Precisiones en planimetría y altimetría de la trayectoria LIDAR.

Fuente: Elaboración propia.

```

12:39:44.091 IPAS Processor Version: 1.30 Build: 0009
12:39:58.419 12:39 AM Tuesday April 05 2011
12:39:58.919
12:39:58.919 Project: Y:\PROCESAMIENTO_LIDAR\P101100207_PNOA-EXTREMADURA\PNOA-
12:39:58.919 IMU: uIRS
12:39:58.919 IMU File: Y:\PROCESAMIENTO_LIDAR\P101100207_PNOA-EXTREMADURA\PNOA-
12:39:58.919 GNSS File: Y:\PROCESAMIENTO_LIDAR\P101100207_PNOA-EXTREMADURA\PNOA-
12:39:58.919 InuToRef Lever-Arm X: -0.411 Y: 0.206 Z: -0.192 m
12:39:58.919 GNSS-Ref Lever-Arm X: 0.383 Y: -0.289 Z: -1.078 m
12:39:59.544 217841.00216: Started Forward processing
12:39:59.544 217842.00217: Yaw initialized with GNSS trajectory heading
12:39:59.544 217842.00217: Position initialized with GNSS solution @ 217842.0000
12:39:59.544 217842.00217: Velocity initialized with GNSS solution @ 217842.0000
12:41:29.653 230386.99866: Started Backward processing
12:43:08.778 217841.00216: Started Optimal Smoothing
12:46:31.138 Solution saved between GPS time 217841.00216 and 230386.99866
12:46:31.684 Mean Value of Estimated Sensor Errors:
12:46:31.684 Accl bias: X = -0.001 Y = 0.002 Z = -0.002 micro-g
12:46:31.684 Accl scale factor: X = -184.346 Y = 76.837 Z = -145.424 ppm
12:46:31.684 Gyro bias: X = 0.008 Y = 0.017 Z = -0.035 deg/h
12:46:31.684 Gyro scale factor: X = -0.205 Y = 0.161 Z = -0.103 ppm
12:46:31.684
12:46:31.684 Statistics of Position Residuals:
12:46:31.684 Max Min Mean RMS
12:46:31.684 Lat.Dif.: 0.030 -0.033 0.000 0.005 m
12:46:31.684 Lon.Dif.: 0.016 -0.021 0.000 0.003 m
12:46:31.684 H. Dif.: 0.047 -0.056 -0.000 0.013 m
12:46:31.684
12:46:31.684 Statistics of GNSS Position Standard Deviation:
12:46:31.684 Max Min Mean RMS
12:46:31.684 Lat.Std.: 0.111 0.044 0.060 0.061 m
12:46:31.684 Lon.Std.: 0.071 0.027 0.041 0.041 m
12:46:31.684 H. Std.: 0.239 0.068 0.109 0.110 m
12:46:31.684
12:46:31.684 Original GNSS lever-arm: X 0.383 Y -0.289 Z -1.078 m
12:46:31.684 Estimated GNSS lever-arm: X 0.510 Y -0.403 Z -1.276 m
12:46:31.684 Done

```

Figura 6.4.3.- Fichero solución de postproceso de la trayectoria por PPP.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.5 Postproceso de datos LIDAR

- El software utilizado para postproceso ha sido Terra-Solid, que se compone de Terra-Scan y Terra-Model. Todo este conjunto trabaja bajo Microstation.
- El inicio de proceso de los datos brutos del sensor procedentes de vuelo, se realiza a partir del software ALS PPS de Leica Geosystems.
 - Los ficheros que forman parte del cálculo son:

- Configuración del ajuste del sensor, este fichero proviene de la calibración previa al inicio del proyecto. El fichero contiene toda la información referente a los giros (roll, pitch, heading), constante de torsión, corrección de rango, compensación en altura, ángulo de corrección del escáner y parámetros de temperatura y presión.
 - Fichero solución procedente del cálculo GPS/INS (*.sol).
 - Rawlaser, datos brutos procedentes del sensor. Formados por ficheros *.scn (scanning), almacenados de forma secuencial y almacenados de forma organizada por carpetas. Cada una de estas carpetas contienen todos los ficheros correspondientes a cada línea de vuelo escaneada.
- Para procesar los datos brutos a partir de la solución obtenida de la trayectoria, se define previamente el sistema de proyección sobre el que se quiere obtener los datos proyectados.
 - Del procesado de datos, se obtienen ficheros binarios en formato láser airborne scanner (*.LAS), los cuales contienen la información referente a coordenadas planimétricas y altimétricas, intensidad, número e información de retorno, ángulo de escaneo y marca de tiempo de cada uno de los puntos.
 - Para comenzar a trabajar con datos LIDAR, se utilizan los LAS brutos. Es conveniente eliminar las zonas de borde de la pasada para evitar errores en los solapes, puesto que la precisión en los bordes es inferior que las zonas centrales, esto se consigue disminuyendo el FOV a 30°.

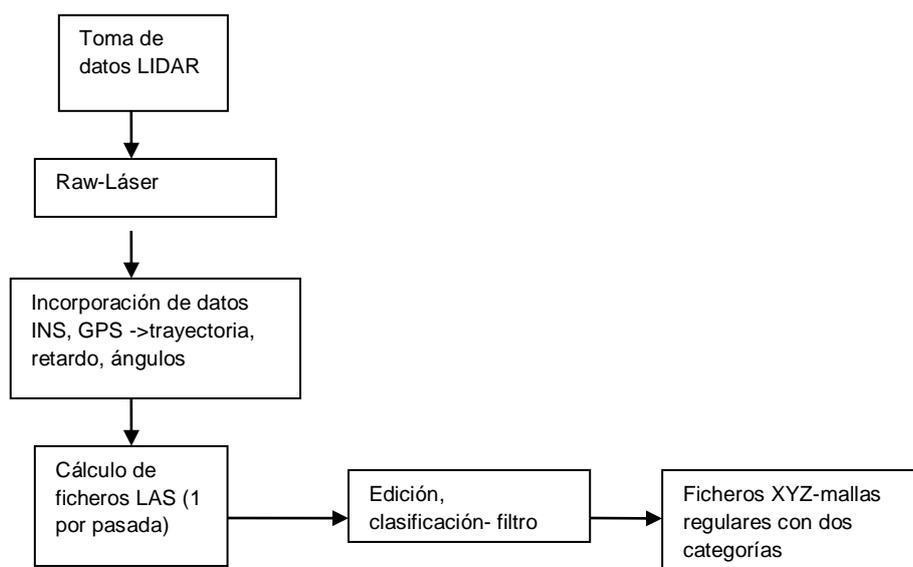


Figura 6.4.4.- Esquema de obtención de datos LIDAR.
Fuente: Adaptado de Santos (2009).

6.4.5.1 Parámetros de calibración para postproceso de datos LIDAR

En el sensor LIDAR, se hacen necesarias calibraciones frecuentes, con el fin de corregir la desalineación entre el sensor y el sistema inercial.

Los parámetros que se calculan en una calibración LIDAR son los siguientes:

- Rotación alrededor del eje X (roll)
- Rotación alrededor del eje Y (pitch)
- Rotación alrededor del eje Z (heading)
- Constante de torsión
- Corrección del rango
- Compensación de elevación

La **calibración** se inicia con elección de la zona, en el estudio la zona ha sido El Robledo situado en el municipio de Ciudad Real, Castilla- La Mancha.

La **planificación**, se ha realizado con el software Flight Planning and Evaluation (FPES) de Leica.

Ejecución del vuelo, una vez realizado el vuelo y analizado los datos se ha calculado la trayectoria GPS/INS con el software IPAS Pro de Leica.

Después se efectuado el postproceso de calibración estándar con el software ALS Post Processor de Leica Geosystems, el cual se calcula comparando los datos del vuelo con puntos de control.

El siguiente paso es obtener los parámetros de la calibración. Éste cálculo se ha realizado con el software ATTUNE de Leica Geosystems. A partir de los ficheros *atn*.LAS*, obtenidos durante el postproceso, se generan imágenes de intensidad con las que se procede a la medida de puntos de paso comunes en al menos dos imágenes, con el fin de determinar las máximas discrepancias entre imágenes y así mismo determinar con mayor exactitud los parámetros de calibración.

La calidad de la medida determina la exactitud en el cálculo de los parámetros.

A continuación se muestra el fichero con la información de los parámetros de calibración aplicados para calcular los ficheros **.LAS*.

Altitude:	200.00 m	Roll Error	-0.002744300 rad
Temperature:	300.00 K	Pitch Error	0.004996250 rad
Pressure:	101.00 kPa	Heading Error	0.000871750 rad
Temperature Gradient:	-0.006500 K/m	Minimum Range to Process	0.000 m
Range 1 Correction	3.650 / 3.650 m	Maximum Range to Process	15000.000 m
Range 2 Correction	3.701 / 3.651 m	Min Angle To Process:	-50.000 deg
Range 3 Correction	3.691 / 3.648 m	Max Angle To Process:	50.000 deg
Range 4 Correction	3.657 / 3.684 m	Min Lat/Y to output:	N/A
Range 5 Correction	0.000 m	Max Lat/Y to output:	N/A
Scan angle correct	17000 ticks	Min Long/X to Output	N/A
Torsion Constant:	-200000.00 units	Max Long/X to output:	N/A
Encoder Latency:	0.00 mcr sec	Min elevation to output	-99999.000 m
Ticks Per Revolution:	8388608 ticks	Max elevation to output	99999.000 m

Figura 6.4.5.- Parámetros de calibración aplicados al postproceso para calcular los ficheros *.LAS.
Fuente: Elaboración propia.

Las precisiones obtenidas en los ángulos de orientación después del postproceso son las siguientes:

Precisiones	ω	ϕ	K
RMSE (°)	-0.002	0.004	0.0008

Cuadro 6.4.5.- Precisiones absolutas de los ángulos de orientación del LIDAR.
Fuente: Elaboración propia.

```

05.04.2011 12:00:59 Imu Type: uIRS 200Hz
05.04.2011 12:00:59
05.04.2011 12:00:59
05.04.2011 12:00:59 Lever Arms
05.04.2011 12:00:59 -----
05.04.2011 12:00:59 IMU Lever Arms (Meters)
05.04.2011 12:00:59 x: -0.411 y: 0.206 z: -0.192
05.04.2011 12:00:59 IMU boresight (Degrees)
05.04.2011 12:00:59 Omega: 0.00000000 Phi: 0.00000000 Kappa: 0.00000000
05.04.2011 12:00:59 GPS Antenna Lever Arms (Meters)
05.04.2011 12:00:59 x: 0.550 y: -0.520 z: -1.250
05.04.2011 12:00:59 Aircraft to Reference Rotation (Degrees)
05.04.2011 12:00:59 Omega: 0.00000000 Phi: 0.00000000 Kappa: 0.00000000
05.04.2011 12:00:59
05.04.2011 12:05:51 Successfully read complete file!
05.04.2011 12:05:52
05.04.2011 12:05:52 Version Statistics
05.04.2011 12:05:52 -----
05.04.2011 12:05:52 Product Name: IPAS Model: 10 SN: 1088 Version: 2.1301
05.04.2011 12:05:52 OS Version: WINXP IMU Type: 3 IMU SN:
05.04.2011 12:05:52 Primary GPS Type: 1 Model: L1L2 Firmware Version: 2.312 SN: SVG064
05.04.2011 12:05:52 Secondary GPS Type: 0 Model: Firmware Version: SN:
05.04.2011 12:05:52 Total Hours Used: 223.6 Number of Runs: 532 Current Run: 3.5
05.04.2011 12:05:52
05.04.2011 12:05:52 Finished Extraction. Extracted the following files:
05.04.2011 12:05:52 20100727_123024.gps (46822648 bytes)
05.04.2011 12:05:52 20100727_123024.imu (80302577 bytes)
05.04.2011 12:05:52 20100727_123024.tm (40151200 bytes)
05.04.2011 12:05:52 20100727_123024.RTG (1505760 bytes)
05.04.2011 12:05:52 20100727_123024.RNV (461738432 bytes)
05.04.2011 12:05:52
05.04.2011 12:05:52 Checking files: IMU File - Y:/PROCESAMIENTO_LIDAR/P101100207_PNOA-EX1
05.04.2011 12:05:52 -----
05.04.2011 12:05:52 Start time: 217840.9 End time: 230388.3 Duration: 12547.4 s
05.04.2011 12:05:52 Number of IMU observations: 2509455
05.04.2011 12:05:52 Observation frequency: 200 Hz
05.04.2011 12:06:10 No gaps found.
05.04.2011 12:06:10
05.04.2011 12:06:10 Checking files: Gps File - Y:/PROCESAMIENTO_LIDAR/P101100207_PNOA-EX1
05.04.2011 12:06:10 -----
05.04.2011 12:06:10 Start time: 217841.0 End time: 230388.0
05.04.2011 12:06:10 Number of GNSS solution records: 12547
05.04.2011 12:06:10 Solution frequency: 1 Hz
05.04.2011 12:06:16 No gaps found.
05.04.2011 12:06:16 Done

```

Figura 6.4.6.- Fichero final del postproceso para cada pasada (raw láser).
Fuente: Elaboración propia.

6.4.6 Cálculo de corrección de altura y ajuste de las pasadas

Para realizar el cálculo y ajuste entre pasadas se ha utilizado el software Terramach que trabaja con Microstation.

Terramach es una aplicación sofisticada para la corrección de los datos LIDAR por comparación de sobreposición de una pasada con otra y corrección de los parámetros de orientación.

En el estudio la altura inicial entre pasadas (obtenida con Terramach para el 27-07-2010) ha sido de 0.19 m., encontrándose en el rango aceptable, por lo tanto no se realiza el ajuste entre ellas.

```
Used loaded tie lines
Trajectories: X:\OT_LIDAR\PPP_Made_27072010\PPP_Made_27072010\
solution for whole data set
Combined solution for all scanners

starting average misma 0.19660
```

Figura 6.4.7.- Altura inicial entre pasadas LIDAR.
Fuente: Elaboración propia.

En caso de presentarse un error en altimetría por fallo de la calibración entre pasadas contiguas producidas en el vuelo, se comprueba que el error no se debe a otra causa en el proceso, etc. Para solucionar el problema de la diferencia de alturas se puede aplicar (previa consulta a un responsable) el siguiente proceso de corrección:

- Se cargan en Terramach todas las pasadas procesadas correspondientes (del día que interesa o el total de las pasadas) seguidamente se inicia el proceso de corrección, que básicamente se efectúa en dos partes:
 1. Corrección aplicada: roll + pitch + heading + scale mirror (valores únicos).
 - Único valor calculado teniendo en cuenta todas las pasadas comprendidas en el límite de la zona de estudio.
 - El Terramatch calcula un *sift* (depuración de los datos) de roll, pitch y heading para mejorar el ajuste entre pasadas (de acuerdo a una serie de observaciones).
 - Una vez que las calcula el Terramatch, se aplican sobre los LAS.
 2. Corrección Aplicada: roll + pitch+ heading + Z (valores por pasada)

Esta corrección se ejecuta después de la anterior.

- Se obtienen nuevos valores de roll, pitch, heading y otro de Z para cada pasada (comprendida dentro de un límite de estudio).
- Esta corrección resulta ser menos acusada, ya que el error queda minimizado al aplicar la primera corrección.

6.4.7 Transformación al sistema de coordenadas local

En la zona de estudio (Cáceres – Extremadura), los parámetros utilizados para la transformación de ETRS89 alturas elipsoidales a ETRS89 alturas ortométricas ha sido a través de una ondulación del geoide, obtenida a partir de la creación de una rejilla homogénea facilitada por el Instituto Geográfico Nacional Español.

6.4.8 Clasificación de datos LIDAR

6.4.8.1 División de los datos LIDAR en hojas de trabajo

Mediante el sistema LIDAR se puede registrar una gran cantidad de información del terreno. La nube de puntos LIDAR ha sido dividida en hojas cuadradas de 2 km, para poder ser tratada y analizada y asegurar una mejor forma de trabajo.

La nomenclatura adoptada para las hojas presenta la forma XXXYYYY, donde:

- XXX, coordenada X, en kilómetros enteros de la malla UTM, esquina inferior izquierda.
- YYYY, coordenada Y, en Kilómetros enteros de la malla UTM, esquina inferior izquierda.

6.4.8.2 Clasificación automática de los datos LIDAR

Los datos LIDAR son clasificados inicialmente mediante algoritmos matemáticos automatizados que permiten tener una primera categorización de los puntos de la nube LIDAR. Los parámetros de configuración de estos algoritmos son establecidos en función de las características de la zona de trabajo para obtener unos resultados óptimos. Los parámetros se han optimizado en función de las características de la zona de estudio para obtener el máximo rendimiento en la determinación de la clase a la que pertenece cada uno de los puntos de la nube LIDAR.

Código LAS	Descriptor	Descripción
1	<i>Default (por defecto)</i>	Es la categoría que se le asocia a los puntos de la nube por defecto. Una vez clasificada la nube, a esta categoría se asocian los puntos que siendo útiles para la generación de diversos tipos de modelos no pertenecen ni a la clase terreno, edificación o cualquier otra definida y que sea de utilidad.
2	<i>Ground (Terreno)</i>	Se identifican con esta categoría los puntos que definen el terreno desnudo, es decir, sin la presencia de vegetación, estructuras, etc.
7	<i>Low points</i>	Se identifica con esta categoría a los puntos que proceden de falsos ecos capturados por el sensor y que por tanto no tienen utilidad. Esta categoría es descartada para la obtención de los modelos digitales ya que al no corresponder con ningún tipo de elemento real introducirían errores en los modelos.
12	<i>Solape</i>	Se marcan con esta categoría los puntos que estando en los bordes laterales de la pasada son descartados por existir puntos de otra pasada que cubren la misma zona y presentan mayor calidad posicional al estar más cerca del centro de la pasada a la que pertenecen.
251	<i>Agua</i>	Se introducen en esta clase los retornos producidos en láminas de agua debidos al oleaje, rizo de la superficie, etc.
32	<i>Puentes</i>	En esta categoría se incluye los puentes que inicialmente estaban contenidos en la clase terreno.

Cuadro 6.4.6.- Clasificación inicial para la nube de puntos LIDAR.
Fuente: Adaptado de Stereocarto (2007)

6.4.8.3 Revisión y edición de la clasificación automática

La clasificación inicial es revisada por operadores expertos que la refinan para asegurar que sea correcta.

Se realiza una clasificación automática de los ficheros LAS ajustados en los que se distingue:

- Suelo (terreno más puentes)
- Vegetación
- Solape
- Edificaciones

Esta revisión se realiza mediante:

- **Control directo de la nube de puntos**

El control directo se realiza usando vistas en planta, perspectiva y perfiles de la misma e información gráfica adicional de forma simultánea (imágenes aéreas, ortofotografías, etc. disponibles de forma local o a través de internet).

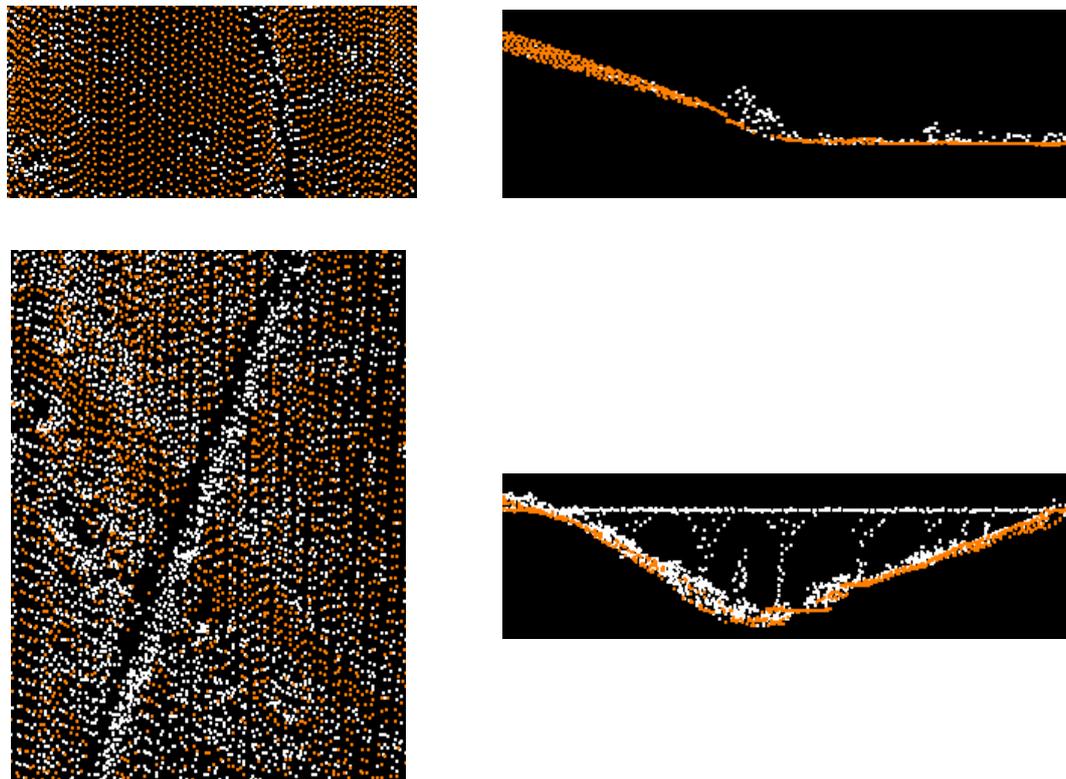


Figura 6.4.8.- Vista en planta y perfil de la nube de puntos LIDAR.
Fuente: Elaboración propia.

- **Revisión de mapas de sombras**

Este tipo de revisión se utiliza para identificar zonas conflictivas que necesitan de una revisión más exhaustiva para la depuración del modelo. Estas zonas se caracterizan en los mapas de sombras por presentar triángulos muy marcados en zonas que no corresponden que crean áreas de sombras artificiales y rompen la continuidad natural que tiene el sombreado del modelo.

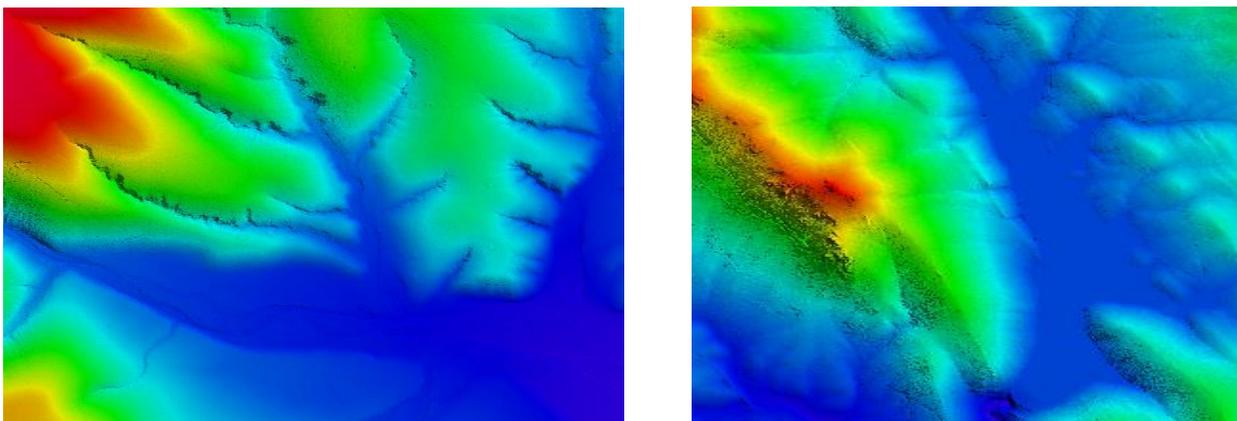


Figura 6.4.9.- Control calidad del modelo digital del terreno.
Fuente: Elaboración propia.

- **Control mediante visión estereoscópica**

Se revisa la nube de puntos en tres dimensiones sobre los modelos estereoscópicos procedentes del vuelo fotogramétrico. De esta forma se puede identificar si los puntos seleccionados como terreno, edificaciones, etc. se corresponden realmente con los tipos que tienen asociados.

6.4.8.4 Restitución de algunos elementos de interés e integración con datos LIDAR (captura 3D)

Mediante la restitución se obtienen los elementos característicos de la superficie, tanto naturales como artificiales, que debido a sus características no han quedado definidos de una forma totalmente adecuada mediante la nube de puntos capturada por el sensor LIDAR.

Es necesario indicar que se trata de una restitución para la mejora de la caracterización del terreno, no de un trabajo de restitución cartográfica como lo sería, por ejemplo, un trabajo para cartografía catastral. Esto quiere decir que no se ha realizado la restitución de todos los elementos presentes en las imágenes sino tan solo aquellos que dadas sus características se consideran de interés para mejorar la definición del modelo.

6.4.8.4.1 Elementos a restituir y condiciones de la restitución

- La codificación empleada en la restitución permite una correcta discriminación de elementos y la posibilidad de selección de las líneas necesarias para la elaboración del MDT.
- La restitución se realiza introduciendo el número de vértices necesarios en los elementos para que estos registren la forma del terreno o la estructura que representen de forma correcta, adaptándose a los cambios de pendiente que se presenten.
- El procedimiento utilizado es el de anáglifos. Se crean unos ficheros gráficos que posteriormente se exporta a cualquier formato gráfico, en este caso *.dgn de Microstation.

A continuación se presentan los elementos restituidos y la forma en que se realiza la misma para su posterior integración con los datos LIDAR.

ELEMENTO	CONDICIONES DE LA RESTITUCIÓN
Puentes	<ul style="list-style-type: none"> • Se realiza la restitución del tablero del puente como un elemento cerrado. • La restitución se realiza a la cota del tablero, no sobre las barandas o muros laterales del mismo. • Restituir su entorno hasta que la plataforma del mismo, y el terreno formen parte del mismo plano y un trozo del elemento (vial, línea de ruptura o muro de contención) que defina el plano que se extiende a partir de que finalice la plataforma del puente. • Si existe algún elemento que pase por debajo, además del curso de agua, también se capturará, para que la representación del MDT - MDS sea fiel a la realidad. • No se incluyen dentro de esta categoría los pasos y conducciones que se realizan en los viarios para permitir la evacuación de agua en las zonas con taludes.
Ríos	<ul style="list-style-type: none"> • Se realiza la restitución de ambos márgenes del río siguiendo la orilla del mismo. • Se podrán dejar de capturar aquellos ríos que lleguen a una zona llana, y discurren en el mismo plano que su entorno, siempre que pierdan el cauce. Estos ríos se cortan aquí, y se dejan abiertos. • Los ríos de doble margen que se conviertan en ríos de un solo margen, se podrán cortar también, dejando los dos márgenes unidos y capturando un trozo de unos 5 metros
Arroyos (con agua)	<ul style="list-style-type: none"> • Se trazan como una única línea los arroyos con un ancho inferior a 1.5 metros. • En las zonas del arroyo que presenten un ancho igual o superior a 1.5 metros se restituyen ambos márgenes del mismo.
Embalses	<ul style="list-style-type: none"> • Se traza el límite de la lámina de agua asegurando la cota constante de la misma.
Láminas de agua (lagunas, charcas, balsas, ...)	<ul style="list-style-type: none"> • Se traza el límite de la lámina de agua asegurando la cota constante de la misma. • En el caso de las balsas se traza la línea de la lámina de agua y además mediante líneas de ruptura genéricas o líneas de muro (según corresponda) el borde de la balsa si no son coincidentes. • Sí la balsa está vacía se introducirá una línea de ruptura genérica para marcar el fondo de la misma y definir el cambio de pendiente de las paredes de la misma

Cuadro 6.4.7.- Condiciones particulares de la restitución.
Fuente: Adaptado de Stereocarto (2007).

6.4.8.4.2 Incorporación de datos de restitución y datos LIDAR

Antes de realizar la integración de la restitución se realiza una selección de las líneas restituidas para tener en cuenta aquellas que son necesarias y descartar aquellas que no aporten información adicional al modelo.

Una vez seleccionadas las líneas a utilizar se realiza la integración de las mismas mediante herramientas de software. La información obtenida mediante la restitución

pasa a formar parte del conjunto de datos a partir del cual se derivan los modelos finales.

Realizada la selección e integración de los elementos restituidos con los datos LIDAR se lleva a cabo una revisión sobre la información obtenida. La revisión tiene como objetivo el depurar la edición de datos en los entornos de las líneas de ruptura para evitar deformaciones al modelo.

6.4.9 Generación del modelo digital de superficie para ortofoto (MDSO)

La malla regular de puntos 5 x 5 metros se ha obtenido mediante técnicas LIDAR, se ha utilizado el software Terrasolid (TerraScan y TerraModel).

Las coordenadas (X,Y y Z) de la nube de puntos en el correspondiente sistema de referencia son obtenidas a partir del cálculo realizado con los datos del postprocesamiento GPS, INS y las medidas de distancias láser.

Para realizar el MDT, se clasifica toda la nube de puntos, los puntos del terreno en la capa *terreno* a través de diferentes filtrados, siendo el resto de puntos no incluidos en esta capa y asignados en otras distintas dependiendo de sus características.

Se genera la superficie terreno a partir de los puntos terreno, definiendo el paso de malla en 5 metros. Esta superficie generada (con edición de aquellos puntos no clasificados correctamente), da lugar al MDT.

Para calcular el modelo digital de superficie (MDS), se realiza una clasificación a partir de los distintos ecos que presenta el láser filtrando los ecos intermedio y último, quedándonos con todo lo registrado por el primer eco, posteriormente se aplica un filtrado a toda la información para eliminar el posible ruido generando así el modelo digital de superficie y exportando la información con el paso de malla de 5 metros. Por tanto, el MDS calculado contiene información de las alturas de las edificaciones, vegetación, terreno, puentes y otros rasgos.

Finalmente se genera el MDSO a partir del MDT que incorpora las líneas de ruptura de los elementos artificiales del terreno, como puentes y viaductos.

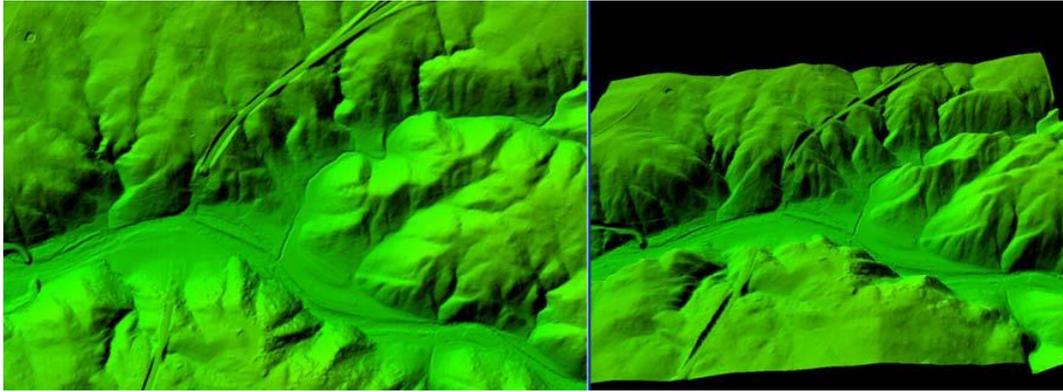


Figura 6.4.10.- Modelo digital de superficie para ortofoto (1) (superficie sin líneas de ruptura).
Fuente: Elaboración propia.

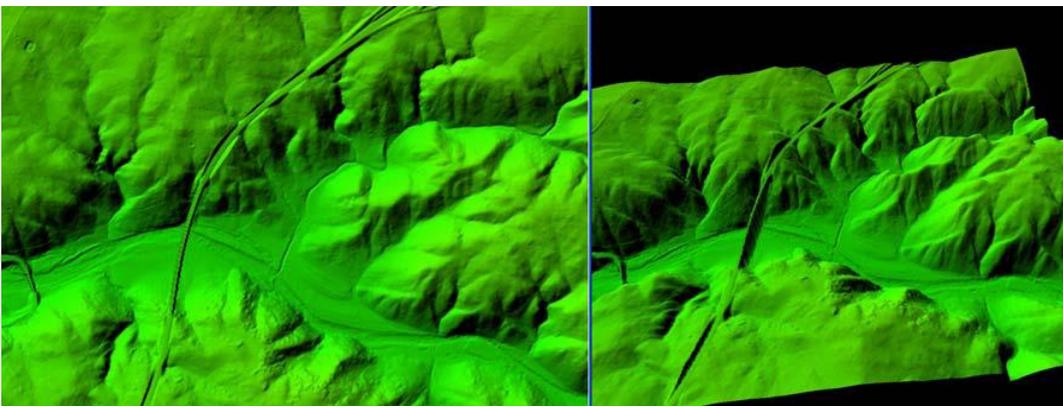


Figura 6.4.11.- Modelo digital de superficie para ortofoto (2) (superficie con líneas de ruptura - puente).
Fuente: Elaboración propia.

6.4.9.1 Filtración del modelo

Una vez obtenido el MDSO, que se encuentra en formato .asc, se cambia a formato *.dtm mediante el software Scop++ con la finalidad de realizar un control para depurar algún posible error grosero y tener una malla regular (el fichero *.dtm es el formato que mejor receptiona el software Orthomaster para realizar la ortorectificación por la rapidez y menor espacio que ocupa).

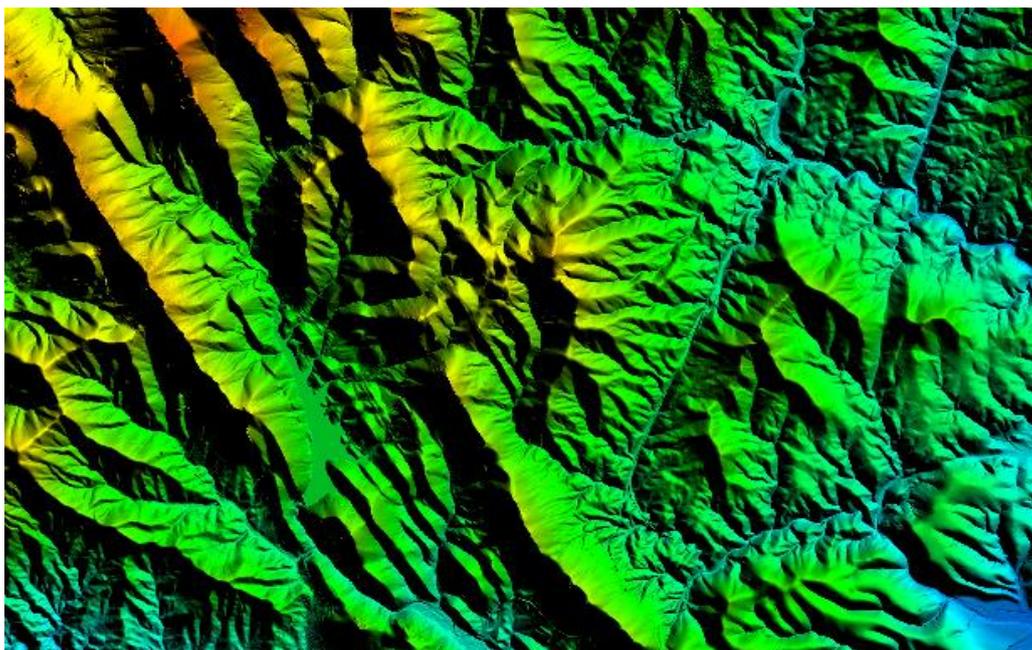


Figura 6.4.12.- Modelo digital de superficie para ortofoto (3)(área total zona de estudio).
Fuente: Elaboración propia.

6.4.10 Control de calidad de los datos LIDAR

En los controles de calidad de los datos LIDAR se han seguido los siguientes pasos:

6.4.10.1 Control en GPS

Este control se realiza después de la extracción de datos, se ha generado un fichero extractLog.txt en el cual se comprueba:

- Tiempo de inicial y final de la trayectoria
- Número de registros
- Solución de frecuencias
- Estado de los datos

No se ha encontrado ningún problema en el tratamiento GPS.

6.4.10.2 Datos láser

Se realiza la comprobación de los datos láser, si cubren toda la zona de estudio o si presentan áreas sin datos, encontrándose bien.

6.4.10.3 Resolución espacial

La comprobación de la densidad promedio del LIDAR (número de puntos por metro cuadrado) del primer retorno se realiza en tramos de 2 km., dividida en mallas de 4 m. * 4m., en el estudio la resolución espacial ha sido de 0.47 puntos/m² por pasada.

6.4.10.4 Control relativo

En el control relativo, se revisa la corrección de altura de las pasadas contiguas para mantener +/- 0.20 m de diferencia máxima entre pasadas, la precisión obtenida en el caso ha sido de 0.19 m en altura.

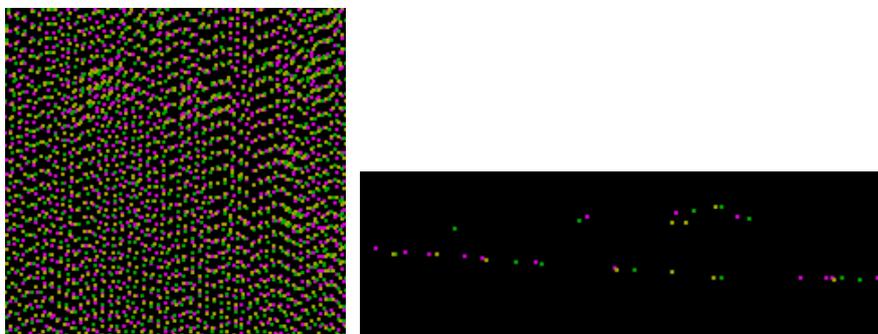


Figura 6.4.13.- Vista en planta y perfil entre pasadas contiguas.
Fuente: Elaboración propia.

El control absoluto del modelo digital de elevación viene a ser la comprobación de la precisión en la medida de los puntos LIDAR. La precisión puede verse influenciada por varios factores desde la orientación del sensor hasta la medida del escaneo.

La precisión de los MDE es la diferencia entre la superficie matemática calculada por el LIDAR y la superficie real del terreno. Se define mediante el error medio cuadrático (RMSE) al comparar las diferencias entre la altura interpolada y la altura verdadera del terreno en un número finito de puntos del modelo digital en ella influye desde la densidad de puntos hasta la precisión en la medida de cada punto. (Santos, 2009).

Para el chequeo absoluto se ha comprobado las alturas con puntos obtenidos de un modelo digital del terreno de mayor exactitud. Se detalla más adelante este punto en el apartado de análisis de la precisión posicional.

6.5 EJECUCIÓN DE ORTOFOTOS DIGITALES

6.5.1 Introducción

La finalidad del estudio es la elaboración de ortoimágenes digitales en color natural (RGB) y color infrarrojo (CIR) con un tamaño pixel de 0.25 m, de una zona rural de Cáceres – Extremadura. Estas ortoimágenes se han realizado a partir de un vuelo de 0.225 m. de tamaño de pixel.

Una vez que se dispone de los fotogramas digitales, los parámetros de orientación exterior obtenidos por orientación directa y el modelo digital de superficie para ortofoto (MDSO) a partir de LIDAR, consistente en una malla de puntos, se ha generado las ortofotos.

6.5.2 Prescripciones técnicas

Las especificaciones técnicas que se aplican en la obtención de las ortofotos digitales han sido establecidas en la metodología propuesta, y se resumen en el siguiente cuadro:

Fase o parámetro	Especificaciones
Método	Generado a partir del MDSO (MDT+líneas de ruptura), interpolación bicúbica, ortorectificación de 4 bandas o color natural y color infrarrojo.
Tamaño de pixel terreno	GSD 0.25 m
Profundidad de color	Ortofotos RGB y CIR: 8 bits por banda
Equilibrado radiométrico	- Unidad para el equilibrado: zona de trabajo. - Se deberá garantizar continuidad cromática entre todas las hojas de la zona de trabajo - Si se aplica <i>dodging</i> , debe ser lo más suave posible para no aplanar la calidad radiométrica de la imagen.
Mosaico	- Se ortoprojectarán todas las fotos, para utilizar sólo la parte más central de cada una. - Se recomienda el trazado automático de la línea de mosaico mediante el algoritmo de <i>mínimos cambios radiométricos</i> .
Corte de imágenes	Según corte de hojas 5.000
Coordenadas de la esquina superior izquierda	El centro del pixel superior izquierdo de cada hoja tendrá coordenadas UTM (ETRS89) exactas, múltiplo del tamaño de pixel.
Sistema geodésico de referencia	Las ortofotos serán generadas en ETRS89.
Formato de salida de los ficheros	- TIFF 6 base sin compresión, sin cabecero GeoTIFF. - Fichero TFW de geo-referenciación en ETRS89. - Las coordenadas del TFW serán siempre las del centro del pixel superior izquierdo.

Cuadro 6.5.1.- Parámetros técnicos establecidos en la fase de ortorectificación.
Fuente: Elaboración propia.

El trabajo de generación de ortofotos digitales se puede dividir en las siguientes fases:

- Rectificación diferencial
- Tratamiento de la imagen
- Mosaicos fotográficos y corte de hojas
- Producto final.

6.5.3 Rectificación diferencial. Ortofotografía del fotograma

Para cada uno de los fotogramas orientados pertenecientes al área de estudio de la que se pretende obtener la ortoimagen se establece su ortoárea, es decir, el área efectiva sobre el que se aplicará el procedimiento de ortorectificación. Este ortoárea es la resultante de descartar para cada fotograma un porcentaje del mismo de los extremos, es decir, el ortoárea corresponde con la zona central del fotograma siendo

por tanto la de perspectiva más nadiral y con menor abatimiento de los elementos. La parte de fotograma que se descarta en cada caso depende de los solapes con los que se haya ejecutado el vuelo. A mayores valores de solape se descarta un mayor porcentaje de fotograma. Se realiza este descarte de la imagen para evitar las zonas extremas, ya que es en estas donde se producen las mayores distorsiones de la imagen y mayor abatimiento de los objetos situados sobre el terreno. A pesar del descarte una parte de fotograma siempre se mantiene suficiente área de solape entre ortoáreas contiguas para poder trazar la línea de mosaico de forma que sea lo más disimulada posible.

El programa de rectificación diferencial utilizado asigna un valor dentro de la escala de niveles digitales de cada canal a cada pixel (punto imagen) de la ortofoto definitiva. Para ello calcula a partir de sus coordenadas X e Y terreno (ortofoto), la coordenada Z que le corresponde en el modelo digital del terreno y a partir de ellas tres y los parámetros de orientación exterior del fotograma previamente obtenidos se determinan las coordenadas imagen (X,Y) que le corresponden, y por tanto el valor de nivel digital asociado a cada canal.

La rectificación diferencial se ha realizado con los módulos del programa OrthoMaster de Inpho, aplicando los parámetros descritos anteriormente en las especificaciones técnicas.

Terminado este proceso se ha comprobado visualmente que no presentara distorsiones en las ortoimágenes obtenidas.

6.5.4 Tratamiento de la imagen: correcciones radiométricas

Con el fin de mantener con la máxima fidelidad los tonos naturales del terreno, se ha procedido al tratamiento radiométrico de las imágenes rectificadas con el software OrthoVista.

Al tratarse de un vuelo fotogramétrico digital se reducen las fases de procesado de las imágenes sustituyendo una única fase de post-proceso digital a las fases de laboratorio fotográfico y escaneo.

Para una mejor interpretación de las imágenes finales es necesario también realizar un tratamiento de realce de las mismas que mejore los balances cromáticos, y el contraste de la imagen.

Para este tratamiento se han tenido en cuenta las particularidades de la zona de estudio (escala, características del vuelo,...) y se ha aplicado un tratamiento global sobre las imágenes a partir del análisis de los histogramas radiométricos de las ortofotos digitales.

El ajuste radiométrico realizado a las imágenes ortorectificadas se ha encaminado a evitar las discrepancias cromáticas entre fotogramas contiguos y conseguir una cobertura radiométricamente homogénea de la totalidad del área de estudio asegurando la continuidad radiométrica y cromática.

6.5.5 Mosaico fotográfico y corte de hojas

La generación de mosaicos se ha realizado con el programa Ortho Vista de Inpho. Una vez ortorectificados los fotogramas iniciales del vuelo y realizado el ajuste radiométrico entre los mismos se ha llevado a cabo el proceso de mosaico de las imágenes y el corte según la distribución de hojas designada para el área de estudio.

El proceso de mosaico consiste en la unión de los diferentes fotogramas ortorectificados de forma que se obtenga una sensación de imagen única continua dentro de la hoja cartográfica. Este mosaico se realiza aprovechando las zonas de solape entre ortofotografías contiguas, por esta zona se traza la denominada línea mosaico que permite fusionar los ortofotogramas en una única ortoimagen.

La línea de mosaico ha sido trazada de forma automática por medio del procedimiento denominado de **mínimos cambios radiométricos**. Este algoritmo busca la zona de máxima similitud radiométrica entre las imágenes contiguas para hacer pasar por ahí la línea de mosaico de forma que quede lo más disimulada posible y tratando siempre de que se tome de cada imagen la zona más nadiral posible.

Una vez se dispuso de la línea automática de mosaico, esta ha sido revisada para comprobar que es correcta y no interfiere con estructuras que pudieran delatar por donde se ha realizado la unión, es decir, se comprueba que la línea no corta edificaciones, puentes, etc. ya que debido, al diferente abatimiento que presentarían

estos objetos en las distintas imágenes que se fusionan, aparecerían discontinuidades geométricas en los elementos.

Para hacer manejable el volumen de información que se gestiona, visualiza, manipula, etc. se hace necesario dividir la superficie de trabajo en hojas cartográficas.

Cada hoja cartográfica contiene un ámbito geográfico determinado definido por los límites de la hoja. Al tratarse de una distribución de hojas cartográficas con objetivo de contener ortoimágenes en formato ráster las hojas deben cumplir con una serie de requisitos básicos. Estos requisitos son:

- Tener forma de cuadrado o rectángulo, ya que es la forma básica de las imágenes digitales. Si se adoptase otra figura, por ejemplo un rombo, habría que hacer una imagen digital rectangular que cubriese la totalidad del rombo generando solape entre hojas y rellenar las zonas vacías con un valor de fondo o bien colocar los datos de las imágenes adyacentes pudiendo provocar problemas entre hojas por duplicidad en las zonas de solape. Además el tener solape entre hojas provoca que se consuma más espacio de almacenamiento al tener que registrar la misma zona del terreno en más de una hoja.
- Las dimensiones de los lados deben ser múltiplos del tamaño de pixel de la imagen o modelo digital que se pretende obtener.

El corte de las imágenes se ha realizado según la distribución de hojas 1:5.000 facilitada por el Instituto Geográfico Nacional Español. Se trata de un rectángulo circunscrito con rebase de 50 metros con respecto a las 4 esquinas teóricas siendo las coordenadas de las esquinas múltiplos de 10 metros.

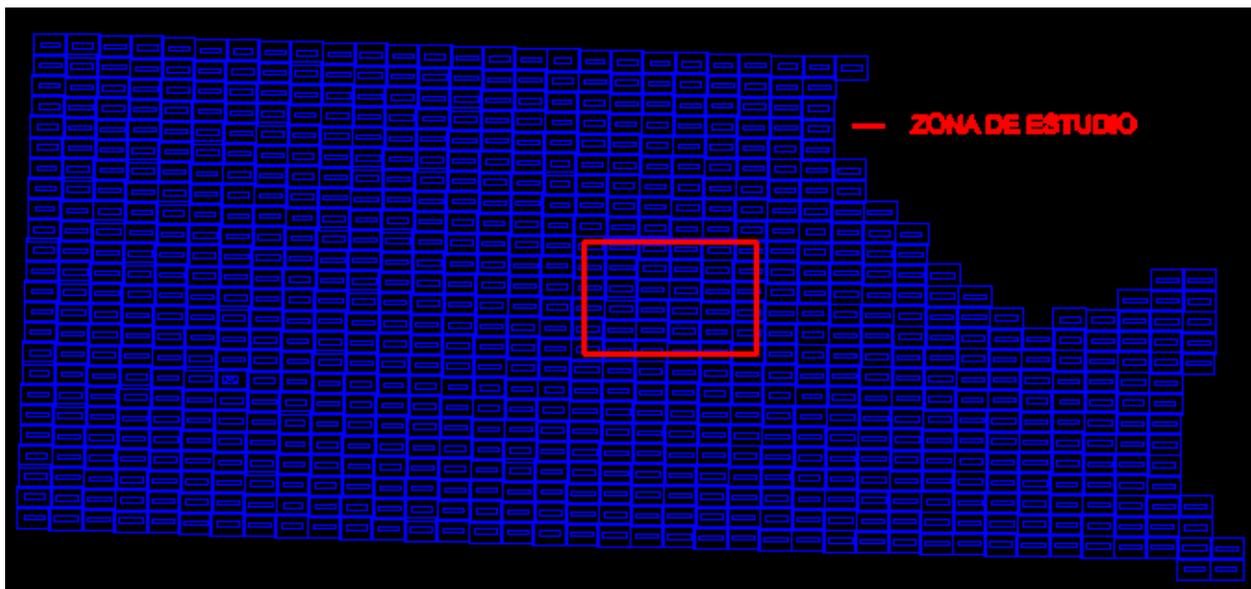


Figura 6.5.1.- Distribución de hojas - zona de estudio (1) - Esc. 1:5.000.
Fuente: Elaboración propia.

707-3-3	707-4-3	707-5-3	707-6-3
707-3-4	707-4-4	707-5-4	707-6-4
707-3-5	707-4-5	707-5-5	707-6-5
707-3-6	707-4-6	707-5-6	707-6-6

Figura 6.5.2.- Distribución de hojas - zona de estudio (2) - Esc. 1:5.000.
Fuente: Elaboración propia.

6.5.5.1 Control de calidad

El control de calidad realizado a las ortoimágenes se ha centrado sobre dos aspectos fundamentales, cuyas propiedades aseguran la calidad del producto:

- Continuidad radiométrica: Se ha comprobado que todas las hojas poseen continuidad radiométrica con las adyacentes, de modo que se evitan efectos de *teselado* del bloque de ortoimágenes.
- Continuidad geométrica. Asimismo, se ha comprobado que las hojas casan geoméricamente entre sí, de tal manera que las estructuras del terreno poseen perfecta continuidad entre hojas.

6.5.6 Producto final

Se han generado 16 ortofotos RGB y CIR que cubren el área de estudio, cortadas según división de hojas 1:5.000, con las siguientes características:

- Ortofoto RGB, formato TIFF 6 con tamaño de pixel 0.25 m y fichero TFW de georeferenciación en el sistema de referencia ETRS89, proyección UTM huso 30.
- Ortofoto CIR, formato TIFF 6 con tamaño de pixel 0.25 m y fichero TFW de georeferenciación en el sistema de referencia ETRS89, proyección UTM, huso 30.

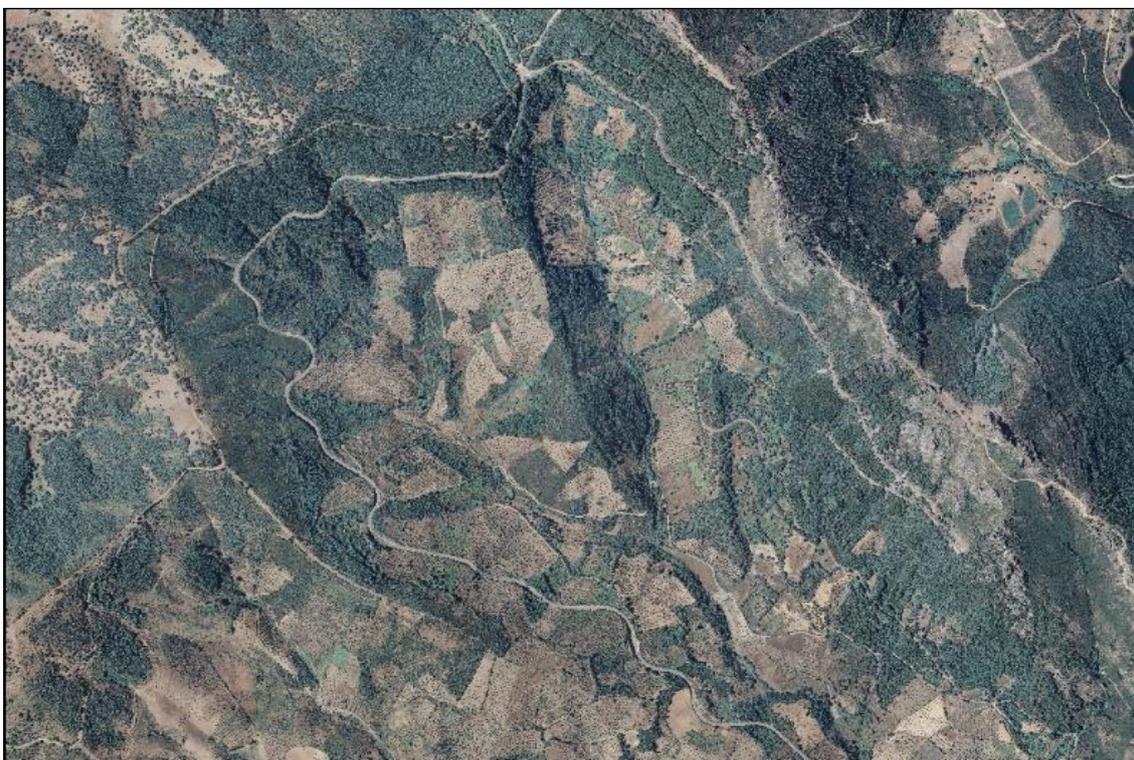
Asimismo se pueden generar ortofotos con diferentes formatos de salida como ECW, GEOTIFF variando el sistema de referencia, tamaño de pixel, el tipo de proyección, el huso, etc., entre otros productos.

A continuación se muestran las ortofotos RGB y CIR generadas para el área de estudio. Se presentan en bloque conjunto y una muestra representativa por división de hojas 1:5.000.

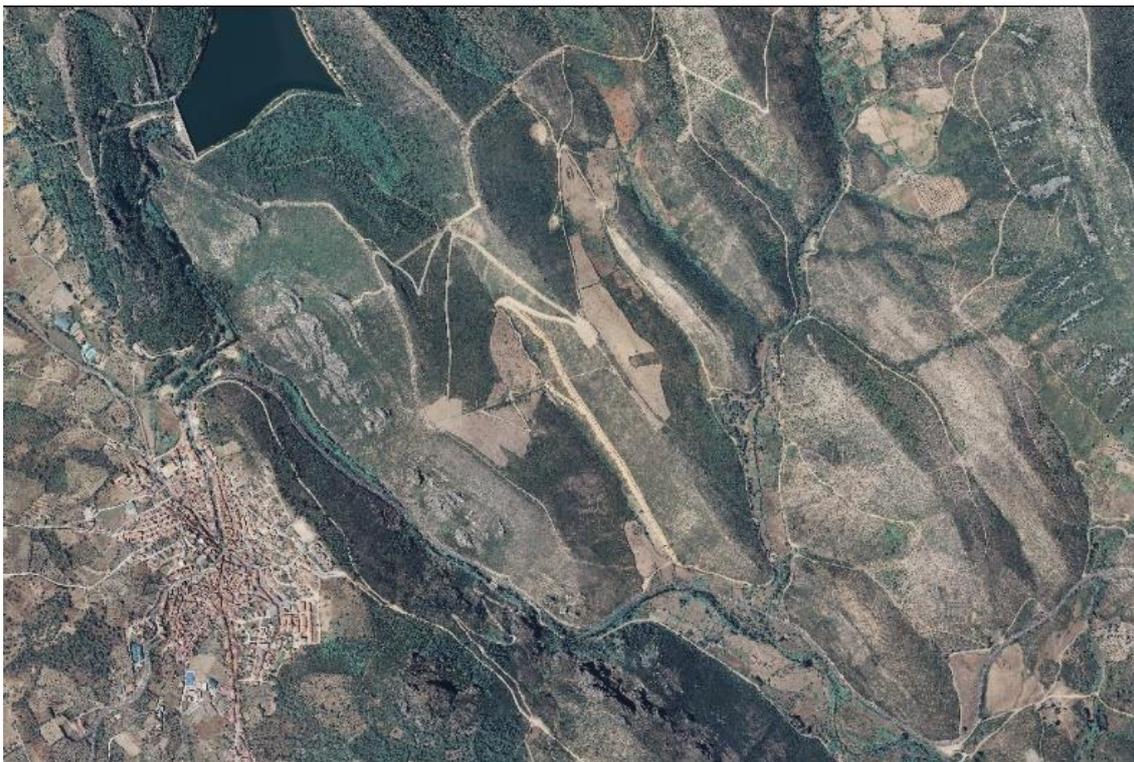
- **Ortofotos color natural**



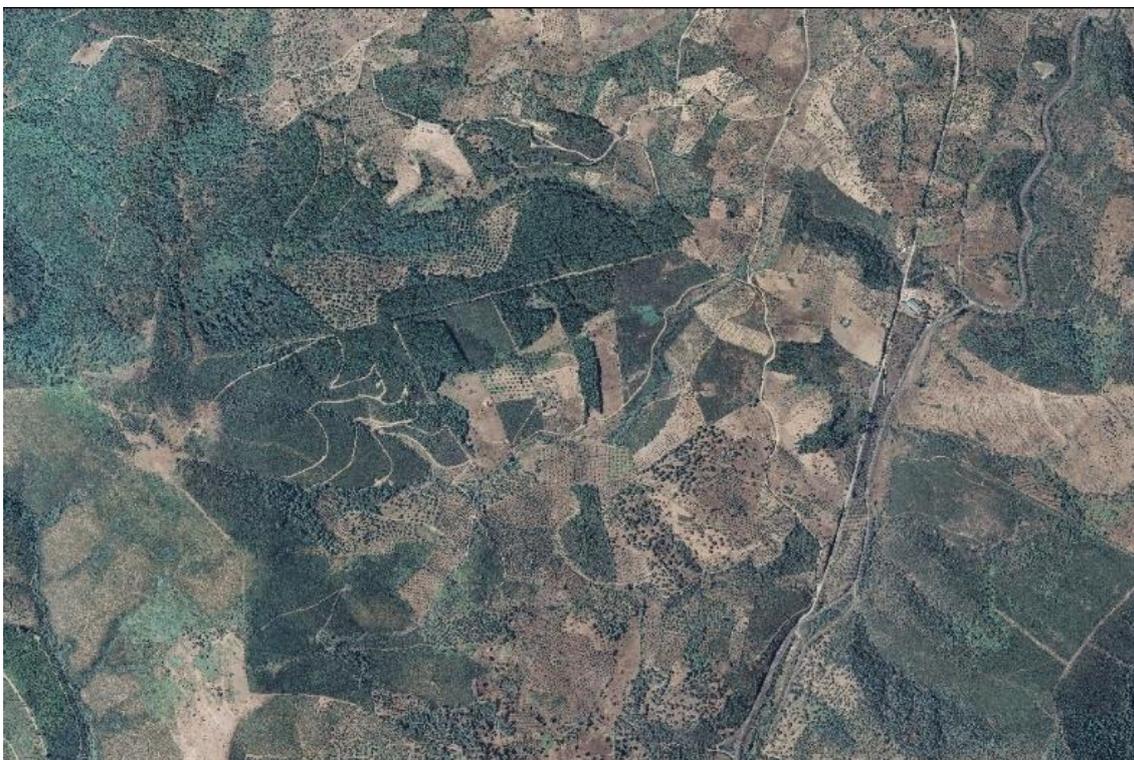
Figura 6.5.3.- Ortofoto RGB - zona de estudio (Cáceres – Extremadura). Esc. 1:60640.
Fuente: Elaboración propia.



RGB _hoja 707_3_5.
Fuente: Elaboración propia.



Ortofoto RGB _hoja 707_4_6.
Fuente: Elaboración propia.



Ortofoto RGB _hoja 707_5_4.
Fuente: Elaboración propia.

- **Ortofotos falso color infrarrojo**

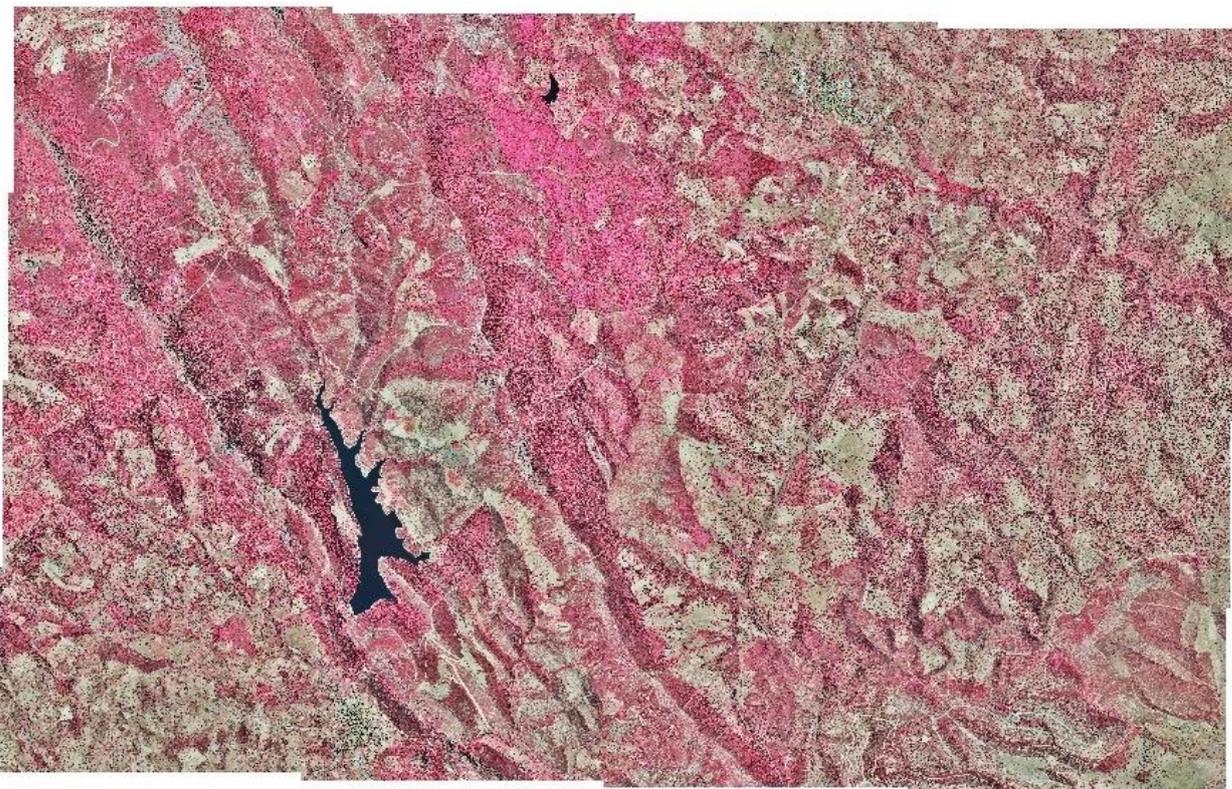
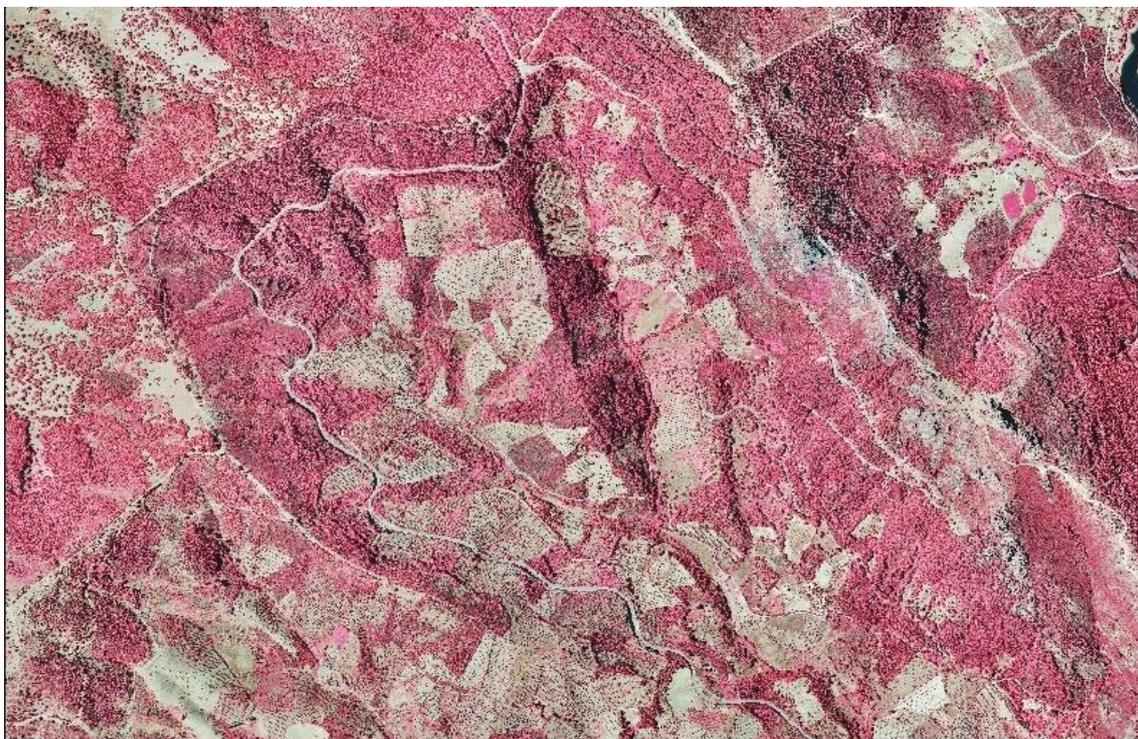


Figura 6.5.4.- Ortofoto CIR - zona de estudio (Cáceres – Extremadura). Esc. 1:60710.
Fuente: Elaboración propia.



Ortofoto CIR _hoja 707_3_5.
Fuente: Elaboración propia.



Ortofoto CIR _hoja 707_4_6.
Fuente: Elaboración propia.



Ortofoto CIR _hoja 707_5_4.
Fuente: Elaboración propia.

6.6 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD

Una vez generados los productos con la metodología propuesta para América del Sur, se estableció un análisis de la calidad posicional y exactitud, que consiste en realizar un contraste entre los productos obtenidos a evaluar y la verdad terreno (con una fuente de mayor precisión).

6.6.1 Análisis de la calidad posicional

Para estudiar la calidad posicional cartográfica se pueden emplear diferentes técnicas basadas en puntos o en geometría lineal. En nuestro caso, hemos optado por aquellos test basados en puntos y de uso actual, habiéndose seleccionado los siguientes:

- Test National Map Accuracy Standard (NMAS), es el más simple y nos especifica si el producto cumple con las exigencias del NMAS.
- Test Engineering Map Accuracy Standard (EMAS) / American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), nos proporciona la exactitud a gran escala.
- Test National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA), nos ofrece un índice de la calidad en unidades reales sobre el terreno.
- Test Fórmula de Koppe, este es específico para el MDT considerando la pendiente.

Se han elegido estos test ya que nos permite realizar la comparación de las ortofotos con una fuente de mayor exactitud. Además, en el caso del test EMAS, se pueden obtener estadísticos para verificar si existen desplazamientos constantes (errores sistemáticos) y variabilidad de las muestras (errores casuales).

De otra parte, los test se emplean de forma independiente sobre las coordenadas planimétricas y altimétricas de una muestra de al menos 20 puntos distribuidas homogéneamente, aunque es preferible tomar un mayor número de muestras para el cumplimiento de las hipótesis de normalidad determinada estadísticamente por el teorema de grandes números. Además, se debe tener en cuenta que se debe eliminar los errores groseros.

En este análisis se utiliza como fuente de comparación los productos y bases de datos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Se asume al PNOA como fuente de mayor exactitud por tratarse de productos publicados y por tanto aprobados por la autoridad cartográfica competente como es el Instituto Geográfico Nacional Español.

Los cuadros con los datos de la fuente PNOA y las comparativas completas se encuentran en el anexo IV.

A continuación se desarrollan los contrastes y el análisis de precisión posicional para cada una de las fases del proceso de generación de ortofotos.

FASE 1.- Vuelo fotogramétrico digital

En esta primera fase lo que se mide es exactitud de la posición de las coordenadas de los centros de proyección (CDP) calculados por la metodología propuesta para América del Sur con respecto de la verdadera (o fuente de mayor exactitud).

En éste caso, la verdad son los centros de proyección resultado de la aerotriangulación PNOA (ésta se hizo con los puntos de apoyo, CDP GPS/INS, estaciones de referencia terrestre, etc.) dado que son los centros más precisos que se pueden calcular.

Es decir, se busca medir la exactitud de la metodología propuesta para América del Sur.

Para ello se realizan 2 comparaciones:

- Comparativa 1.- cálculo CDP PNOA *versus* cálculo CDP de metodología propuesta para América del Sur.
- Comparativa 2.- CDP PNOA y CDP de metodología propuesta para América del Sur *versus* aerotriangulación PNOA (AT-PNOA).

La comparativa 2 se refuerza con un análisis estadístico para comprobar si las muestras anteriormente indicadas pertenecen a la misma población; es decir, si las muestras son iguales en términos estadísticos.

Las fuentes de mayor exactitud que se utiliza en ésta fase son:

- CDP calculados por el PNOA y
- resultado de la AT-PNOA

Procedimiento.-

a.- Se seleccionan las muestras (223 puntos GPS de la trayectoria del avión):

- Coordenadas CDP cálculo PNOA de la base de datos Stereocarto.
- Coordenadas CDP AT-PNOA de la base de datos Stereocarto.
- Coordenadas CDP calculada con la metodología propuesta a partir de propia base de datos generada en el presente estudio.

b.- En las comparativas 1 y 2, se calculan las diferencias entre ambos cálculos (diferencias X,Y,Z y ángulos de orientación omega, phi, kappa)

c.- Se calculan los estadísticos, medias, desviaciones estándar, error medio cuadrático en ambas comparativas.

d.- En la comparativa 2, se añade un análisis de la varianza (ANOVA - *Analysis of variance*).

Comparativa VF-1.- CDP cálculo PNOA versus cálculo CDP de metodología propuesta para América del Sur.

Resultados de las diferencias obtenidas en planimetría, altimetría (m) y ángulos de orientación (°)

PAS /FOTO	DIFX	DIFY	DIFZ	DIFO	DIFP	DIFK
90-2766	0.316	0.404	0.627	0.001	0.002	0.010
90-2767	0.314	0.407	0.643	0.001	0.002	0.009
90-2768	0.320	0.404	0.655	0.001	0.001	0.007
90-2769	0.316	0.396	0.668	0.001	0.001	0.008
90-2770	0.316	0.399	0.670	0.001	0.001	0.008
90-2771	0.316	0.404	0.664	0.001	0.002	0.008
90-2772	0.312	0.401	0.656	0.001	0.001	0.008
90-2773	0.317	0.404	0.659	0.001	0.001	0.006
90-2774	0.313	0.405	0.643	0.001	0.001	0.010
90-2775	0.319	0.413	0.648	0.001	0.002	0.008
90-2776	0.315	0.410	0.650	0.001	0.002	0.008
90-2777	0.313	0.408	0.643	0.001	0.002	0.007
90-2778	0.316	0.401	0.649	0.001	0.002	0.008
94-2816	0.382	0.414	0.612	0.000	0.002	0.003
94-2817	0.378	0.408	0.614	0.000	0.002	0.001
94-2818	0.384	0.395	0.635	0.000	0.001	0.003
94-2819	0.388	0.400	0.649	0.000	0.001	0.004
94-2820	0.384	0.398	0.643	0.000	0.001	0.001
94-2821	0.384	0.398	0.639	0.000	0.001	0.006
94-2822	0.388	0.409	0.637	0.000	0.002	0.002
95-2729	0.306	0.392	0.620	0.000	0.000	0.004
95-2730	0.310	0.381	0.646	0.001	0.000	0.000
95-2731	0.308	0.389	0.648	0.000	0.000	0.005
95-2732	0.307	0.386	0.646	0.001	0.000	0.003
95-2733	0.306	0.393	0.643	0.002	0.001	0.003
95-2734	0.299	0.382	0.638	0.001	0.001	0.001
95-2735	0.308	0.397	0.617	0.001	0.000	0.002
95-2736	0.311	0.399	0.609	0.000	0.000	0.006
95-2737	0.311	0.392	0.610	0.002	0.000	0.003
95-2738	0.307	0.381	0.626	0.002	0.000	0.003
95-2739	0.304	0.385	0.631	0.000	0.000	0.007
95-2740	0.307	0.365	0.663	0.001	0.000	0.004
95-2741	0.308	0.374	0.659	0.001	0.000	0.004
95-2742	0.304	0.371	0.659	0.001	0.000	0.005
95-2743	0.306	0.378	0.653	0.000	0.000	0.006
95-2744	0.309	0.383	0.657	0.001	0.000	0.007
95-2745	0.303	0.376	0.650	0.003	0.001	0.004
95-2746	0.305	0.379	0.644	0.000	0.000	0.006

Cuadro 6.6.1.- Diferencias entre CDP PNOA versus CDP metodología propuesta para América del Sur (primera parte)
Fuente: Elaboración propia.

Parámetros estadísticos de la comparativa 1

Variable	Nº de datos	Media	Des. std.	Varianza	RMSE
DIF X (m)	223	0.309	0.052	0.003	0.312
DIF Y (m)	223	0.396	0.028	0.001	0.398
DIF Z (m)	223	0.532	0.097	0.009	0.538

Cuadro 6.6.2.- Estadísticos de dispersión: CDP PNOA vs CDP metodología propuesta para América del Sur. Coordenadas XYZ (1).
Fuente: Elaboración propia.

Variable	Nº de datos	Media	Des. std.	Varianza	RMSE
DIF O (°)	223	0.001	0.000	0.000	0.001
DIF P (°)	223	0.001	0.001	0.000	0.001
DIF K (°)	223	0.003	0.003	0.000	0.003

Cuadro 6.6.3.- Estadísticos de dispersión: CDP PNOA vs CDP metodología propuesta para América del Sur. Ángulos de orientación (2).
Fuente: Elaboración propia.

Comparativa VF-2.- CDP PNOA y CDP metodología propuesta para América del Sur versus AT- PNOA

Resultados de las diferencias obtenidas en planimetría, altimetría (m) y ángulos de orientación (°)

	PAS/FOTO	DIFX	DIFY	DIFZ	DIFO	DIFP	DIFK
90-2766	1.002	1.376	0.041	0.025	0.013	0.008	
90-2767	0.549	1.337	0.130	0.026	0.001	0.000	
90-2768	0.711	0.507	0.002	0.004	0.005	0.003	
90-2769	0.787	1.320	0.061	0.023	0.008	0.006	
90-2770	0.826	0.904	0.124	0.013	0.010	0.007	
90-2771	1.438	0.860	0.282	0.013	0.023	0.009	
90-2772	0.886	0.992	0.166	0.016	0.010	0.006	
90-2773	0.917	0.742	0.148	0.009	0.011	0.004	
90-2774	1.134	0.646	0.166	0.006	0.015	0.008	
90-2775	1.277	0.979	0.158	0.012	0.017	0.009	
90-2776	1.108	0.824	0.161	0.010	0.013	0.009	
90-2777	1.638	0.661	0.146	0.006	0.024	0.007	
90-2778	1.187	0.641	0.255	0.006	0.015	0.010	
94-2816	0.667	0.923	0.493	0.008	0.007	0.010	
94-2817	0.203	0.760	0.594	0.004	0.013	0.009	
94-2818	0.523	1.209	0.471	0.013	0.003	0.013	
94-2819	0.238	1.216	0.506	0.015	0.005	0.014	
94-2820	0.272	0.849	0.546	0.005	0.003	0.012	
94-2821	0.713	1.008	0.407	0.010	0.011	0.018	
94-2822	0.802	0.994	0.475	0.010	0.015	0.015	
95-2729	0.940	1.374	0.496	0.021	0.006	0.001	
95-2730	1.215	1.290	0.608	0.020	0.013	0.011	
95-2731	1.116	0.565	0.509	0.004	0.010	0.004	
95-2732	1.504	0.846	0.689	0.011	0.018	0.007	
95-2733	1.017	0.463	0.688	0.004	0.009	0.006	
95-2734	0.976	0.665	0.615	0.007	0.009	0.007	
95-2735	0.771	0.669	0.531	0.007	0.004	0.007	
95-2736	0.651	0.428	0.653	0.000	0.002	0.003	
95-2737	1.212	1.355	0.418	0.024	0.018	0.005	
95-2738	1.852	0.872	0.677	0.012	0.033	0.005	
95-2739	1.488	0.958	0.688	0.011	0.022	0.003	
95-2740	0.853	0.834	0.638	0.009	0.006	0.004	
95-2741	1.075	0.244	0.683	0.002	0.011	0.002	
95-2742	1.021	0.727	0.663	0.008	0.011	0.000	
95-2743	1.407	0.744	0.659	0.006	0.020	0.002	
95-2744	0.539	0.805	0.586	0.008	0.002	0.000	
95-2745	0.880	1.100	0.698	0.018	0.007	0.002	
95-2746	0.718	0.972	0.683	0.011	0.002	0.004	

Cuadro 6.6.4.- Diferencias entre CDP PNOA versus CDP AT-PNOA (primera parte).
Fuente: Elaboración propia.

PAS/FOTO	DIFX	DIF Y	DIFZ	DIFO	DIF P	DIFK
90-2766	1.318	1.780	1.021	0.024	0.011	0.002
90-2767	0.863	1.744	1.193	0.025	0.000	0.009
90-2768	1.031	0.911	1.055	0.003	0.004	0.004
90-2769	1.103	1.716	1.115	0.022	0.007	0.002
90-2770	1.142	1.303	1.168	0.013	0.008	0.002
90-2771	1.754	1.264	1.307	0.012	0.022	0.001
90-2772	1.198	1.393	1.172	0.015	0.008	0.001
90-2773	1.234	1.146	1.145	0.008	0.010	0.001
90-2774	1.448	1.051	1.133	0.005	0.014	0.002
90-2775	1.596	1.392	1.115	0.011	0.016	0.001
90-2776	1.423	1.234	1.108	0.009	0.011	0.001
90-2777	1.951	1.069	1.073	0.005	0.023	0.000
90-2778	1.503	1.042	1.182	0.005	0.013	0.002
94-2816	0.285	1.337	1.382	0.008	0.005	0.007
94-2817	0.581	1.168	1.492	0.004	0.015	0.008
94-2818	0.139	1.604	1.401	0.013	0.002	0.010
94-2819	0.150	1.616	1.463	0.015	0.006	0.010
94-2820	0.112	1.247	1.508	0.005	0.004	0.011
94-2821	0.329	1.406	1.377	0.010	0.010	0.012
94-2822	0.414	1.403	1.453	0.010	0.014	0.012
95-2729	1.246	1.766	1.512	0.021	0.006	0.005
95-2730	1.525	1.671	1.659	0.019	0.013	0.011
95-2731	1.424	0.954	1.568	0.004	0.010	0.009
95-2732	1.811	1.232	1.753	0.010	0.019	0.009
95-2733	1.323	0.856	1.752	0.002	0.009	0.009
95-2734	1.275	1.047	1.677	0.006	0.008	0.009
95-2735	1.079	1.066	1.571	0.006	0.004	0.009
95-2736	0.962	0.827	1.681	0.001	0.002	0.009
95-2737	1.523	1.747	1.438	0.022	0.018	0.007
95-2738	2.159	1.253	1.701	0.011	0.033	0.007
95-2739	1.792	1.343	1.704	0.011	0.023	0.010
95-2740	1.160	1.199	1.673	0.008	0.005	0.008
95-2741	1.383	0.618	1.704	0.003	0.011	0.006
95-2742	1.325	1.098	1.672	0.007	0.011	0.005
95-2743	1.713	1.122	1.653	0.007	0.021	0.007
95-2744	0.848	1.188	1.574	0.007	0.002	0.007
95-2745	1.183	1.476	1.667	0.015	0.006	0.006
95-2746	1.023	1.351	1.634	0.011	0.002	0.003

Cuadro 6.6.5.- Diferencias entre CDP metodología propuesta versus CDP AT-PNOA (primera parte).
Fuente: Elaboración propia.

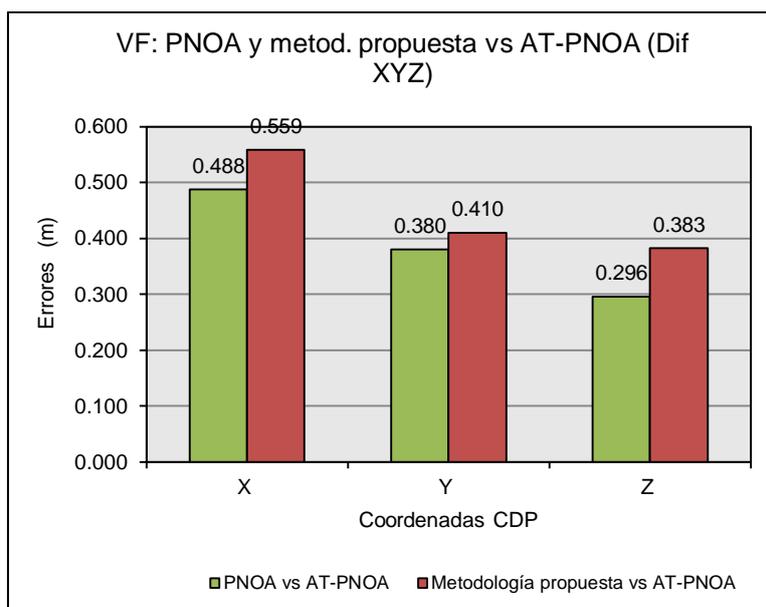
Parámetros estadísticos de la comparativa 2

Variable	Nº de datos	CDP PNOA vs AT-PNOA				CDP met. propuesta vs AT-PNOA			
		Media	Des. std.	Varianza	RMSE	Media	Des. std.	Varianza	RMSE
DIF X (m)	223	0.566	0.488	0.238	0.599	0.737	0.559	0.312	0.775
DIF Y (m)	223	0.528	0.380	0.144	0.553	0.895	0.410	0.168	0.922
DIF Z (m)	223	0.409	0.296	0.088	0.429	1.203	0.383	0.147	1.228

Cuadro 6.6.6.- Estadísticos de dispersión: CDP PNOA y CDP metodología propuesta para América del Sur versus AT PNOA. Coordenadas XYZ (1).
Fuente: Elaboración propia.

Variable	Nº de datos	CDP PNOA vs AT-PNOA				CDP met. propuesta vs AT-PNOA			
		Media	Des. std.	Varianza	RMSE	Media	Des. std.	Varianza	RMSE
DIF O (°)	223	0.007	0.006	0.000	0.007	0.007	0.006	0.000	0.007
DIF P (°)	223	0.007	0.005	0.000	0.007	0.007	0.005	0.000	0.007
DIF K (°)	223	0.006	0.005	0.000	0.006	0.005	0.003	0.000	0.005

Cuadro 6.6.7.- Estadísticos de dispersión: CDP PNOA y CDP metodología propuesta para América del Sur versus AT PNOA. Ángulos de orientación (2).
Fuente: Elaboración propia.



Análisis de la varianza

Tabla ANOVA

En la prueba del análisis de la varianza (ANOVA), se determinan dos estimadores de la varianza común, uno de ellos obtenido de la varianza dentro de los grupos o varianza residual y el otro de la varianza entre los grupos o cuasivarianza entre grupos.

La prueba ANOVA contrasta si la varianza de una variable se puede considerar igual entre dos o más grupos en este caso CDP PNOA y CDP metodología propuesta.

Así que, utilizando la aplicación estadística *Statistical Product and Service* (SPSS) se ha efectuado la prueba ANOVA para dos alternativas distintas, una para variables de forma independiente (para cada una de las coordenadas y cada uno de los ángulos) y otra para variables de forma conjunta.

La hipótesis nula que se quiere contrastar es:

“Ho: Si (CDP PNOA vs AT-PNOA) = (CDP metodología propuesta vs AT- PNOA)”; esto es, si las varianzas de las variables de forma independiente y conjunta son iguales en términos estadísticos.

El criterio de decisión será:

Se rechaza H_0 si $p\text{-value}^3 \leq \alpha$ ($\alpha=0.05$)

Anova variables agrupadas

Este análisis se ha realizado agrupando las 3 variables de cada tipo en una sola, de tal manera que se tiene una única variable "coordenadas" y otra "ángulos de orientación".

		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Sig.
Coordenadas (X,Y,Z)	Inter-grupos	65.904	1	65.904	324.143	0.000
	Intra-grupos	271.632	1336	0.203		
	Total	337.536	1337			

Cuadro 6.6.8.- Tabla Anova (1): coordenadas de los centros de proyección agrupados.
Fuente: Elaboración propia.

		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Sig.
Ángulos de orientación (O, P, K)	Inter-grupos	0.000	1	0.000	2.103	0.147
	Intra-grupos	0.034	1336	0.000		
	Total	0.034	1337			

Cuadro 6.6.9.-Tabla Anova (2): ángulos de orientación agrupados.
Fuente: Elaboración propia.

Anova variables independientes

Es interesante efectuar un test más detallado con vistas a estudiar si cada varianza de las coordenadas y ángulos considerados individualmente ejerce una influencia sobre el error de las diferencias y conducen a la desigualdad o si son iguales.

³ El p-valor es el área de la cola de la distribución (o colas si el test es bilateral) definida a partir del estadístico de contraste, sólo puede calcularse una vez tomada la muestra, obteniéndose niveles críticos distintos para cada muestra. Se puede interpretar como un nivel mínimo de significación en el sentido de que niveles de significación α , iguales o superiores al *p-valor* llevarán a rechazar la hipótesis nula.

Esta forma de abordar los tests, permite una visión más amplia, por cuanto da información de para qué niveles de significación puede rechazarse la hipótesis nula, y para cuales no se puede. (Vila, A.; Sedano, M.; López, A. Contraste de hipótesis de 1 población. U.O.C)

		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Sig.
DIF X	Inter-grupos	3.269	1	3.269	11.875	0.001
	Intra-grupos	122.238	444	0.275		
	Total	125.507	445			
DIF Y	Inter-grupos	15.003	1	15.003	95.959	0.000
	Intra-grupos	69.420	444	0.156		
	Total	84.423	445			
DIF Z	Inter-grupos	70.215	1	70.215	599.838	0.000
	Intra-grupos	51.973	444	0.117		
	Total	122.188	445			

Cuadro 6.6.10.-Tabla Anova (3): coordenadas de los centros de proyección de forma independiente.
Fuente: Elaboración propia.

		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Sig.
DIF O	Inter-grupos	0.000	1	0.000	0.004	0.952
	Intra-grupos	0.014	444	0.000		
	Total	0.014	445			
DIF P	Inter-grupos	0.000	1	0.000	0.006	0.939
	Intra-grupos	0.012	444	0.000		
	Total	0.012	445			
DIF K	Inter-grupos	0.000	1	0.000	8.687	0.003
	Intra-grupos	0.007	444	0.000		
	Total	0.007	445			

Cuadro 6.6.11.-Tabla Anova (4): ángulos de orientación de forma independiente.
Fuente: Elaboración propia.

FASE 2.- Orientación de imágenes

Ahora bien, lo que se quiere saber en esta fase es la diferencia de calidad en la orientación externa de los siguientes dos conjuntos de datos:

- a.- PNOA: calculado con puntos de apoyo, centros de proyección GPS/INS y usando estaciones de referencia.
- b.- Metodología propuesta: calculada como ajuste de bloques en relativo sin apoyo y con centros de proyección por método precise point positioning (PPP).

Lo ideal para realizar la comparativa sería contar con al menos 20 puntos tomados en campo por técnicas GPS y bien distribuidos por toda la zona de estudio para hacer una comparación absoluta, producto *versus* "verdad" terreno.

Al tratarse de un caso limitado, la comparación es relativa (producto *versus* producto), y es la siguiente:

Comparativa 1.- Orientación externa (OE) de la metodología propuesta *versus* aerotriangulación PNOA (AT-PNOA)

La fuente de comparación (mayor exactitud) que se utiliza es el resultado de la AT-PNOA.

Procedimiento.-

- a.- Se selecciona una muestra de puntos (cota terreno) sobre las imágenes digitales capturadas en vuelo, 30 puntos de fácil determinación.
- b.- Se extraen las coordenadas de los puntos de la aerotriangulación PNOA en estación fotogramétrica; por visión estereoscópica, estos puntos vienen a ser los puntos de control. Para realizar éste proceso se utiliza el software *Image Station Stereo Display* (ISSD) de Intergraph que funciona sobre Microstation y gafas anáglifo.
- c.- Se ubican los mismos puntos de control (obtenidos en el paso anterior) sobre las imágenes con la orientación externa de la metodología propuesta y se extraen las coordenadas, que vienen a ser las medidas de los puntos control. Este procedimiento también se realiza en estación fotogramétrica y en estéreo.
- d.- Se calculan las diferencias y los estadísticos (desviación estándar, RMSE, test NMAS, EMAS/ASPRS, NSSDA).

Comparativa OI-1.- orientación externa metodología propuesta para América del Sur versus AT-PNOA

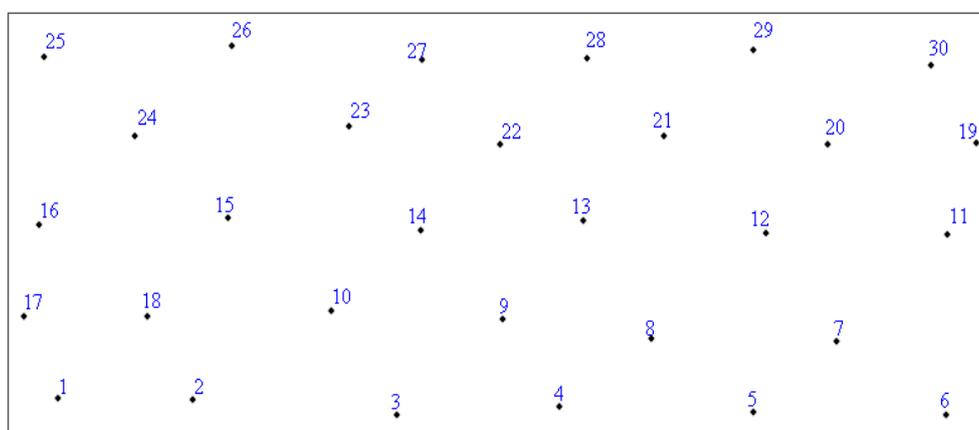
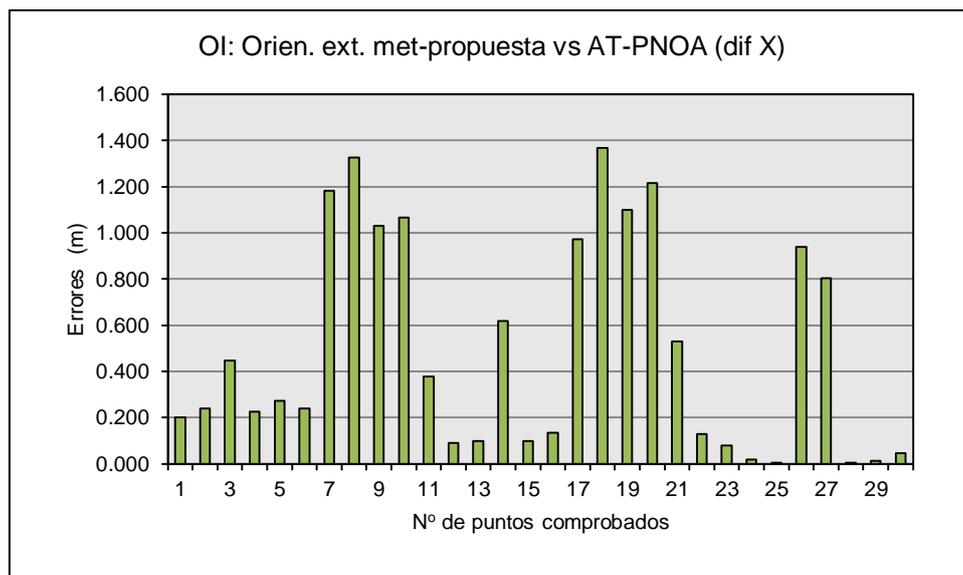


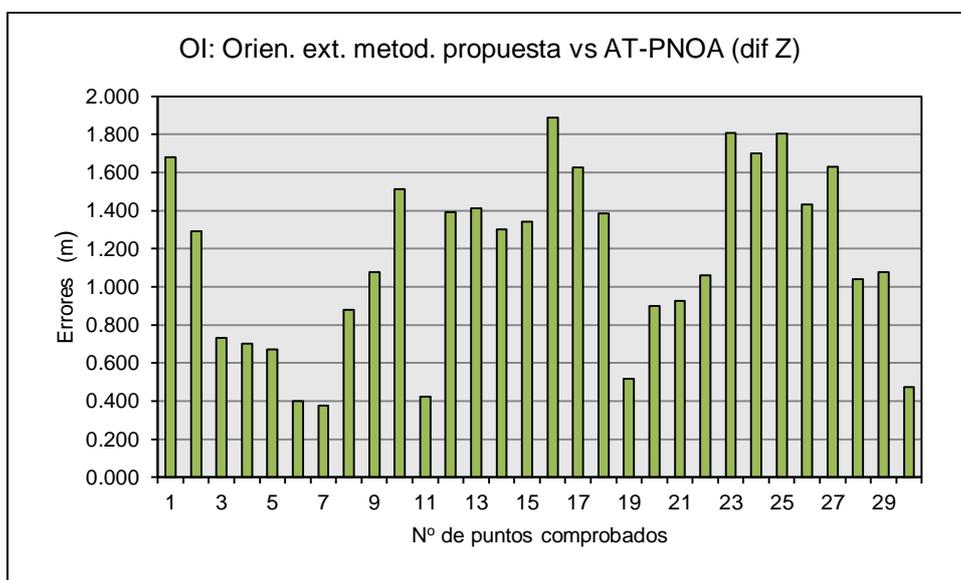
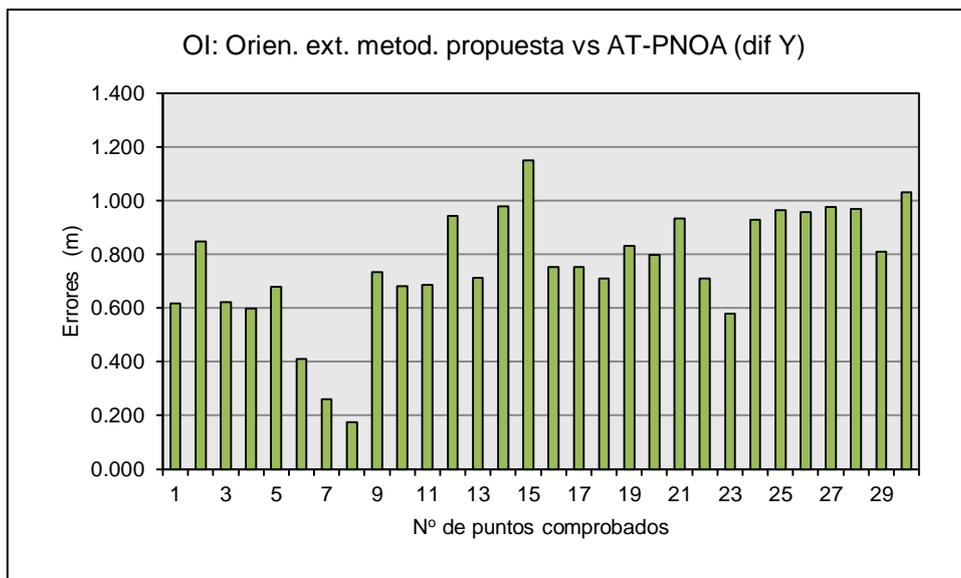
Figura 6.6.1.- Distribución de puntos para control de posición en la orientación de imagen.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados de las diferencias obtenidas en planimetría y altimetría (m)

ID	X met-prop	Y met-prop	Zmet-prop	X pnoa	Y pnoa	Z pnoa	dif X	dif Y	dif Z
1	285863.099	4362045.558	955.415	285862.899	4362044.940	953.735	0.200	0.618	1.680
2	289298.420	4362004.130	688.451	289298.179	4362003.283	687.160	0.241	0.847	1.291
3	294481.381	4361654.482	627.700	294481.828	4361653.859	626.969	-0.447	0.623	0.731
4	298630.681	4361847.768	679.935	298630.454	4361847.170	679.232	0.227	0.598	0.703
5	303561.389	4361696.590	475.968	303561.115	4361695.910	475.298	0.274	0.680	0.670
6	308470.058	4361648.402	561.629	308469.819	4361647.992	561.230	0.239	0.410	0.399
7	305684.060	4363345.521	539.959	305682.878	4363345.260	539.583	1.182	0.261	0.376
8	300968.743	4363395.442	555.421	300967.415	4363395.268	554.541	1.328	0.174	0.880
9	297170.745	4363862.667	707.828	297169.714	4363861.933	706.750	1.031	0.734	1.078
10	292837.824	4364046.728	688.006	292836.756	4364046.047	686.494	1.068	0.681	1.512
11	308483.628	4365826.253	435.268	308483.250	4365825.566	434.845	0.378	0.687	0.423
12	303875.801	4365841.400	577.491	303875.891	4365840.457	576.100	-0.090	0.943	1.391
13	299220.593	4366134.751	655.478	299220.494	4366134.039	654.066	0.099	0.712	1.412
14	295096.964	4365909.427	774.753	295096.346	4365908.448	773.451	0.618	0.979	1.302
15	290194.489	4366187.347	775.161	290194.587	4366186.197	773.818	-0.098	1.150	1.343
16	285402.005	4366027.432	761.396	285401.871	4366026.680	759.508	0.134	0.752	1.888
17	285012.196	4363915.875	752.480	285011.223	4363915.123	750.854	0.973	0.752	1.626
18	288156.502	4363934.022	749.275	288155.134	4363933.312	747.888	1.368	0.710	1.387
19	309248.168	4367919.155	564.975	309247.069	4367918.325	564.456	1.099	0.830	0.519
20	305465.861	4367888.100	612.795	305464.645	4367887.302	611.895	1.216	0.798	0.900
21	301278.198	4368106.292	569.396	301277.667	4368105.358	568.470	0.531	0.934	0.926
22	297133.007	4367886.170	812.519	297132.877	4367885.461	811.457	0.130	0.709	1.062
23	293270.031	4368330.089	831.917	293269.953	4368329.510	830.109	0.078	0.579	1.808
24	287838.046	4368080.738	677.049	287838.065	4368079.809	675.347	-0.019	0.929	1.702
25	285512.128	4369912.785	633.457	285512.124	4369911.820	631.652	0.004	0.965	1.805
26	290300.469	4370176.925	949.222	290299.529	4370175.967	947.788	0.940	0.958	1.434
27	295138.753	4369864.045	969.703	295137.950	4369863.070	968.074	0.803	0.975	1.629
28	299318.597	4369880.695	646.133	299318.592	4369879.727	645.094	0.005	0.968	1.039
29	303546.346	4370067.673	518.109	303546.334	4370066.863	517.031	0.012	0.810	1.078
30	308076.157	4369735.123	630.720	308076.112	4369734.093	630.247	0.045	1.030	0.473

Cuadro 6.6.12.- Coordenadas y diferencias entre AT-PNOA versus orientación de imágenes metodología propuesta.
Fuente: Elaboración propia.





Parámetros estadísticos de la comparativa

Variable	Nº de datos	Media	Des. std.	Varianza
DIF X (m)	30	0.496	0.469	0.220
DIF Y (m)	30	0.760	0.219	0.048
DIF Z (m)	30	1.149	0.466	0.217

Cuadro 6.6.13.- Estadísticos de dispersión: AT-PNOA versus orientación de imágenes metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Test NMAS

Variables	Nº datos	Media	Des. std.	RMSE	Error máx	Verificación NMAS
DIF X,Y (m)	30	1.001	0.287	1.054	0.250	No cumple
DIF Z (m)	30	1.149	0.466	1.234		No cumple

Cuadro 6.6.14.- Estadísticos y errores medios en coordenadas conjuntas XY y Z.
Fuente: Elaboración propia.

Test EMAS/ASPRS

Variables	Nº datos	Media	Des. std.	Tcal	Valor crít. T	Verificación EMAS/ASPRS
DIF X (m)	30	0.496	0.469	5.791	1.696	No cumple
DIF Y (m)	30	0.760	0.219	19.001		No cumple
DIF Z (m)	30	1.149	0.466	13.509		No cumple

Cuadro 6.6.15.- Detección de sistematismos en coordenadas XYZ.
Fuente: Elaboración propia.

Variables	n-1	Varianza	Var-máx	χ^2	Valor crít. χ^2	Verificación EMAS/ASPRS
DIF X (m)	29	0.220	0.063	102.067	42.551	No cumple
DIF Y (m)	29	0.048	0.063	22.263		Cumple
DIF Z (m)	29	0.217	0.063	100.687		No cumple

Cuadro 6.6.16.- Detección de errores casuales en coordenadas XYZ.
Fuente: Elaboración propia.

Test NSSDA

Variable	Nº de datos	RMSE	RMSEr	NSSDA (95% confianza)
DIF X (m)	30	0.582	0.989	1.691
DIF Y (m)	30	0.800		
DIF Z (m)	30	1.234	—	2.419

Cuadro 6.6.17.- Test NSSDA: AT-PNOA versus orientación de imágenes metodología propuesta.
Fuente: Elaboración propia.

FASE 3.- Modelo digital del terreno

En esta fase se comprueba la calidad de los modelos digitales del terreno entre: El MDT por la metodología propuesta para América del Sur (obtenida a partir de malla de puntos por técnicas LIDAR, calculado con GPS/INS, efemérides y técnica PPP y sin

estaciones de referencia terrestre) con respecto del MDT del PNOA (obtenida también a partir de datos LIDAR, pero con mayor rigurosidad en el postproceso, es decir calculado con GPSD/INS, estaciones de referencia terrestre y por técnica GPS diferencial).

En concreto, se quiere saber la precisión de la Z (terreno) tanto en los datos LIDAR como en el MDT grid (formato Ascii Arcinfo) obtenido por la metodología propuesta frente a la Z del PNOA.

Las comparaciones planteadas son las siguientes:

Comparativa 1.- Datos LIDAR metodología propuesta y datos LIDAR PNOA *versus* puntos AT-PNOA.

Comparativa 2.- MDT grid metodología propuesta y MDT grid-PNOA *versus* puntos AT-PNOA.

Procedimiento.-

a.- Se utiliza el conjunto de puntos (referidos a cota suelo) sacados de la aerotriangulación PNOA en la fase anterior (orientación de imágenes); estos vienen a ser los puntos de control (puntos distribuidos homogéneamente por toda la zona de estudio) que permitirán obtener las altitudes de los datos LIDAR y MDT grid.

Los programas utilizados en el proceso son Global mapper v10.02 (que permiten ver el modelo óptico en 3 dimensiones), Microstation v8 y Terrasolid (Terrascan y terramodel) para extracción y comprobación de los puntos.

b.- Se extraen las altitudes (Z) de los datos LIDAR PNOA y metodología propuesta (datos irregulares) mediante proceso automático con Terrascan, chocando los puntos control de la AT-PNOA contra los datos LIDAR para ambos casos.

c.- Se extraen las altitudes (Z) del MDT grid-PNOA y metodología propuesta, chocando los puntos control de la AT- PNOA contra la malla de los puntos LIDAR para ambos casos mediante un proceso automático.

d.- Se calcula el valor de la pendiente para cada punto tanto en los datos LIDAR como en el MDT grid.

e.- Se detectan los errores previos, inconsistencias, signos, etc.

f.- Se calculan las diferencias, parámetros estadísticos, test: NMAS, EMAS/ASPRS NSSDA y fórmula de Koope.

En el test NSSDA se comprueba cual es el error de altimetría del modelo digital del terreno por la metodología propuesta y si ese error es significativo con respecto del PNOA. El criterio de aceptación será:

$$\text{RMSE}_z \leq 1.00 \text{ m.}$$

El test de la fórmula de Koope complementa al test NSSDA, ya que considera la influencia de la pendiente del terreno en el error medio en la altitud (Z). El procedimiento detallado del cálculo y los valores de las pendientes calculadas se presentan en el anexo III y anexo IV, respectivamente.

Comparativa 1.- Datos LIDAR metodología propuesta y datos LIDAR PNOA versus puntos AT-PNOA.

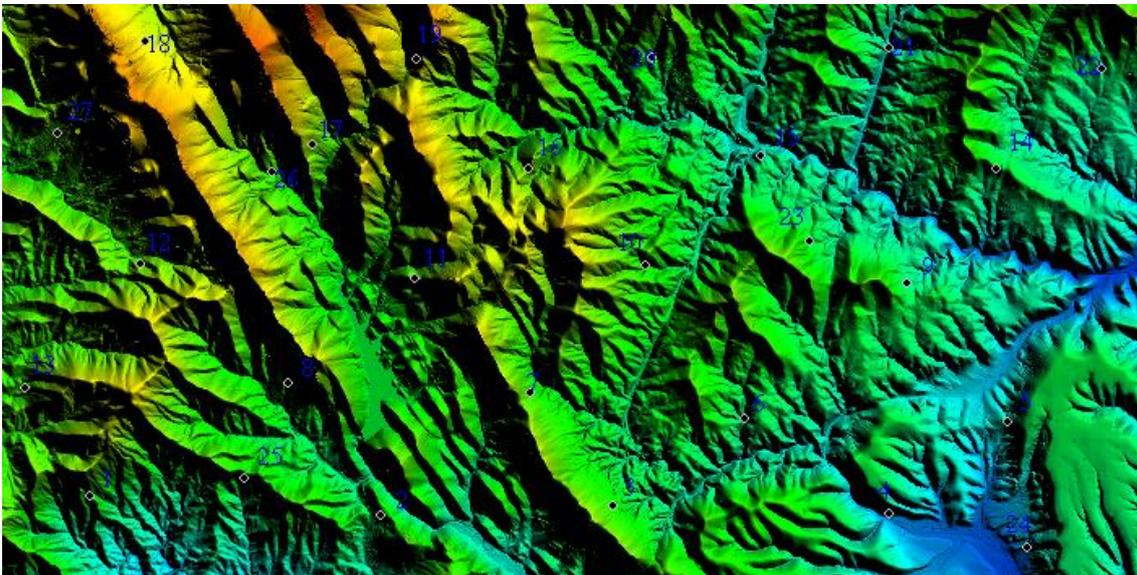


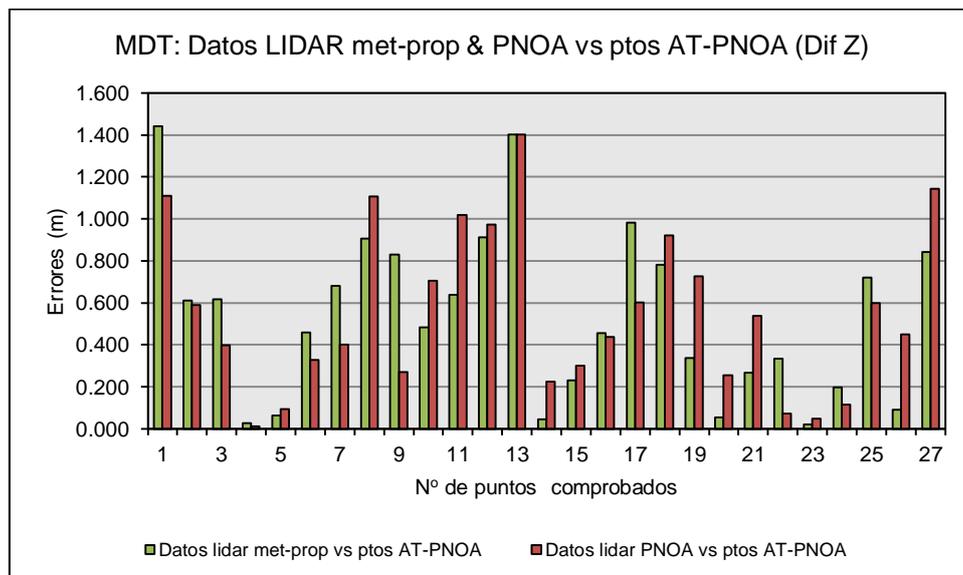
Figura 6.6.2.- Distribución de puntos para control de posición en el modelo digital del terreno.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados de las diferencias obtenidas en altimetría (m)

ID	Z dl-met-prop.	Z dl pnoa	Z at pnoa	Dif Z dl1a	Dif dl Z1b
1	688.600	688.270	687.160	1.440	1.110
2	627.580	627.560	626.969	0.611	0.591
3	679.850	679.630	679.232	0.618	0.398
4	475.270	475.310	475.298	-0.028	0.012
5	539.520	539.490	539.583	-0.063	-0.093
6	555.000	554.870	554.541	0.459	0.329
7	707.430	707.150	706.750	0.680	0.400
8	687.400	687.600	686.494	0.906	1.106
9	576.930	576.370	576.100	0.830	0.270
10	654.550	654.770	654.066	0.484	0.704
11	774.090	774.470	773.451	0.639	1.019
12	774.730	774.790	773.818	0.912	0.972
13	749.290	749.290	747.888	1.402	1.402
14	611.940	612.120	611.895	0.045	0.225
15	568.700	568.770	568.470	0.230	0.300
16	811.000	811.020	811.457	-0.457	-0.437
17	831.090	830.710	830.109	0.981	0.601
18	948.570	948.710	947.788	0.782	0.922
19	968.410	968.800	968.074	0.336	0.726
20	645.040	644.840	645.094	-0.054	-0.254
21	517.300	517.570	517.031	0.269	0.539
22	580.550	580.810	580.884	-0.334	-0.074
23	619.100	619.130	619.080	0.020	0.050
24	482.880	482.960	483.077	-0.197	-0.117
25	644.710	644.590	643.990	0.720	0.600
26	722.090	722.450	722.000	0.090	0.450
27	783.130	783.430	782.288	0.842	1.142

Cuadro 6.6.18.- Altitudes (Z) y diferencias de comparativa 1: Z LIDAR met-propuesta vs Z at pnoa (Dif Z dl1a) y Z LIDAR pnoa vs Z at pnoa (Dif Z dl1b).

Fuente: Elaboración propia.



Parámetros estadísticos de la comparativa

Variable	Datos LIDAR vs puntos AT-PNOA			
	Nº de datos	Media	Des. std.	Varianza
DIF Z1a dl-met-prop. vs atpnoa (m)	27	0.534	0.400	0.160
DIF Z1b dl-pnoa vs atpnoa (m)	27	0.550	0.388	0.150

Cuadro 6.6.19.- Estadísticos de dispersión: datos LIDAR met.propuesta y datos LIDAR PNOA versus puntos AT-PNOA.

Fuente: Elaboración propia.

Test NMAS

Variables	Nº datos	Media	Des. std.	RMSE	Error máx	Verificación NMAS
DIFZ1adl-prop. (m)	27	0.534	0.400	0.611	1.000	Cumple
DIFZ1bdl-pnoa (m)	27	0.550	0.388	0.624		Cumple

Cuadro 6.6.20.- Estadísticos y errores medios en datos LIDAR (Z).

Fuente: Elaboración propia.

Test EMAS /ASPRS

Variables	Nº datos	Media	Des. std.	Tcal	Valor crít. T	Verificación EMAS/ASPRS
DIF Z1a dl-met-prop. (m)	27	0.534	0.400	6.944	1.706	No cumple
DIF Z1b dl-pnoa (m)	27	0.550	0.388	7.365		No cumple

Cuadro 6.6.21.- Detección de sistematismos en Z de datos LIDAR.

Fuente: Elaboración propia.

Variables	n-1	Varianza	Var-máx	X2	Valor crít. X2	Verificación EMAS/ASPRS
DIF Z1a dl-met-prop.(m)	26	0.160	1.000	4.157	38.885	Cumple
DIF Z1b dl-pnoa (m)	26	0.150	1.000	3.911		Cumple

Cuadro 6.6.22.- Detección de errores casuales en Z de datos LIDAR.

Fuente: Elaboración propia.

Test NSSDA

Variable	Nº de datos	RMSE	NSSDA (95% confianza)
DIF Z1a dl-met-prop. vs atpnoa (m)	27	0.611	1.198
DIF Z1b dl-pnoa vs atpnoa (m)	27	0.624	1.224

Cuadro 6.6.23.- Test NSSDA: datos LIDAR met.propuesta y datos LIDAR PNOA versus puntos AT-PNOA

Fuente: Elaboración propia.

Test fórmula de Koope

Variable	Nº datos	Pendiente media puntos (°)	Pendiente media zona (°)	Coef. de regresión	Errores medios en Z (m)
DIF Z1a dl-met-prop. vs atpnoa (m)	27	13.866	19.120	0.158	± 0.305
DIF Z1b dl-pnoa vs atpnoa (m)				0.110	± 0.289

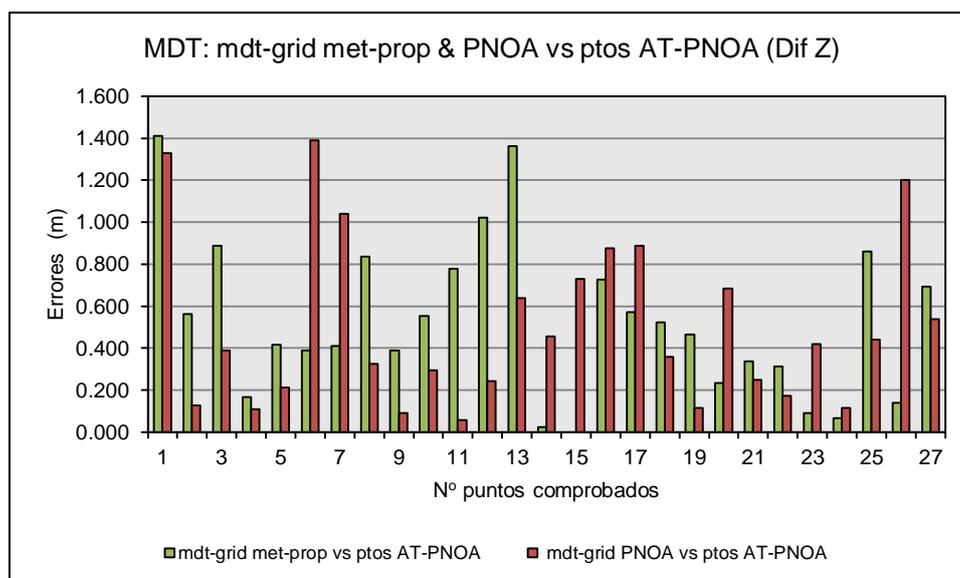
Cuadro 6.6.24.- Errores medios en Z datos LIDAR considerando la pendiente.
Fuente: Elaboración propia.

Comparativa 2.- MDT grid metodología propuesta y MDT grid-PNOA versus puntos AT-PNOA.

Resultados de las diferencias obtenidas en altimetría (m)

ID	Z grid met-prop	Z grid pnoa	Z at pnoa	Dif Z grid2a	DIF Z grid2b
1	688.570	688.490	687.160	1.410	1.330
2	627.530	626.840	626.969	0.561	-0.129
3	680.120	679.620	679.232	0.888	0.388
4	475.130	475.190	475.298	-0.168	-0.108
5	540.000	539.370	539.583	0.417	-0.213
6	554.930	555.930	554.541	0.389	1.389
7	707.160	705.710	706.750	0.410	-1.040
8	687.330	686.170	686.494	0.836	-0.324
9	576.490	576.190	576.100	0.390	0.090
10	654.620	654.360	654.066	0.554	0.294
11	774.230	773.510	773.451	0.779	0.059
12	774.840	774.060	773.818	1.022	0.242
13	749.250	747.250	747.888	1.362	-0.638
14	611.870	611.440	611.895	-0.025	-0.455
15	568.470	567.740	568.470	0.000	-0.730
16	810.730	810.580	811.457	-0.727	-0.877
17	830.680	829.220	830.109	0.571	-0.889
18	948.310	947.430	947.788	0.522	-0.358
19	968.540	968.190	968.074	0.466	0.116
20	644.860	644.410	645.094	-0.234	-0.684
21	517.370	517.280	517.031	0.339	0.249
22	580.570	580.710	580.884	-0.314	-0.174
23	619.170	618.660	619.080	0.090	-0.420
24	483.010	482.960	483.077	-0.067	-0.117
25	644.850	644.430	643.990	0.860	0.440
26	721.860	720.800	722.000	-0.140	-1.200
27	782.980	781.750	782.288	0.692	-0.538

Cuadro 6.6.25.- Altitudes (Z) y diferencias de comparativa 2: Z grid met-propuesta vs Z at pnoa (Dif Z grid 2a) y Z grid pnoa vs Z at pnoa (Dif Z grid2b).
Fuente: Elaboración propia.



Parámetros estadísticos de la comparativa

Variable	MDT grid vs puntos AT-PNOA			
	Nº de datos	Media	Des. std.	Varianza
DIF Z2a grid met-prop vs atpnoa (m)	27	0.527	0.374	0.140
DIF Z2b grid pnoa vs atpnoa (m)	27	0.500	0.394	0.156

Cuadro 6.6.26.- Estadísticos de dispersión: MDT grid met. propuesta y MDT grid PNOA versus puntos AT-PNOA
Fuente: Elaboración propia.

Test NMAS

Variables	Nº datos	Media	Des. std.	RMSE	Error máx	Verificación NMAS
DIFZ2agr-prop. (m)	27	0.527	0.374	0.599	1.000	Cumple
DIFZ2bgr-prop. (m)	27	0.500	0.394	0.576		Cumple

Cuadro 6.6.27.- Estadísticos y errores medios en MDT GRID.
Fuente: Elaboración propia.

Test EMAS/ASPRS

Variables	Nº datos	Media	Des. std.	Tcal	Valor crít. T	Verificación EMAS/ASPRS
DIF Z2a grid met-prop. (m)	27	0.527	0.374	7.323	1.706	No cumple
DIF Z2b grid pnoa (m)	27	0.500	0.394	6.582		No cumple

Cuadro 6.6.28.- Detección de sistematismos en Z-MDT GRID.
Fuente: Elaboración propia.

Variables	n-1	Varianza	Var-máx	X2	Valor crít. X2	Verificación EMAS/ASPRS
DIF Z2a grid met-prop. (m)	26	0.140	1.000	3.638	38.885	Cumple
DIF Z2b grid pnoa (m)	26	0.156	1.000	4.046		Cumple

Cuadro 6.6.29.-Detección de errores casuales en Z-MDT GRID.
Fuente: Elaboración propia.

Test NSSDA

Variable	Nº de datos	RMSE	NSSDA (95% confianza)
DIF Z2a grid met-prop vs atpnoa (m)	27	0.599	1.174
DIF Z2b grid pnoa vs atpnoa (m)	27	0.576	1.128

Cuadro 6.6.30.-Test NSSDA: MDT grid met. propuesta y MDT grid PNOA versus puntos AT-PNOA.
Fuente: Elaboración propia.

Test fórmula de Koope

Variable	Nº datos	Pendiente media puntos (°)	Pendiente media zona (°)	Coef. de regresión	Errores medios en Z (m)
DIF Z2a grid met-prop vs atpnoa (m)	27	11.947	19.120	0.260	± 0.303
DIF Z2b grid pnoa vs atpnoa (m)				-0.015	± 0.208

Cuadro 6.6.31.- Errores medios en Z mdt grid considerando la pendiente.
Fuente: Elaboración propia.

FASE 4.- Ortofotos

En esta última fase se comprueba la calidad de la ortofoto obtenida con la metodología propuesta para América del Sur (generada a partir de productos con menor rigurosidad, con parámetros de orientación externa obtenida por orientación directa, modelo digital del terreno a partir de datos LIDAR calculado en ambos casos por la técnica PPP y sin estaciones de referencia) en relación a la ortofoto PNOA (producidas con mayor rigurosidad cumpliendo el pliego técnico PNOA, con orientaciones externas obtenida por aerotriangulación, modelo digital de superficie provenientes de datos LIDAR calculada por la técnica GPS diferencial y estaciones de referencia terrestre).

Para obtener la diferencia se realiza la siguiente comparación entre productos:

Comparativa 1.- ortofoto PNOA *versus* ortofoto metodología propuesta para América del Sur.

Procedimiento.-

a.- Se selecciona una muestra de 29 puntos sobre las ortoimágenes, distribuidos homogéneamente en la zona de estudio.

En este proceso los programas utilizados son Global mapper v10.02 y Microstation v8 que permiten superponer información vectorial sobre ráster.

b.- Se extraen las coordenadas de los puntos sobre las ortoimágenes de la metodología propuesta para América del Sur y sobre las ortoimágenes del PNOA dejando marcado el punto e indicado el nombre (numeración aritmética) por si se necesitara volver a comprobar.

c.- Se detectan los errores previos, inconsistencias, signos, etc.

d.- Finalmente se calculan las diferencias, parámetros estadísticos test: NMAS, EMAS/ASPRS y NSSDA.

El criterio de aceptación del test NSSDA para esta fase será:

$$RMSE_{xy} \leq 0.50 \text{ m.}$$

Comparativa OF-1.- ortofoto PNOA versus ortofoto metodología propuesta para América del Sur.

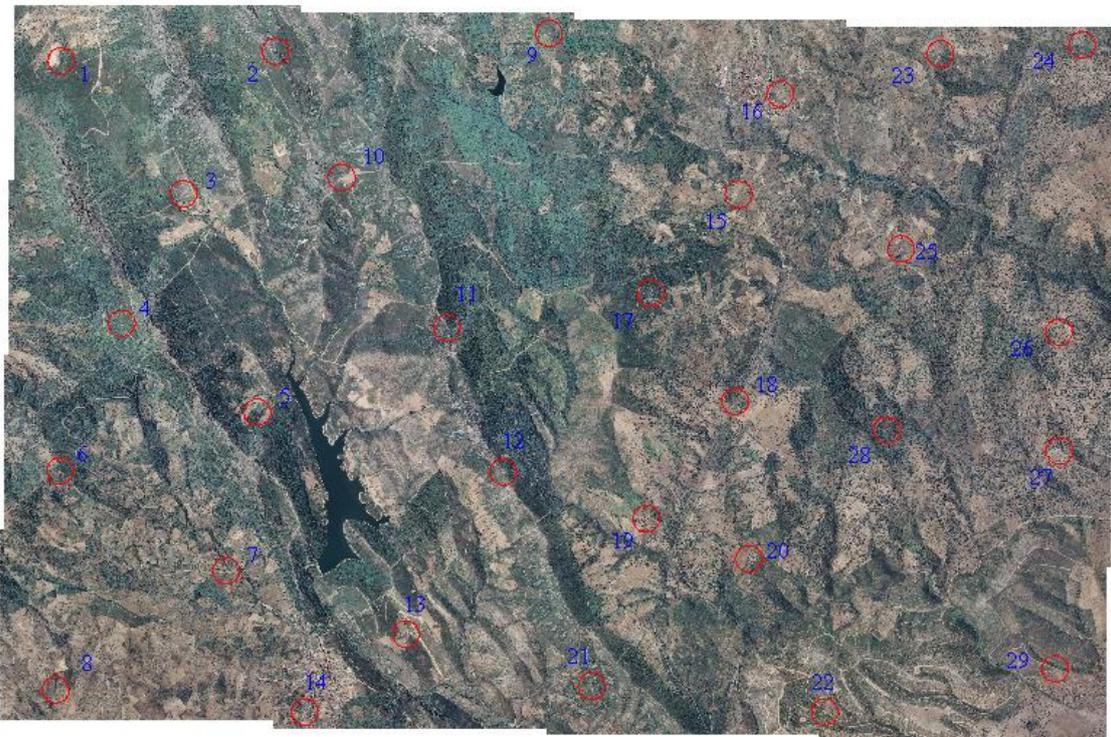
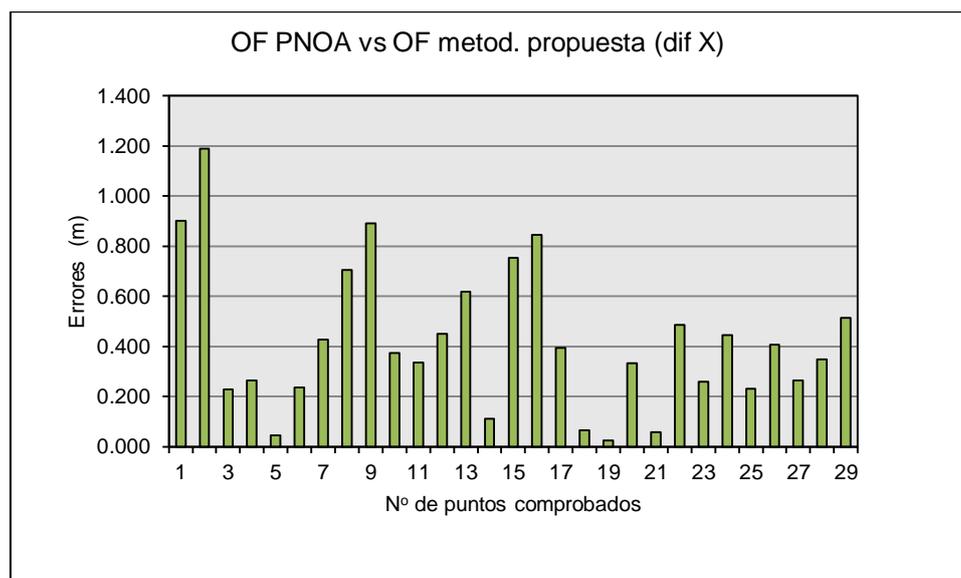


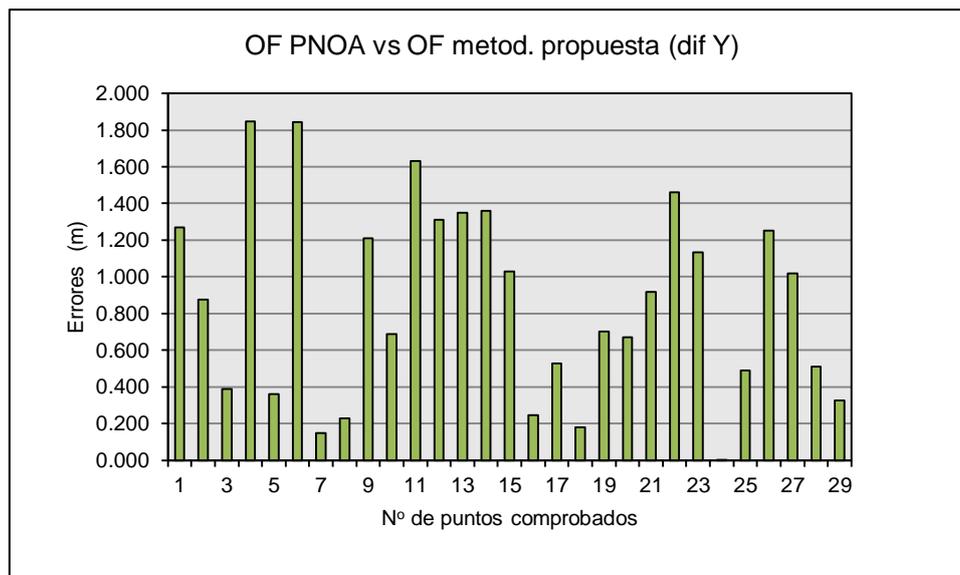
Figura 6.6.3.- Distribución de puntos para control de posición en la ortofoto.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados de las diferencias obtenidas en planimetría (m)

ID	X pnoa	Y pnoa	X met-prop	Y met-prop	Dif X	Dif Y
1	290758.117	4369822.539	290759.017	4369821.269	-0.900	1.270
2	293576.493	4369946.135	293577.681	4369945.260	-1.188	0.875
3	292367.093	4368062.766	292367.320	4368063.154	-0.227	-0.388
4	291556.812	4366349.876	291557.075	4366351.723	-0.263	-1.847
5	293336.708	4365174.151	293336.753	4365174.510	-0.045	-0.359
6	290745.901	4364399.339	290746.137	4364401.184	-0.236	-1.845
7	292931.306	4363075.393	292931.733	4363075.245	-0.427	0.148
8	290690.734	4361499.968	290691.439	4361500.195	-0.705	-0.227
9	297173.185	4370181.852	297172.294	4370183.061	0.891	-1.209
10	294445.178	4368276.113	294444.804	4368275.425	0.374	0.688
11	295829.679	4366287.490	295829.344	4366289.121	0.335	-1.631
12	296572.403	4364381.479	296572.852	4364380.167	-0.449	1.312
13	295287.660	4362237.332	295288.278	4362238.682	-0.618	-1.350
14	293958.667	4361206.271	293958.778	4361207.630	-0.111	-1.359
15	299661.772	4368053.473	299662.525	4368054.502	-0.753	-1.029
16	300211.633	4369382.594	300212.479	4369382.838	-0.846	-0.244
17	298504.360	4366747.326	298504.755	4366747.853	-0.395	-0.527
18	299616.022	4365318.450	299615.956	4365318.270	0.066	0.180
19	298447.454	4363760.777	298447.430	4363761.479	0.024	-0.702
20	299796.386	4363232.468	299796.718	4363233.137	-0.332	-0.669
21	297731.019	4361549.293	297730.961	4361550.211	0.058	-0.918
22	300792.081	4361205.152	300792.566	4361206.614	-0.485	-1.462
23	302311.581	4369913.813	302311.841	4369914.948	-0.260	-1.135
24	304174.708	4370031.876	304175.153	4370031.874	-0.445	0.002
25	301794.671	4367331.577	301794.441	4367332.066	0.230	-0.489
26	303872.332	4366236.564	303872.738	4366237.815	-0.406	-1.251
27	303878.494	4364660.549	303878.229	4364661.569	0.265	-1.020
28	301610.188	4364934.993	301609.839	4364935.502	0.349	-0.509
29	303821.957	4361776.779	303822.470	4361777.104	-0.513	-0.325

Cuadro 6.6.32.- Altitudes y diferencias entre ortofoto PNOA versus ortofoto metodología propuesta.
Fuente: Elaboración propia.





Parámetros estadísticos de la comparativa

Variable	Nº de datos	Media	Des. std.	Varianza
DIF X (m)	29	0.421	0.288	0.083
DIF Y (m)	29	0.861	0.530	0.281

Cuadro 6.6.33.- Estadísticos de dispersión: ortofoto PNOA versus ortofoto metodología propuesta.
Fuente: Elaboración propia.

Test NMAS

Variables	Nº datos	Media	Des. std.	RMSE	Error máx	Verificación NMAS
DIF X,Y (m)	29	1.021	0.486	1.111	0.500	No cumple

Cuadro 6.6.34.- Estadísticos y errores medios en coordenadas conjuntas XY.
Fuente: Elaboración propia.

Test EMAS/ASPRS

Variables	Nº datos	Media	Des. std.	Tcal	Valor crít. T	Verificación EMAS/ASPRS
DIF X (m)	29	0.421	0.288	7.863	1.701	No cumple
DIF Y (m)	29	0.861	0.530	8.741		No cumple

Cuadro 6.6.35.- Detección de sistematismos en coordenadas XY.
Fuente: Elaboración propia.

Variabes	n-1	Varianza	Var-máx	χ^2	Valor crít. χ^2	Verificación EMAS/ASPRS
DIF X (m)	28	0.083	0.250	9.292	41.337	Cumple
DIF Y (m)	28	0.281	0.250	31.517		Cumple

Cuadro 6.6.36.- Detección de errores casuales en coordenadas XY.
Fuente: Elaboración propia.

Test NSSDA

Variable	Nº de datos	RMSE	RMSEr	NSSDA (95% confianza)
DIF X (m)	29	0.474	1.070	1.754
DIF Y (m)	29	0.960		

Cuadro 6.6.37.- Test NSSDA: ortofoto PNOA versus ortofoto metodología propuesta.
Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 6.6.38 se resumen los errores obtenidos en planimetría y altimetría por la metodología propuesta.

Variable	RMSE metodología propuesta
Vuelo fotogramétrico (VF)	
X (m)	0.052
Y (m)	0.028
Z (m)	0.097
Orientación de imágenes (OI)	
X (m)	0.469
Y (m)	0.219
Z (m)	0.466
Modelo digital del terreno (MDT)	
Z datos LIDAR (m)	0.611
Z MDT grid (m)	0.599
Ortofoto (OF)	
X (m)	0.474
Y (m)	0.960

Cuadro 6.6.38.- Resumen de resultados del análisis de la calidad posicional. Planimetría y altimetría.
Fuente: Elaboración propia.

7.- DISCUSIONES

7. DISCUSIONES

Se han analizado los resultados de las comparaciones entre productos, y la consecuencia para la metodología propuesta. Se utiliza como fuente de mayor exactitud productos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) como los centros de proyección (CDP) de las imágenes, aerotriangulación, modelos digitales del terreno y ortofotos por ser productos aprobados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y su cumplimiento con las especificaciones técnicas PNOA, por lo tanto ofrecen alta precisión en la determinación de los puntos de control a partir de ellos.

En cuanto a los test estadísticos es importante indicar que se utilizaron diferentes test aplicados en el sector cartográfico en la actualidad, la secuencia presentada en los resultados es por orden de antigüedad. Resaltamos a continuación la diferencia principal, en el caso del NMAS permite saber si los productos cumplen o no con los límites de error establecidos. El EMAS/ASPRS comprueba dos aspectos, primero si existe desplazamiento en las componentes aunque no nos especifica la causa, segundo si existe errores casuales y si están dentro de los límites máximos. El NSSDA sólo nos dice la exactitud de los puntos y en función del límite máximo establecido para un nivel de confianza (95% en todos los test empleados) se valida al producto, y el test fórmula de Koppe específico para estudiar los efectos de la pendiente del terreno sobre el error medio en la componente vertical.

A continuación en el cuadro 6.6.39 se muestran los test aplicados por fases del proceso de control posicional y las coordenadas analizadas (ver el anexo III para mayor detalle).

Fase	Componente posicional analizada	Estadísticos aplicados
Vuelo fotogramétrico	XYZ, omega, phi, kappa	Estad. dispersión y ANOVA
Orientación de imágenes	XYZ	Estad. dispersión, NMAS, EMAS, NSSDA.
Modelo digital del terreno	Z	Estad. dispersión, NMAS, EMAS, NSSDA, fórmula de Koppe.
Ortofoto	XY	Estad. dispersión, NMAS, EMAS, NSSDA.

Cuadros 6.6.39.- Variables analizadas y estadísticos utilizados en el control de calidad posicional.
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se ha tratado de identificar con que escalas y resoluciones cartográficas se corresponden los resultados a nivel nacional (PNOA España, 2010a,b) y de América del Sur (IGM Ecuador 2006, 2008; IGN Perú, 2011), con la finalidad de darle un sentido práctico al trabajo.

El análisis detallado en cada comparativa y en cada fase arroja los siguientes resultados:

FASE 1.- Vuelo fotogramétrico digital

En la fase de vuelo se analizaron 223 muestras procedentes de los centros de proyección.

Las precisiones de CDP de la metodología propuesta está en el orden de 0.052, 0.028 y 0.097 m. para las coordenadas X,Y y Z respectivamente y en el orden de 0.000 a 0.003 grados para los ángulos de orientación, de modo que el resultado nos dice que existe muy poca desviación en la posición con respecto de los CDP PNOA, estos resultados concuerdan plenamente con lo esperado para ésta metodología.

Desde otro punto de vista se está comparando con el CDP PNOA con errores precedentes propios de su proceso de cálculo que están en el orden de 0.014 m. en X, 0.013 m. en Y y 0.021 m. en Z, sumándose a éstos los errores previos de nuestro propio cálculo (CDP metodología propuesta) que están en el orden de 0.035 m. en X, 0.033 m. en Y y 0.061 m. en Z. En cuanto a los ángulos de orientación (ω , ϕ y κ) los errores son similares en ambos casos y están en el orden de 0.004 a 0.010 grados.

En los cálculos GPS versus AT-PNOA, ambos set de resultados son similares y coherentes (para coordenadas y ángulos) con precisiones en el orden de 0.488 a 0.559 m. en X, de 0.380 a 0.410 m. en Y y de 0.296 a 0.383 m. en Z, aunque las medias resultan un poco altas posiblemente a un fallo en la calibración de los instrumentos GPS/INS, pero en definitiva los cálculos son correctos.

El resultado de la prueba ANOVA para el análisis de variables conjuntas e independientes, muestra que hay igualdad estadísticamente significativa en el caso de los ángulos. En el caso de las coordenadas los grupos presentan valores diferentes de modo que se rechaza H_0 .

Los resultados obtenidos en esta fase corresponden a los errores medios cuadráticos para escala cartográfica 1:5.000, resolución de imagen (GSD vuelo, tamaño de pixel) de 0.220 m., con precisiones esperadas para los centros de proyección de 0.100 m. y 0.120 m a nivel nacional y de América del Sur, respectivamente.

Los anteriores resultados en la medición de posición para cada CDP se puede decir que la precisión obtenida con la metodología propuesta (por técnica PPP) es tres veces más en comparación que la metodología del PNOA (calculado por técnica diferencial con puntos de apoyo de campo) que son los CDP más precisos que se han podido calcular.

FASE 2.- Orientación de imágenes

Se analizaron un total de 30 muestras en la fase de orientación de imágenes.

La forma de capturar los puntos utilizados es mediante digitalización por visión estereoscópica, en estación fotogramétrica, utilizando un software especializado de visualización 3D.

Los puntos se han extraído de la AT-PNOA (hecho con puntos de apoyo de campo), su precisión a priori viene determinada por los errores propios del proceso de aerotriangulación que se pueden cifrar en el orden de 0.111, 0.097 y 0.072 m. en X, Y, Z respectivamente, en cualquier caso estos resultados vienen a ser la mayor precisión que se ha podido calcular.

En la muestra de puntos comprobados la coordenada X presenta mayor variabilidad mientras que las coordenadas Y, Z son más uniformes como se refleja en los estadísticos de dispersión, encontrándose diferencias mínimas del orden de 0.004 (X) a 0.376 (Z) m. y las máximas en el orden de 1.150 (Y) a 1.888 (Z) m. pudiendo influir en estos resultados la distribución y el número de las muestras o errores de calibración.

Los resultados del test NMAS arrojaron medias del orden de 1.001 m. para planimetría y del orden de 1.149 m. para el caso de altimetría y desviaciones estándar del orden de 0.287 m. (XY) y 0.466 m. (Z). Estos resultados superan el límite máximo de error establecido en la metodología propuesta en 0.25 m. de escasos milímetros en

planimetría conjunta y casi el doble en altimetría; por tanto, no se cumple con el NMAS en esta fase debido a que se supera el 10% de los puntos establecidos como límite de error. Este test es el más simple; sin embargo, se echa en falta la indicación de una medida de inexactitud del producto, ya que los resultados obtenidos sólo nos indica si el producto cumple o no cumple con el límite de error preestablecido.

En los resultados del test EMAS/ASPRS se detectaron errores de sistematismo en todas las coordenadas (X,Y,Z) superando los límites exigidos en la primera verificación EMAS; por lo tanto, se verifica que existen desplazamientos que podrían deberse a un fallo en la calibración del GPS/IMU.

Se comprueba la existencia de errores casuales en las coordenadas X y Z para el límite de error aceptable definido para una escala 1:5.000 en la metodología propuesta, la exigencia en sí de la exactitud tiene consecuencia importante debido a que los límites de exactitud se definen en base a las exigencias requeridas en los proyectos; por tanto, estos resultados obtenidos se adecuan dentro de los límites para una escala 1:10.000.

Respecto de los resultados del test NSSDA al 95% de nivel de confianza, se ha verificado para planimetría (XY) una exactitud de 1.691 m. En altimetría (Z), el test ha comprobado una exactitud de 2.419 m., ni en planimetría ni en altimetría existen puntos que superen el valor por NSSDA, por lo que el ratio de incertidumbre es conforme. Cabe indicar, que no se ha eliminado puntos en el cálculo NSSDA, éste hecho denotaría que la selección de elementos en los que posicionar los puntos ha sido la correcta; sin embargo, los resultados obtenidos son 2 veces más que la tolerancia por la metodología del PNOA. Independientemente de los resultados, sería de utilidad hacer otro análisis con un mayor número de muestras para contrastar la variación en esta fase.

Según los resultados de los análisis de precisión posicional, los errores en las coordenadas X,Y,Z están en el orden de 0.469, 0.219 y 0.466 m., respectivamente homologado a nivel nacional corresponde a una escala cartográfica 1:10.000 y a nivel de América del Sur a escala 1:5.000 (ortofoto). En ambos casos para un tamaño de pixel de 0.50 m., la precisión para la orientación externa es que sea menor de 0.500 m., no siendo necesario utilizar puntos de apoyo, ni estaciones de referencia. Sin embargo, se comprueba que para obtener precisión escala 1:5.000, tamaño de pixel (ortofoto) de 0.25 se requiere apoyo de campo donde la precisión esperada para la orientación externa este por debajo de 0.250 m.

FASE 3.- Modelo digital del terreno

En la fase del modelo digital del terreno se analizaron un total de 27 muestras para la coordenada Z.

En los puntos comprobados, tanto en los datos LIDAR y MDT grid (Ascii de Arcinfo), la variabilidad de Z es similar para ambos conjuntos de datos como se observa en los estadísticos de dispersión. La diferencia mínima está en el rango de 0.020 a 0.012 m. y las diferencias máximas en el rango de 1.440 a 1.402 m.

Los resultados arrojan errores medios cuadráticos del orden de 0.611 para los datos LIDAR y del orden 0.599 para el MDT grid, los cuales concuerdan plenamente con lo esperado para la metodología propuesta.

Tras los análisis con el test NMAS, los resultados estadísticos arrojan medias que están en el orden de 0.527 a 0.534 m. y la desviación estándar de 0.374 a 0.611 m., encontrándose estos dentro del límite de error máximo exigidas por el NMAS en altimetría. La corrección del error vertical en un punto cualquiera actuando sobre la coordenada horizontal, solo está recomendado en superficies de fuerte pendiente.

En el test EMAS/ASPRS, tanto en las comparativas de datos LIDAR y MDT grid, se detectaron errores de sistematismos en la coordenada Z que superan las exigencias de la primera verificación EMAS. Por tanto, al igual que en la fase anterior existen desplazamientos que podrían ser por causa de la calibración del sistema GPS/IMU.

Sin embargo, no se detectaron errores casuales en ninguna de las coordenadas, encontrándose dentro de los límites máximos exigidos en la metodología propuesta, dando cumplimiento así a la segunda verificación EMAS.

La desviación estándar del EMAS arroja valores similares tanto para datos LIDAR y MDT grid siendo uniforme y con poca variabilidad. Algunas versiones del EMAS prefieren utilizar el valor de RMSE más que el límite de error aceptable para simplificar procesos siempre y cuando la desviación estándar fuera similar al RMSE.

Según el test NSSDA al 95% de nivel de confianza, se ha comprobado para altitud (Z) una exactitud en los datos LIDAR del orden de 1.198 m. y en el MDT grid del orden de 1.174 m. En ambos casos existen 2 puntos de la muestra que superan los valores comprobados, por lo que el ratio de incertidumbre es de 7.03% y resultan no conformes. En este cálculo no se ha suprimido puntos por considerarse correctos y

porque su influencia en el incremento del error sería mínima, ya que se supera el valor comprobado sólo en 0.242 m y cumple con la exigencia de la tolerancia de error máximo establecido en metodología propuesta. Sin embargo, es importante mencionar que el NSSDA al basarse en el RMSE es muy sensible a los valores atípicos.

En el test de la fórmula de Koope los errores medios en la Z del LIDAR, así como en el MDT grid (paso de malla 5 m.) considerando la pendiente media del terreno (19.12°), muestran que se produce un incremento en el error del orden de 0.158 y 0.260 m., respectivamente con precisiones del orden de ± 0.305 y ± 0.303 . Por lo tanto, se puede decir que los errores esperados en el MDT grid son similares a los obtenidos en los datos LIDAR.

Los resultados obtenidos a nivel nacional corresponden a una escala cartográfica 1:5.000, tamaño de pixel de 0.25 m. la precisión esperada en altimetría (Z) es 1.000 m. A nivel de América del Sur corresponde a escala 1:5.000, tamaño de pixel de 0.50 m. (ortofoto), donde se espera una precisión de 1.250 m., para la misma escala y tamaño de pixel de 0.25 m. (cartografía), y como precisión máxima se espera 3.000 m., aunque los errores encajan dentro de los umbrales para altimetría. El modelo digital del terreno en la siguiente fase obtiene una precisión a escala 1:10.000 (nivel nacional) por lo que el error máximo esperado en Z para esa escala está en el orden de 2.000 m.; por tanto, se puede decir que sería posible realizar una caracterización de elementos con mayor detalle.

FASE 4.- Ortofotos

Para la fase de ortofoto se analizaron una muestra de 29 puntos en las coordenadas XY.

En la muestra de puntos de control la variable Y presenta mayor variabilidad, siendo Y 1.840 veces más que X, nos conduce a este razonamiento los estadísticos de dispersión (desviación estándar y varianza). Las diferencias mínimas que se presentan están en el orden de 0.024 y 0.002 m. para X e Y, respectivamente y las máximas están en el orden de 1.188 y 1.847 m. para X e Y respectivamente no superando en ambos casos los 2.000 m. máximos establecidos en el pliego técnico. Por tanto, no se ha eliminado ningún punto por existencia de errores groseros.

En los resultados de los análisis del test NMAS, la desviación estándar está en el orden de 0.486 m., el error medio cuadrático en el orden de 1.111 m, resultados que duplican el error máximo tolerable en la metodología propuesta y por tanto, no cumple el NMAS. Estos resultados podrían deberse a la influencia por la limitación del muestreo utilizado, es decir el estándar nos dice como requisito utilizar puntos de fácil determinación (tanto en la imagen como en la fuente de comparación), esto nos condiciona a introducir mediciones con un grado de dependencia (en este caso siempre ha sido cota terreno) que serán diferentes a las de otro observador.

En los resultados del EMAS/ASPRS se detectaron errores de sistematismo para ambas coordenadas, siendo superior a las condiciones de la primera verificación EMAS, al igual que en los casos anteriores se debería a un fallo en la calibración del GPS/IMU.

De otra parte, se comprueba que no existen errores casuales en ninguna de las coordenadas, los errores se encuentran dentro del rango de límites máximos en la metodología propuesta, cumpliendo así la segunda verificación EMAS exigida.

Las diferencias en los resultados del EMAS, entre las ubicaciones de cada muestra sobre la ortofoto y la fuente de mayor exactitud, vienen a ser las distancias que existen sobre el terreno y están en el orden de 0.288 y 0.530 m.

Mediante el test NSSDA al 95% de nivel de confianza para planimetría (XY) se ha comprobado una exactitud de 1.074 m., de 29 puntos evaluados existen 2 puntos que superan el valor NSSDA, por lo que el ratio de incertidumbre es de 6.55% y resulta no conforme. En estos cálculos no se ha eliminado los puntos que superan los valores comprobados para el test por encontrarse dentro del nivel de confianza. Sin embargo, el nivel de exactitud posicional en planimetría es 2 veces más que el PNOA, por lo tanto sería conveniente disponer de un mayor número de puntos en el control de calidad para manejar diversas opciones y que permitan disponer de diferentes configuraciones hasta obtener aquella que nos ofrezca mejor resultado.

Según los resultados obtenidos los errores medios cuadráticos están en el orden de 0.474 m en X y 0.960 m. en Y, a nivel nacional estos errores corresponden a una escala cartográfica 1:10.000, GSD vuelo de 0.450 m., GSD_{OF} de 0.50 m., para lo cual se espera una precisión en planimetría de 1.000 m. Para América del Sur los errores se homologan a una escala 1:5.000 GSD, vuelo de 0.42 m., GSD_{OF} de 0.50 m. siendo la precisión esperada de 1.500 m.

De los resultados obtenidos y de lo esperado se puede decir que a nivel nacional sería posible realizar una ortofoto a escala 1:5.000, GSD_{OF} de 0.25 m. a partir de GSD vuelo de 0.225 m. pero precisión escala 1:10.000 (RMSE menor de 1.000 m.)

En el caso de América del Sur sería posible realizar una ortofoto a escala 1:2.500, para un GSD_{OF} de 0.25 m. a partir de GSD vuelo de 0.28 m pero precisión escala 1:5.000 (RMSE menor de 1.500 m.). En ambos casos con esa resolución posibilitaría un alto nivel de representación en actividades de planificación de zonas rurales.

8.- CONCLUSIONES

8. CONCLUSIONES

La posibilidad de combinar los sistemas cámara digital y LIDAR hace posible disponer de una fuente de información enorme y obtener diversos productos derivados como MDT, MDS, MDSO y ortofotos (RGB, CIR) de forma automática con precisiones coherentes con lo esperado.

Los diferentes test empleados (NMAS, EMAS/ASPRS, NSSDA, KOPPE) en los análisis de calidad posicional en las fases de obtención de ortofotos han demostrado ser eficaces con datos PNOA como fuente de mayor exactitud. El NMAS relaciona escala nominal con exactitud y muestra que los productos superan el límite de error máximo establecido para escala 1:5.000 y por tanto, no cumplen con el test NMAS excepto en la fase de modelo digital del terreno.

El EMAS / ASPRS ha permitido detectar argumentos de sistematismos por fallo de la calibración de los instrumentos GPS/INS en todas las fases. De otra parte los productos no presentan errores casuales en planimetría y por tanto, se cumple la verificación exigida por el EMAS.

Con respecto al NSSDA es importante aclarar que este test no rechaza o acepta un producto simplemente declara su exactitud. Los errores constatados en todos los productos y considerando criterio del test utilizado en lo referente a planimetría no sería adecuada para la escala 1:5.000, por el contrario si lo sería para altimetría.

El test de la fórmula de Koppe, específico para determinar la precisión altimétrica del MDT teniendo en cuenta la pendiente del terreno, nos muestra un incremento del error medio en 0.158 m.

En cuanto al tamaño de muestras para el control de calidad posicional, los estándares utilizan diversos tamaños pero en general suele ser de al menos 20 elementos de control, aunque recomiendan que sea superior a 20 porque a veces es necesario eliminar algunos puntos por errores groseros.

De forma global de todo el proceso de generación de ortofotos se puede decir que la metodología propuesta es 2 veces peor que la metodología del PNOA. Las precisiones obtenidas corresponden a escalas 1:10.000 y 1:5.000 a nivel nacional y de América del Sur respectivamente, con resolución ortofoto (GSD_{OF}) de 0.50 m. en ambos casos,

por tanto (a nivel nacional) con la metodología propuesta se podría hacer cartografía a escala 1:10.000 aunque con resolución de imagen escala 1:5.000 (GSD vuelo de 0.220).

En el siguiente cuadro se muestran las precisiones esperadas por la metodología propuesta (después de la homologación de resultados) a nivel nacional y de América del Sur.

Fase	Precisión nacional Esc. 1/10.000 GSD _{OF} 0.50	Precisión Sudamérica Esc. 1/5.000 GSD _{OF} 0.50
Vuelo Fotogramétrico - RMSExyz (m)	0.150	0.120
Orientación de imágenes - RMSExyz (m)	0.500	0.500
Modelo digital del terreno - RMSEz (m)	2.000	1.250
Ortofoto - RMSExy (m)	1.000	1.500

Cuadro 6.6.40.- Precisiones esperadas escala 1:10.000 (nacional) y escala 1:5.000 (América del Sur).
Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos en los análisis, el método PPP con datos de efemérides estaría indicada para el cálculo de los centros de proyección del vuelo fotogramétrico en zonas con escasa densificación de estaciones de referencia terrestre, ya que se alcanzan precisiones cercanas a la verdadera.

Para la orientación de imágenes de los resultados se deduce que sería necesario utilizar puntos de apoyo para obtener precisiones a escala 1:5.000 (nivel nacional) en las orientaciones externas (RMSE menor de 0.25 m.); mientras que, para obtener precisiones a escala 1:10.000 solo sería necesario utilizar estaciones GNSS.

En los modelos digitales del terreno a partir de LIDAR, el método PPP ofrece alta definición del modelo y permite obtener ortofoto de forma rápida y calidad esperada. Las precisiones en los MDT grid y datos LIDAR son coherentes y esperadas para el sistema LIDAR con estas densidades de puntos, están en el orden de 0.599 a 0.611 m. (en altimetría) en el mejor de los casos.

En cuanto a la ortofotografía, se elaboraron con mayor rapidez, con las nuevas técnicas y métodos establecidos en la metodología propuesta. Las precisiones en las ortofotos dependen de la densidad de los puntos del MDT, así como de los parámetros de orientación externa por orientación directa. Los resultados muestran la posibilidad de generar una ortofoto a escala 1:5.000 (GSD_{OF} de 0.25 m.), resolución de imagen

de 0.225 m. pero precisión a escala 1:10.000 a nivel nacional. Realizando una homologación para el caso de América del Sur sería posible obtener una ortofoto a escala 1:2.500 (GSD_{OF} de 0.25 m.), resolución de imagen de 0.280 m. y precisión esperada escala 1:5.000.

La metodología propuesta se podría utilizar en proyectos de terrenos de difícil acceso (por diferentes motivos, conflictividad social, bélica, zonas muy abruptas, selva, desiertos, nubes permanentes, etc.) a escala 1:10.000 aunque con resolución de imagen a escala 1:5.000 para un mayor detalle, es decir:

- En ortofoto, resultaría de utilidad para identificación e interpretación de elementos naturales, caminos para guiones turísticos rurales, etc.
- En cartografía /GIS se podría utilizar en un catálogo de objetos y tamaños mínimos de representación.

Finalmente la metodología propuesta, permitiría automatizar la producción de ortofotos, incrementando el volumen de producción, abaratando costes y eliminando limitaciones a terrenos de difícil acceso. En particular, se podría utilizar en América del Sur en proyectos de ingeniería en zonas rurales como ordenación de territorio, sistemas de información, gestión de tierras, actualización de zonas, etc.

9.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Después del desarrollo de ésta tesis y tras los resultados obtenidos han surgido nuevos problemas y por lo tanto nuevas líneas de investigación en éste área de conocimientos orientados a países de América del Sur que quedan abiertas para futuras tesis doctorales que podrían ser las siguientes:

VUELO FOTOGRAMÉTRICO

Una de las dificultades a la hora de efectuar el plan de vuelo de los proyectos en América del Sur es debido a las condiciones meteorológicas (manto de nubes demasiado bajo) que dificulta la toma de fotografías aéreas con especificaciones técnicas de nubosidad pre determinadas, llegando a tardar meses en ocasiones, y como consecuencia el retraso de los proyectos.

En ese sentido sería interesante realizar estudios variando los parámetros de altitud del vuelo, horario, dirección de pasadas, etc.

Se deben estudiar nuevas tecnologías y técnicas que minimicen los problemas de nubosidad. Aunque ya han surgido determinados sistemas comerciales como, IFSAR, GEOSAR, LIDAR, para eliminar este tipo de problemas sin perder fiabilidad y calidad de los datos pero aún queda por realizar investigaciones.

GPSD/INS

Sería también interesante realizar un estudio de costes utilizando GPSD/INS (orientación directa) sin estaciones de referencia terrestre, con estaciones de referencia terrestre frente a las técnicas tradicionales de orientación indirecta.

En la actualidad en los países de América del Sur no existe una red de estaciones de referencia GPS densificada como para añadir costos de situar estaciones móviles terrestres. Por lo tanto se podría comparar lo que supone establecer estaciones de referencia en el área de estudio frente a eliminar el costo de apoyo de campo o tener que comprar datos de las estaciones más cercanas al proyecto.

La aportación de ésta investigación supondría un interesante desarrollo en el estudio económico en un proceso de producción de ortofotos.

Otro punto interesante a investigar puede ser el establecimiento preciso de calibración del sistema GPS/INS_cámara/LIDAR, es decir se deben estudiar nuevas técnicas y metodologías que permitan reducir la dificultad que supone el correcto alineamiento de los sistemas y conseguir la calibración periódica de todo el equipo.

LIDAR

Un sector donde se puede investigar sería en el aseguramiento de la calidad de los datos LIDAR. En la actualidad están desarrolladas las herramientas de control de calidad, sin embargo no existe un procedimiento estándar de trabajo para hacer el ajuste relativo y absoluto de datos LIDAR, ni las herramientas adecuadas para hacerlo de forma objetiva y eficiente.

De tal forma sería un aporte importante establecer una metodología estándar, ya que en la actualidad existen diferentes metodologías utilizadas que son fruto de la experiencia, unas mejores que otras pero sobre todo, esto significa que se carece de una metodología estándar de ajuste.

ORTOFOTOS

Dado que las precisiones obtenidas en el presente estudio han cumplido las expectativas esperadas para la zona de Cáceres (España) sería interesante dar continuidad a la presente investigación y realizar un estudio in situ (una zona de América del Sur), mediante la aplicación de la metodología propuesta para ver los resultados que se obtienen bajo condiciones reales y comparar con las precisiones esperadas por la metodología, ya que al ser zonas diferentes permitiría identificar para esas condiciones si existen factores que influyen o no en los resultados.

CONTROL DE CALIDAD POSICIONAL

Otro de los puntos interesantes a investigar sería en realizar un análisis de sensibilidad de la metodología propuesta incrementado el número de muestras, variando la distribución de la misma (siempre en cota terreno) para comprobar las precisiones y validar los resultados.

10.- BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Abedinia, A., Hahn, M., & Samadzadegan, F. (2008). An investigation into the registration of LIDAR intensity data and aerial images using the SIFT approach. *ratio* (first, second), 2, 6.
- Ackermann, F., & Schade, H. (1993). Application of GPS for aerial triangulation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(11), 1625-1632.
- AeroLaser System (2009). Conceptos del sistema Aerolaser. Documento técnico. http://www.aerolaser.es/descargas/00_AEROLASER_Conceptos.pdf (consultado: 06/02/2014)
- Agea, Z. (2011). Análisis de soluciones GPS mediante PPP en la determinación de series temporales. Universidad de Jaén.
- Ariza, F. J. (2002). *Calidad en la producción cartográfica*. Madrid. Editorial RaMa.
- Awrangjeb, M., Ravanbakhsh, M., & Fraser, C. S. (2010). Automatic detection of residential buildings using LIDAR data and multispectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(5), 457-467.
- Berné, J. L., & Priego de los Santos, E. (2004). Estaciones de referencia permanentes GPS en España. *Mapping: Map and Sig consulting*, (94), 16-25.
- Bretar, F., Chauve, A., Bailly, J. S., Mallet, C., & Jacome, A. (2008). Terrain surfaces and 3D landcover classification from small footprint full-waveform LIDAR data: Application to badlands.
- Brown, R. G. & Hwang, P. (1997). *Introduction to random signals and applied Kalman filtering*. New York. Editorial John Wiley & Sons. Tercera edición.
- Buján, S., González, E., Barreiro, L., Santé, I., Corbelle, E., & Miranda, D. (2013). Classification of rural landscapes from low-density LIDAR data: is it theoretically possible?. *International Journal of Remote Sensing*, 34(16), 5666-5689.

- Cai, J., & Miklavcic, S. (2011). The generation of digital terrain models from LIDAR data using seeding and filtering and its application to flood modelling. In *Multimedia Technology (ICMT), 2011 International Conference on* (pp. 5622-5625). IEEE.
- Cebrián, J., & Mark, D. (1986). *Modelos topográficos digitales. Métodos Cuantitativos en Geografía: Enseñanza, investigación y planeamiento.*
- Chen, L. C., Teo, T. A., Shao, Y. C., Lai, Y. C., & Rau, J. Y. (2004). Fusion of LIDAR data and optical imagery for building modeling. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35(B4), 732-737.
- Cheng, L., Gong, J., Chen, X., & Han, P. (2008). Building boundary extraction from high resolution imagery and LIDAR data. *ISPRS08*, p. B3b, 693.
- CNIG. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscar.do> (consultado: 02/02/2014)
- Colomer, J. L. (2005). *Cámaras fotogramétricas digitales, altímetros láser y captadores hiperespectrales: una nueva generación de sensores aerotransportados para la geoinformación.* Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona, España.
- Cramer, M., & Tuttgart, S. (1999). Direct geocoding-is aerial triangulation obsolete?.
- Cramer, M. (2001). Performance of GPS/inertial solutions in photogrammetry.
- Disa, N. M., Hashim, K. A., Ahmad, A., & Samad, A. (2012). A study on qualitative assessment of LIDAR based digital orthophotos generation. In *System Engineering and Technology (ICSET), 2012 International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- Disa, N. M., Maarof, I., Abd Latif, Z., & Samad, A. M. (2011). LIDAR: A review on generating digital true orthophoto. In *Signal Processing and its Applications (CSPA), 2011 IEEE 7th International Colloquium on* (pp. 336-340). IEEE.
- Felicísimo, A. (1994). *Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación a las ciencias ambientales.* España. Editorial Pentalfa.

- Gómez, A., Delgado, J., & Pérez, N., (2005). Obtención de DTM y DSM mediante tecnología LIDAR. Aplicación al Río Ebro. En XVII Congreso Internacional INGEGRAF XV ADM, Sevilla, España, (01--03/06/2005).
<http://www.ingegraf.es/pdf/titulos/COMUNICACIONES%20ACEPTADAS/T14.pdf>
(consultado: 06/02/2014)
- Gonçalves, G., Seco, L., Reyes, F., & Miranda, D. (2008). Land cover classification of rural areas using LIDAR data: a comparative study in the context of fire risk. *Proceedings of SilviLaser*, 427-436.
- Grover Brown, R. & Hwang, P. (1997). *Introduction to random signals and applied Kalman filtering*. Editorial John Wiley & Sons. Tercera edición.
- GTBibérica S.L. Utilización de observaciones GNSS/INS en vuelos fotogramétricos. Necesidad de puntos de control. <http://www.gtbi.net/wp-content/plugins/gallery/uploads/pdf/5201385112025.pdf> (consultado: 06/02/2014)
- Guana, H., Yub, J., Lia, J., & Luoc, L. (2012). Random forests-based feature selection for land-use classification using LIDAR data and orthoimagery.
- Gunay, A., Arefi, H., & Hahn, M. (2007). Semi-automatic true orthophoto production by using LIDAR data. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International* (pp. 2873-2876). IEEE.
- Habib, A. F., Kersting, J., McCaffrey, T. M., & Jarvis, A. M. Y. (2008). Integration of LIDAR and airborne imagery for realistic visualization of 3D urban environments. In *Proceedings of the International Society for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, (ISPRS Congress)* (pp. 617-623).
- Haralik, R.M. (1999). *Computer & robot vision*. Addison-Wesley.
- Hermosilla, T., Ruiz, L. A., Recio, J. A., & Estornell, J. (2011). Evaluation of automatic building detection approaches combining high resolution images and LIDAR data. *Remote Sensing*, 3(6), 1188-1210.
- Huang, X., Zhang, L., & Gong, W. (2011). Information fusion of aerial images and LIDAR data in urban areas: vector-stacking, re-classification and post-processing approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 32(1), 69-84.

- IGM Ecuador (2006). Especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala (primer borrador).
http://www.igm.gob.ec/site/images/stories/ET_CARTOGRAFIAGENERAL.pdf
(consultado: 15/05/2012)
- IGM Ecuador (2008). Especificaciones técnicas para ortofotos digitales (primer borrador). <http://www.igm.gob.ec/site/images/stories/ortofotos.pdf> (consultado: 15/05/2012)
- IGN Perú (2011). Norma Técnica. Especificaciones técnicas para la producción de cartografía básica oficial escala 1:5000.
http://www.ign.gob.pe/?PG=Normas_tecnicas (consultado: 15/05/2012)
- IGS. <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html> (consultado: 04/02/2014)
- INEGI(a).<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx> (consultado: 02/02/2014)
- INEGI(b).<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ortofoto/descripcion.aspx> (consultado: 02/02/2014)
- Jordan M. (2006). Adding new instrumentation to aircraft platforms. Navair 5.1.6.6.
- Jung, F., Paparoditis, N., Bretar, F., & Maillet, G. (2005). Surface and terrain reconstruction from very high resolution imagery: Where are we now?.
- Kokkas, N., & Dowman, I. (2006). Fusion of airborne optical and LIDAR data for automated building reconstruction. Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Reno Nevada, May, 1-7.
- Kunapo, J. (2005). Spatial data integration for classification of 3D point clouds from digital photogrammetry. Applied GIS, 1(3), 26-1.
- Lerma, J. L. (2002). Fotogrametría moderna, analítica y digital. Editor Universidad Politécnica de Valencia.

- Li, Y., Dai, X., Wang, M., & Huang, Z. (2010). An improved filtering method for digital elevation models construction based on LIDAR. In *Geoinformatics, 2010 18th International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Liu, X. (2008). Airborne LIDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31-49.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., & Chandra, S. (2007). LIDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *Geoinformatica*, 11(1), 37-53.
- Lizana, C. (2008). Sistemas de adquisición de imágenes digitales. ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad6/Tema_2_Fotogrametria_Digital_Camaras_digitales_y_Escaner.doc. (consultado: 03/02/2014)
- Maas, H. G., & Kersten, T. (1997). Aerotriangulation and DEM/orthophoto generation from high-resolution still-video imagery. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 63(9), 1079-1084.
- Miguelsanz, P. (2004). *Apoyo aéreo cinematográfico y aerotriangulación digital frente a los sistemas de navegación inercial: Análisis de precisiones*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Paparoditis, N., Souchon, J. P., Martinoty, G., & Pierrot-Deseilligny, M. (2006). High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 60(6), 400-412.
- PNOA España (2010a). Especificaciones técnicas para vuelo fotogramétrico digital con vuelo LIDAR. Tamaño de pixel 0.25 m. ftp://ftp.pnoa.ign.es/1.Dossier_PNOA_2010/1.1.Especificaciones_tecnicas/ (consultado: 12/09/2011)
- PNOA España (2010b). Especificaciones Técnicas para postproceso de vuelo fotogramétrico digital con vuelo LIDAR. Tamaño de Pixel 0.25 m. ftp://ftp.pnoa.ign.es/1.Dossier_PNOA_2010/1.1.Especificaciones_tecnicas/ (consultado: 12/09/2011)

- Portalés, C. & Lerma, J. L. (2003). Georeferenciación GPS/INS de imágenes aéreas adquiridas con escáneres rotacionales: ejemplo práctico y resultados. *Topografía y Cartografía*, nº 116, vol. XX, 4-9.
- Posicionamiento preciso - Via web. GMV News, 2009, nº41, 14.
- Qin, Z., Li, W., Li, M., Chen, Z., & Zhou, G. (2003). A methodology for true orthorectification of large-scale urban aerial images and automatic detection of building occlusions using digital surface model. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International (Vol. 2, pp. 729-731)*. IEEE.
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., & Kubik, K. (2003). Building detection using LIDAR data and multispectral images. In *Digital Image Computing: Techniques and Applications (Vol. 2, pp. 673-682)*. CSIRO.
- Ruiz, A., & Kornus, W. (2003). Experiencias y aplicaciones del LIDAR. *V Semana Geomática de Barcelona*, 11(03).
- Santos, L. J. (2005). Ortofoto verdadera (true-orto) y LIDAR, el posible futuro de la cartografía catastral urbana. *CT: Catastro* nº 53, 131-154.
- Santos, L. J. (2006). Cámaras fotogramétricas aéreas digitales. Ventajas e inconvenientes. Influencias en la ejecución de cartografía catastral. *Mapping*, nº 114, 10-25.
- Santos, L. J. (2009). *Aplicaciones de las tecnologías LIDAR, Ground ortho y True ortho en la cartografía catastral urbana*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Schenk, T., & Csathó, B. (2002). Fusion of LIDAR data and aerial imagery for a more complete surface description. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A), 310-317.
- Secord, J., & Zakhor, A. (2007). Tree detection in urban regions using aerial LIDAR and image data. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 4(2), 196-200.

- Smith, M. J., Priestnall, G., & Asal, F. (2000). Combining LIDAR and photogrammetry for urban and rural landscape studies. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, 33, B3.
- Stereocarto (2007). Estudio hidráulico para la prevención de inundaciones y ordenación de las cuencas de los ríos Guadalhorce, Guadiaro, Guadalete y Barbate (Lote II). Informe técnico de uso interno.
- Trinder, J. C., & Salah, M. (2011). Support vector machines: Optimization and validation for land cover mapping using aerial images and LIDAR data. *Laser*, 1(1.064), 1-047.
- Velilla, C. (1999). *Ortofotografía digital: Métodos, precisiones y aplicaciones en la Ingeniería Rural*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Vozmediano, D. (2006). *Fotogrametría digital aplicada a la obtención de ortofotos y modelos digitales de entidades patrimoniales*. Proyecto fin de carrera. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea. Vitoria-Gasteiz.
- Xie, W., & Zhou, G. (2006). Urban 3D building model applied to true orthoimage generation. In 1st EARSeL Workshop on Urban Remote Sensing, Berlin.

11.- ANEXOS

Los anexos se encuentran en formato digital en el CD que se incluye en la tesis. A continuación aparecen los que por su interés deben aparecer impresos.

ANEXO I

Metodología propuesta para vuelo fotogramétrico combinado con vuelo LIDAR

Tamaño de pixel: 0.25 m. Densidad de puntos LIDAR: 0.5 puntos/m²

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
1		SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA		
	a	Sistema geodésico de referencia	ETRS89	Todo el trabajo se realizará en el sistema geodésico nacional de referencia ETRS89.
	b	Altitudes elipsoidales	Se utilizarán únicamente alturas elipsoidales referidas a ETRS89 en todos los procesos de cálculo.	
	c	Proyección cartográfica	UTM	Referido al huso correspondiente a cada zona
	d	Huso UTM a emplear	Cada hoja se realizará en su huso. Las hojas que caigan entre dos husos, se entregarán en ambos.	
	e	Distribución de hojas	La distribución 1:5.000 empleada será la división en 8 x 8 de las hojas MTN50 oficiales.	El corte de hojas se obtendrá aplicando un rebase de 50 metros con respecto a las cuatro esquinas teóricas, redondeado a múltiplos de 10 m. Las coordenadas de las esquinas de hoja serán las oficiales aprobadas por la comisión de normas cartográficas. La dirección técnica facilitará los listados de coordenadas correspondientes a: - Esquinas de hojas - Cortes de hojas (con el rebase mínimo)
	f	Modelo de geoide	Para realizar la transformación de cotas elipsoidales a ortométricas, se utilizará el modelo de geoide.	La dirección técnica entregará las herramientas de transformación y los ficheros del modelo de geoide.
2		VUELO FOTOGRAMÉTRICO		
2.1		Cámara fotogramétrica y equipos auxiliares		
	a	Cámara	Fotogramétrica digital.	En las ofertas, se especificarán detalladamente las cámaras (marca y modelo) y accesorios (sensores, conos, plataformas, etc...) que se utilizarán en los trabajos.
	b	Formato de los fotogramas	La imagen pancromática deberá tener unas dimensiones de al menos 10.000 filas, y la imagen multiespectral una resolución al menos 5 veces inferior.	aproximadamente
	c	Campo de visión transversal (FOV)	Mayor de 50° y menor de 80°.	aproximadamente

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	d	Calibración de la cámara	antigüedad ≤ 24 meses	Realizada por el fabricante de la cámara o centro autorizado por el mismo. Las empresas licitantes entregarán copia de los certificados de calibración con las ofertas.
	e	Control automático de la exposición	obligatorio	
	f	Resolución espectral del sensor	- 1 banda situada en el pancromático - 4 bandas situadas en el azul, verde, rojo e infrarrojo cercano.	
	g	Resolución radiométrica	De al menos 12 bits por banda	
	h	Sistema FMC	En las cámaras de formato matricial, será obligatorio. Se admitirá la compensación del avance del avión por medio de Time Delay Integration (TDI) u otros métodos previa consulta y aceptación por parte de la dirección técnica.	Forward Motion Compensation (FMC)
	i	Plataforma giroestabilizada automática	Uso obligatorio	según instrucciones del fabricante de la cámara
	j	Ventana fotogramétrica	- Cristales que cumplan con las recomendaciones del fabricante de la cámara (espesor, acabado y material). - Con sistema amortiguador que atenúe las vibraciones del avión. - No obstruya el campo de visión para el FOV definido y la montura empleada.	según instrucciones del fabricante de la cámara
	k	Sistema de navegación basado en GNSS	Uso obligatorio - Equipo GNSS al menos con doble frecuencia (L1/L2) de al menos 1 ó 2 Hz - Sincronizado con la cámara mediante el registro de eventos - Antena bifrecuencia.	Debe permitir: - 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 En las cámaras matriciales: en caso de la solución GNSS no sea absoluta, será necesaria la realización de pasadas transversales de modo que queden garantizadas las precisiones de orientación absoluta del punto 2.2 del apartado de orientación de imágenes de la metodología para "postproceso de vuelo fotogramétrico digital combinado con vuelo LIDAR"

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	l	Sistema inercial (IMU/INS)	Uso obligatorio - Frecuencia de registro de datos ≥ 200 Hz - Deriva $< 0.1^\circ$ / hora	Debido a la obligatoriedad del uso de sistemas IMU / INS, no será necesario realizar pasadas transversales. En las cámaras matriciales: en caso de fallo del sist. inercial durante el vuelo, será necesaria la realización de pasadas transversales de modo que queden garantizadas las precisiones de orientación absoluta del punto 2.2 del apartado de orientación de imágenes de la metodología para "postproceso de vuelo fotogramétrico digital combinado con vuelo LIDAR"
	m	Efemérides precisas (final) de satélites	Se utilizará datos de efemérides finales determinada por el IGS. Orbitas ~ 2.5 cm. Sat. & est. relojes RMS ~ 75 ps SDev ~ 20 ps	Los datos de efemérides se deberán obtener del IGS, accediendo directamente a través de su página web, o descargada por medio de un software con acceso directo a la página del IGS.
2.2	Vuelo y cobertura fotográfica			
	a	Planificación del vuelo	La empresa adjudicataria entregará la planificación del vuelo antes de realizarlo.	La dirección técnica podrá hacer observaciones a dicha planificación.
	b	Fechas	El vuelo se realizará bajo condiciones meteorológicas que no afecten a la operatividad del sistema y que la altura del sol sea $> 30^\circ$.	La dirección técnica determinará el rango de fechas óptimas y fechas aceptables para cada zona de vuelo en función de las condiciones agroclimáticas y fenológicas de dicha zona.
	c	Horario	Tal que la altura del sol sobre el horizonte sea ≥ 30 grados sexagesimales	Evitar horas que propicien reflexiones especulares y "hot spot" en la zona útil de cada fotograma.
	d	Condiciones meteorológicas	- Tiempo claro, sin nubes, niebla, bruma, nieve, zonas inundadas y en general cualquier condición meteorológica adversa. - Evitar condiciones atmosféricas extremas que impidan cumplir con los parámetros geométricos exigidos para el vuelo fotogramétrico.	
	e	Tamaño de pixel y altura de vuelo	Se realizará cada pasada a una altura de vuelo tal que se cumplan simultáneamente estas dos condiciones: 1) El tamaño de pixel medio para toda la pasada será de 0.22 m ± 10 %. 2) No habrá más de un 10 % de fotogramas en cada pasada con pixel medio del fotograma mayor de 0.25 m	En zonas montañosas con fuertes pendientes, estos porcentajes se podrán variar, siempre previa aprobación de la planificación de vuelo por la dirección técnica.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	f	Dirección de las pasadas	Dirección este - oeste (siguiendo paralelos) Se podrán proponer otras configuraciones de vuelo diferentes a la dirección técnica, la cual decidirá si son viables las propuestas realizadas	No se permitirán discrepancias > 3° entre pasadas consecutivas
	g	Recubrimiento longitudinal	61% - En zonas de montaña y de costa, y en función del análisis de la planificación del vuelo, se podrá tomar la decisión de incrementar el recubrimiento longitudinal para evitar zonas sin estereoscopia.	- Variaciones admitidas +/-3% - En ningún caso quedarán zonas sin recubrir estereoscópicamente.
	h	Recubrimiento transversal	≥25% medio En zonas montañosas, se aumentará el número de pasadas o se realizarán pasadas intercaladas de forma que en ningún punto del fotograma el recubrimiento sea inferior al 20%.	- Margen de recubrimiento mínimo del 15% en el extremo norte y sur de la zona de trabajo.
	i	Número de pasadas por hoja MTN25	- Uniformemente distribuidas por hoja MTN25 en toda la zona a volar. - El recubrimiento transversal resultante no debe ser inferior al 25 %.	En zonas de montaña, y en función del análisis de la planificación del vuelo, se añadirán pasadas intercaladas, y/o se aumentarán el número de pasadas por hoja MTN25 a 5 ó 6.
	j	Longitud máxima de una pasada longitudinal	3 hojas MTN50	No se realizarán pasadas más largas para evitar variaciones cromáticas excesivas en los mosaicos y disminuir los efectos de la proyección UTM en el ajuste del bloque.
	k	Pasadas interrumpidas	En cámaras de formato matricial, deberán conectarse al menos con 4 fotogramas comunes. En cámaras de barrido lineal, deberán conectarse al menos con una longitud equivalente a 1 ancho de traza en todos los ángulos de toma (escenas frontal (forward), trasera (backward) y nadiral (nadir)).	Para garantizar al menos 2 pares estereoscópicos comunes. Ambas tomas se deberán realizar con la misma cámara.
	l	Superficie de agua en cada fotograma	< 20%	Cuando sea necesario se incrementará el recubrimiento longitudinal de algunas fotos o el transversal de alguna pasada. Esta limitación no se aplicará a fotografías del extremo de la pasada sobrantes que no intervengan en la orientación de imágenes y que puedan estar georeferenciadas con garantías empleando GNSS/INS.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	m	Desviaciones de la trayectoria del avión	< 20 m de la planificada	En el caso de realizar vuelo simultáneo con LIDAR, las desviaciones deberán ser <15 m.
	n	Desviaciones de la vertical de la cámara	< 4°	grados sexagesimales
	o	Diferencias de verticalidad entre fotogramas consecutivos	< 5°	grados sexagesimales
	p	Deriva no compensada	< 3°	grados sexagesimales
	q	Cambios de rumbo entre fotogramas consecutivos	< 3°	grados sexagesimales
2.3 Toma de datos GNSS en vuelo				
	a	Precisión de postproceso de la trayectoria	RMSE ≤10 cm (X,Y,Z)	Precisión aplicable al cálculo de los centros de proyección del vuelo fotogramétrico. En el caso de que los centros de proyección no hayan podido ser medidos correctamente durante el vuelo, para calcular las coordenadas del centro de proyección de cada fotografía a partir de las coordenadas de la antena, se incorporará el vector excentricidad de la antena (offset) al cálculo de orientación de imágenes.
2.4 Procesado de los datos GNSS e IMU				
	a	Procesado de la trayectoria	Se procesará cada pasada, por la técnica de orientación directa (GPS/INS). Se deberá asegurar que se cumple con la precisión indicada en el punto 2.3	Se necesitará añadir datos de efemérides precisas en el cálculo.
	b	Orientaciones externas	Se determinarán las orientaciones externas (posición y orientación) de cada imagen, por orientación relativa mediante ajuste en bloque con datos de efemérides precisas sin puntos de apoyo.	Las alturas obtenidas deberán ser elipsoidales que posteriormente se transformarán a ortométrica.
	c	Precisión de los ángulos de actitud	La precisión angular en la determinación de la actitud para vuelos con (GPS/INS), no debe conducir a errores angulares superiores a 0.005° (omega y phi) y 0.010° (kappa).	

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
2.5 Procesado de las imágenes digitales				
	a	Radiometría	Las imágenes procesadas deben hacer un uso efectivo de todos los bits según cada caso. Se evitará la aparición de niveles digitales vacíos en el caso de la imagen de 8 bits. No se admitirán imágenes que tengan una saturación superior a 0.5% para cada banda en los extremos del histograma.	
	b	Orientación (dirección) de las imágenes.	Pasadas este - oeste: Los ficheros TIFF mantendrán la orientación original de la toma fotográfica, debiendo contener los ficheros TFW los parámetros de la orientación del fotograma. En las pasadas este-oeste, el borde superior de las imágenes de fotogramas en formato comprimido (ECW) será el más próximo al norte, debiéndose aplicar un giro de 180° a las imágenes que no cumplan este requisito. El giro será de 180° para evitar que aparezcan cuñas blancas en la imagen, si se aplica el correspondiente a los parámetros de orientación.	
2.6 Productos a entregar del vuelo fotogramétrico				
	a	Planificación del vuelo	1) Bases de datos access según el modelo proporcionado por la dirección técnica, con la información correspondiente a líneas de vuelo, fotogramas, coordenadas de puntos principales. 2) Shape generado a partir de la base de datos correspondiente a la zona de vuelo, que contenga las siguientes capas (formato shapefile). - Puntos principales, asociados a la base de datos del vuelo, con su número de fotograma respectivo. - Huellas de fotogramas, asociados a la base de datos del vuelo, con su número de fotograma respectivo.	Se proporcionará una planificación de vuelo con un software específico que programe los centros de todas las imágenes y el resto de las características del vuelo, de acuerdo con las especificaciones del presente pliego.
	b	Gráficos y datos del vuelo realizado	1) Bases de datos access según el modelo proporcionado por la dirección técnica, con la información correspondiente a líneas de vuelo, fotogramas, coordenadas de puntos principales. 2) Shape generado a partir de la base de datos correspondiente a la zona de vuelo, que contenga las siguientes capas. - Puntos principales, asociados a la base de datos del vuelo, con su número de fotograma respectivo. - Huellas de fotogramas, asociados a la base de datos del vuelo, con su número de fotograma respectivo.	

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	c	Ficheros GNSS-IMU del vuelo originales y procesados	- Ficheros RINEX del receptor GNSS conectado a la cámara, con el registro de eventos correspondiente, fichero de registros IMU y ficheros resultantes del procesado GNSS-IMU.	- Sincronizados los tiempos de observación, con intervalo máximo de 1 segundo.
	d	Fotogramas digitales de 8 bits en formato TIFF	- Ficheros de 4 bandas rojo, verde, azul, infrarrojo cercano, con máxima resolución geométrica, después del <i>pansharpening</i> si fuera necesario, en ficheros de 8 bits.	Como alternativa, de acuerdo con la dirección técnica, se admitirá: - 1 fichero de 3 bandas RGB (color natural) + 1 de banda NIR (infrarrojo cercano), ó - 1 ficheros de 3 bandas RGB + 1 fichero de 3 bandas IRG (color falso)
	e	Ficheros TFW de georeferenciación aproximada de cada fotograma digital de 8 bits	- Para cada fichero de imagen digital, se calculará un fichero TFW de georeferenciación aproximada del mismo, basándose en los datos de GNSS /IMU de vuelo (ETRS89). - El tamaño de pixel de cada imagen será el promedio del tamaño de pixel de toda la pasada. - La georeferenciación se realizará en proyección UTM, en el huso en el que se encuentre la hoja MTN50 a la que corresponda el fotograma. - El fichero TFW contendrá los parámetros de orientación de la imagen para visualizarla con su orientación correcta.	- El cálculo del TFW aproximado se realizará teniendo en cuenta la posición (X,Y,Z) del punto de disparo, la altitud del punto nadiral y el tamaño de pixel. (Su utilidad es múltiple: control de recubrimientos, ubicación rápida de fotogramas digitales, etc...) - Estos ficheros se entregarán junto con los fotogramas digitales, tan pronto como estén disponibles, para permitir la utilización del vuelo.
	f	Fotogramas RGB en formato ECW georeferenciado	Se entregará una versión de cada fotograma, a plena resolución, comprimido en formato ECW, procedente del fotograma digital de 8 bits del apartado 2.6.d. El ECW tendrá una georeferenciación aproximada, y un factor de compresión nominal de 1:10	El fichero ECW contendrá en la cabecera la información del sistema geodésico de referencia (ETRS89) y de la proyección cartográfica.
	g	Base de datos del vuelo	Base de datos access según el modelo proporcionado por la dirección técnica.	
	h	Certificado de calibración de las cámaras y objetivos empleados	Con las ofertas técnicas se entregará una copia - Antes de empezar el vuelo, se entregará una copia y se mostrará el original Que incluya: • Certificado de calibración de la cámara y todos sus objetivos completo y vigente en el momento de la realización del proyecto.	

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	i	Calibración del sistema integrado cámara digital GNSS/ INS	Con las ofertas técnicas se entregará una copia - De la calibración del sistema integrado cámara-GNSS/ INS realizado en un polígono de calibración. - Parámetros de calibración de los sensores cámara-GNSS/ INS utilizados durante la ejecución del proyecto. - Vectores GNSS – cámara-plataforma.	Se entregará a la dirección técnica un nuevo certificado de calibración del sistema integrado, en el caso de que se produzca un cambio de aeronave.
	j	Vectores de excentricidad	Se suministrará el vector de excentricidad de la antena del receptor con respecto a la cámara, incluyendo un gráfico que muestre la dirección de los ejes.	
	k	Informe descriptivo del proceso de vuelo	Según documento (informe vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica.	
3		VUELO LIDAR		
3.1		Sensor LIDAR y equipos auxiliares		
	a	Sensor	Sensor LIDAR.	En las ofertas, se especificará detalladamente el sensor (marca y modelo) y accesorios (sistema GNSS/INS, plataformas, etc...) que se utilizarán en los trabajos y que reunirán las características apropiadas para la correcta ejecución del proyecto.
	b	Campo de visión transversal (FOV)	El máximo FOV permitido para planificar será de 70° efectivos	Se adaptarán a la orografía para garantizar la máxima cobertura con la máxima densidad posible de acuerdo a la dirección técnica.
	c	Frecuencia de escaneado	El sensor tendrá una frecuencia de escaneado mínima de 70 Hz, debiendo alcanzar un mínimo de 40 Hz con un FOV de 70°.	Se adaptarán a la orografía para garantizar la máxima cobertura con la máxima densidad posible de acuerdo a la dirección técnica.
	d	Normas de seguridad. Potencia de pulso.	El vuelo LIDAR operará de acuerdo a las normas de seguridad ocular vigentes, siguiendo las instrucciones y recomendaciones previstas por el fabricante del sensor. Se ajustará adecuadamente la potencia del láser a la altura de vuelo planificada según las especificaciones del equipo.	
	e	Frecuencia de pulso	Mínima de 45 kHz, asumiendo un FOV de 70° y un alcance máximo de hasta 3000 metros.	Se adaptarán a la orografía para garantizar la máxima cobertura con la máxima densidad posible de acuerdo a la dirección técnica.
	f	Resolución espacial. Densidad promedio	El vuelo se planificará a una velocidad adecuada para garantizar un mínimo distanciamiento entre líneas de barrido (amplitud de barrido, o máximo espaciado entre puntos en la dirección de vuelo), que permita obtener de manera homogénea por todo su ámbito la densidad promedio exigida de 0.5 puntos del primer retorno por metro cuadrado. Para el cálculo de la densidad promedio por pasada, se tendrán en cuenta todos los puntos del primer retorno incluidos en la huella de la pasada. Para el cálculo de la densidad mínima, se tendrán en cuenta todos los puntos del primer retorno en tramos de 2 km de la longitud de la pasada. En ningún caso se admitirá una densidad inferior a 0.40 puntos por metro cuadrado.	El cálculo de la densidad promedio se realizará despreciando un 2% del ancho de barrido en cada extremo. La densidad de 0.5 puntos del primer retorno por metro cuadrado implica un espaciado entre puntos ≤ 1.41 m La densidad se comprobará estableciendo una malla de 4 m x 4 m. Salvo casos justificados, en el 95% de los casos, existirá al menos un retorno en cada celda de la malla establecida.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	g	Calibración del sensor	Deberá tener una antigüedad menor de 12 meses, o posterior a la fecha de instalación del equipo, asimismo se verificará in situ mediante una medida de precisión de una zona llana, libre de vegetación, con la misma.	<ul style="list-style-type: none"> - El sensor deberá ser calibrado, probado y certificado por el fabricante o por un centro autorizado. - El certificado deberá estar en vigor durante el periodo de ejecución del vuelo, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. - Debe indicar el procedimiento seguido en la determinación de los valores: IMU misalignment, range offset de cada tarjeta, intensity adjustment. - Cuando hubiera razones para creer que el funcionamiento del equipo no es correcto, éste deberá ser sometido a una nueva calibración.
	h	Resolución radiométrica de intensidades múltiples	Rango dinámico de al menos 8 bits	
	i	Capacidad de detectar múltiples retornos para un mismo pulso	Deberá ser capaz de detectar y registrar hasta 4 retornos para cada pulso con una discriminación en distancia vertical de al menos 4 m.	
	j	Mecanismo de compensación roll	Obligatorio	La nube de puntos obtenida deberá cubrir perfectamente la zona planificada, garantizando uniformidad y asegurando que no existan zonas sin información.
	k	Ventana fotogramétrica	<ul style="list-style-type: none"> - Cristales que cumplan con las recomendaciones del fabricante del sensor (espesor, acabado y material). - Con sistema amortiguador que atenúe las vibraciones del avión. - No obstruya el campo de visión para el FOV definido y la montura empleada. 	Según instrucciones del fabricante del sensor
	l	Sistema de navegación basado en GNSS	Uso obligatorio - Equipo de GNSS doble frecuencia (L1/L2) de al menos 2 Hz	Debe permitir: <ul style="list-style-type: none"> - planificar el vuelo, determinando las trayectorias - navegación en tiempo real - control automático de captura de datos
	m	Sistema inercial (IMU/INS)	Uso obligatorio - Frecuencia de registro de datos ≥ 200 Hz - Deriva $< 0,1^\circ$ / hora	

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
3.2 Vuelo y cobertura de puntos LIDAR				
	a	Planificación del vuelo	La empresa adjudicataria entregará la planificación del vuelo antes de realizarlo, incluyendo pasadas, velocidad y altura de vuelo, ángulo y frecuencia de barrido, distancia entre puntos, ancho de barrido, recubrimiento entre pasadas, etc.. Esta será remitida a la dirección técnica antes de la misión.	La dirección técnica podrá hacer observaciones a dicha planificación.
	b	Fechas	El vuelo LIDAR se realizará bajo condiciones meteorológicas que no afecten a la operatividad del sistema y que puedan degradar su alcance y la precisión esperada. La fecha será preferiblemente simultánea con fotografía aérea.	
	c	Horario	Si se realiza simultáneo con fotografía aérea, tal que la altura del sol sobre el horizonte sea ≥ 30 grados sexagesimales. En caso de realizarse sólo el vuelo LIDAR, el intervalo horario podrá adaptarse a las especificaciones del fabricante y a las normas de aviación civil.	
	d	Condiciones meteorológicas	En general, el vuelo no podrá realizarse cuando exista niebla, nieve, humo, polvo, zonas inundadas o factores medio ambientales que dificulten o degraden la precisión del sensor.	
	e	Velocidad del avión en el momento de captura de los datos LIDAR	La velocidad deberá garantizar un mínimo distanciamiento entre líneas de barrido (amplitud de barrido, o máximo espaciado entre puntos en la dirección de vuelo), que permita obtener de manera homogénea por todo su ámbito la densidad promedio exigida de 0.5 puntos del primer retorno por metro cuadrado. Salvo en masas de aguas, oclusiones o de nula reflexión. Ningún punto del terreno estará más alejado de otro donde haya incidido el pulso del rayo láser, más de 1.5 veces el espaciado promedio entre puntos de la malla (espaciado promedio ≤ 1.41 m. ver apdo. 3.1.f)	
	f	Altura de vuelo	La altura de vuelo se fijará en función de los siguientes parámetros: - Velocidad del avión - Especificaciones de captura de datos del sensor LIDAR - Densidad final de puntos que se pretende obtener.	
	g	Dirección de las pasadas	Dirección este-oeste siguiendo pasadas paralelas (debido a los campos de calibración).	En el caso de realizar vuelo LIDAR independiente, se podrán presentar alternativas, que deberán ser autorizadas por la dirección técnica.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	h	Recubrimiento transversal	Mayor del 15 % medio en zonas de poca orografía. En terrenos con orografía acentuada, se planificará con un recubrimiento tal que se minimicen las oclusiones (95% de visibilidad).	Margen de recubrimiento mínimo del 15% en el extremo superior e inferior de la zona de trabajo.
	i	Número de pasadas por hoja MTN25	Uniformemente distribuidas en toda la zona a volar garantizando que no queden zonas sin cobertura de puntos LIDAR. El recubrimiento transversal resultante debe ser mayor al 15%.	
	j	Longitud máxima de una pasada longitudinal	3 hojas MTN50	La longitud máxima de la pasada vendrá condicionada por la dilución de la precisión de los datos GNSS/IMU.
	k	Pasadas transversales de ajuste altimétrico	Al inicio del proyecto se realizarán pasadas transversales, tomando medidas en una serie de campos de control, que servirán para ajustar las pasadas transversales y longitudinales al terreno.	Los campos de control serán determinados por la dirección técnica, proporcionando los datos necesarios para realizar el ajuste altimétrico.
	l	Longitud máxima de una pasada transversal de ajuste altimétrico	3 hojas MTN50	La longitud máxima de la pasada vendrá condicionada por la dilución de la precisión de los datos GNSS/IMU.
	m	Pasadas interrumpidas	Deberán conectarse al menos con un tramo de pasada común con una longitud equivalente a 1 ancho de traza.	Para garantizar una zona amplia con recubrimiento común
	n	Desviaciones de la trayectoria del avión	< 20 m. de la planificada	En el caso de realizar vuelo simultáneo con LIDAR, las desviaciones deberán ser < 15m.
	o	Desviaciones de la vertical del sensor LIDAR	< 5°	grados sexagesimales
	p	Deriva, cambios de rumbo, falta de verticalidad	No implicarán áreas sin retorno de acuerdo con lo expuesto en el apartado 3.2.e (ningún punto del terreno estará más alejado de otro donde haya incidido el pulso del rayo láser, más de 1.5 veces el espaciamiento promedio entre puntos de la malla). Asimismo, este tipo de incidencias tampoco implicarán zonas con recubrimiento lateral <15°, o densidades promedio inferiores a la planificada.	grados sexagesimales
	q	Zona a recubrir	- La zona a volar cubrirá hojas 1:5.000 completas - Se detalla en gráfico que proporcionará la dirección técnica	- Tendrá un exceso longitudinal equivalente al ancho de barrido - El exceso transversal mínimo será equivalente al recubrimiento transversal
	r	Precisión global horizontal nadiral después del procesado	La precisión global horizontal nadiral después del procesado será inferior a 30 cm RMSE _{x,y} (1 sigma) y la vertical nadiral será inferior a 20cm RMSE _z (1 sigma)	En zonas de vegetación cerrada y pendientes acentuadas, donde se admitirán errores de hasta 3 x RMSE. En los bordes del campo de visión se admitirán precisiones del orden de 2 x RMSE.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	s	Precisión general altimétrica: error medio cuadrático	RMSEZ \leq 0.40 m	
	t	Precisión general altimétrica: error máximo	\leq 0.80 m en el 95% de los casos. No podrá haber ningún punto con un error superior a 1.20 m	
	u	Discrepancia altimétrica entre pasadas	\leq 0.80 m	
3.3 Toma de datos GNSS en vuelo				
	a	Precisión de postproceso de la trayectoria	RMSE \leq 10 cm (X,Y,Z)	
3.4 Procesado de los datos GNSS e IMU				
	a	Procesado de la trayectoria	Se procesará cada pasada, por la técnica de orientación directa (GPS/INS). Se deberá asegurar que se cumple con la precisión indicada en el punto 3.3	Se necesitará añadir datos de efemérides precisas en el cálculo.
	b	Orientaciones	Se determinará la orientación del sensor LIDAR a partir de los datos de la trayectoria (posición y velocidad), por orientación relativa de efemérides precisas sin puntos de apoyo.	
	c	Precisión de los ángulos de actitud	La precisión angular en la determinación de la actitud para vuelos con GNSS/IMU, no debe conducir a errores angulares superiores a 0.005° (balanceo y cabeceo, roll and pitch) y 0.010° (guiñada, yaw).	
3.5 Productos a entregar del vuelo LIDAR				
	a	Planificación del vuelo	1) Bases de datos access según el modelo proporcionado por la dirección técnica, que incluirá las trayectorias de las pasadas, velocidad del avión, altura de vuelo, ángulo y frecuencia de barrido, ancho de barrido, distancia entre puntos y recubrimiento entre pasadas. 2) Shape generado a partir de la base de datos que contenga las siguientes capas: - Trayectorias planificadas y límites laterales de barrido.	Se proporcionará una planificación de vuelo con un software específico que programe todos los datos y características del vuelo LIDAR, de acuerdo con las especificaciones del presente pliego.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	b	Gráficos y datos del vuelo realizado	<p>1) Bases de datos access según el modelo proporcionado por la dirección técnica, que incluirá las trayectorias de las pasadas, velocidad del avión, altura de vuelo, ángulo y frecuencia de barrido, ancho de barrido, distancia entre puntos y recubrimiento entre pasadas.</p> <p>2) Shape generado a partir de la base de datos que contenga las siguientes capas - Trayectorias planificadas y límites laterales de barrido.</p>	
	c	Ficheros GNSS-IMU del vuelo originales y procesados	Ficheros RINEX del receptor GNSS conectado al sensor LIDAR, fichero de registros IMU y ficheros resultantes del procesado GNSS-IMU.	<p>- Se suministrarán los ficheros IMU en el formato propio que se hayan generado y en formato de intercambio a establecer por la dirección técnica.</p> <p>- Sincronizados los tiempos de observación</p>
	d	Ficheros de la trayectoria del sistema LIDAR	<p>- Un fichero por pasada</p> <p>- Formato ASCII, txt de acuerdo con el modelo entregado por la dirección técnica</p>	
	e	Ficheros ajustados LAS del vuelo sin clasificar	<p>- Los ficheros procederán de los datos originales de vuelo, ajustados al terreno con las pasadas transversales.</p> <p>- El corte de los ficheros se realizará de acuerdo con cuadrados UTM de 2 x 2 km</p> <p>- Los puntos de intensidad <4 se clasificarán en la clase 7 (ruido).</p>	<p>El formato de los ficheros será LAS versión 1.1 formato 1, indicando en el campo user_data el identificador de la pasada. En el fichero LAS se deberá recoger todos los parámetros definidos en el estándar establecido para este tipo de ficheros (por ejemplo, se incluirán parámetros como el tiempo GNSS, la intensidad del pulso devuelto, el número de retornos, el ángulo de escaneo...)</p> <p>El fichero LAS deberá disponer de las coordenadas X, Y (UTM huso correspondiente) y h (elipsoidal), en el sistema geodésico de referencia oficial para el ámbito del trabajo.</p>
	f	Gráfico de distribución de los cortes de ficheros LAS de 2 x 2 km	Fichero shape	
	g	Mapa de las zonas sin representación LIDAR	Se entregará un fichero en formato shp o dxf con la delimitación de las zonas en las que no se ha obtenido datos LIDAR.	
	h	Certificado de calibración del sensor LIDAR	<p>- Con las ofertas técnicas se entregará una copia</p> <p>- Antes de empezar el vuelo, se entregará una copia y se mostrará el original que incluya:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Certificado de calibración del sensor LIDAR, vigente en el momento de la realización del proyecto. • Vectores GNSS - sensor LIDAR 	

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	i	Calibración del sistema integrado sensor LIDAR-GNSS/ INS	<p>Con las ofertas técnicas se entregará una copia</p> <ul style="list-style-type: none"> - De la calibración del sistema integrado (sensor LIDAR-GNSS/INS) realizado en un polígono de calibración. - Parámetros de calibración de los sensores LIDAR-GNSS/INS durante el proyecto. <p>Una vez realizado el vuelo de calibración se entregarán además:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Una memoria del vuelo de calibración en la que se describa la metodología empleada, los datos obtenidos en el ajuste, software empleado para realizarlo, la situación de la zona de calibración, de los puntos de control terreno empleados y estaciones de referencia GNSS utilizadas. - Datos de las trayectorias - Datos LAS - Fichero shape con situación de la zona de calibración, de los puntos de control terreno 	Se entregará a la dirección técnica un nuevo certificado de calibración del sistema integrado, en el caso de que se produzca un cambio de aeronave.
	j	Vectores de excentricidad	Se suministrará el vector de excentricidad de la antena del receptor con respecto al sensor LIDAR, incluyendo un gráfico que muestre la dirección de los ejes.	
	k	Informe descriptivo del proceso de vuelo	Según documento (informe vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica.	
4 GRABACIÓN Y ARCHIVO DE PRODUCTOS				
4.1 Ejecución de los trabajos				
	a	Grabación de productos y documentos	<ul style="list-style-type: none"> - Se realizará la grabación de todos los productos y documentos en discos duros sata sin carcasa. - Las entregas parciales se podrán realizar mediante la transferencia de ficheros por File Transfer Protocol (FTP) previo acuerdo con la dirección técnica. 	Previamente a la entrega, se comprobará que el modelo de los discos duros sata se adaptan a los interfaces e-sata de la dirección técnica.
	b	Almacenamiento de los ficheros	La empresa adjudicataria deberá guardar los ficheros del proyecto durante todo el período de garantía, por si fuera necesario rehacer alguna fase de los trabajos.	
	c	Número de copias	- Se entregarán dos copias de cada producto, debiendo de utilizarse marcas diferentes de discos para cada copia de los ficheros.	
	d	Medios y estructura de almacenamiento	Los productos y documentos serán grabados de acuerdo con la estructura de archivo: carpetas/ subcarpetas/ ficheros.	

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	e	Entregas parciales	La empresa entregará a la dirección técnica con una periodicidad semanal, todos los productos que hayan sido generados en este período de tiempo. En caso de que por circunstancias meteorológicas o de cualquier otro tipo no se haya generado ningún producto, la empresa informará y justificará documentalmente esta circunstancia a la dirección técnica. Si la entrega parcial se realiza a través de FTP, los productos aportados no podrán ser modificados sin autorización de la dirección técnica.	Se remitirá el cuadro de control de envío de productos acompañando a cada entrega que se realice.
	f	Nomenclatura de ficheros	Todos los ficheros a entregar deberán cumplir una nomenclatura detallada, facilitada por la dirección técnica.	
4.2	Productos a entregar			
	a	Listado de los ficheros contenidos en cada medio de almacenamiento.	Según detallará la dirección técnica	
	b	Informe descriptivo del proceso de archivo	Según documento (informe vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica.	
5	CONTROL DE CALIDAD			
5.1	Ejecución de los trabajos			
	a	Control de calidad de los trabajos realizados	Se garantizará que los procesos de trabajo y los productos generados cumplen con las presentes especificaciones técnicas, debiéndose realizar un control de calidad que consiga estos objetivos documentándolo adecuadamente.	
5.2	Productos a entregar			
	a	Informe descriptivo del proceso de control de calidad	Según documento (informe vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica.	
6	ENVÍO DE PRODUCTOS			
6.1	Productos a entregar			
	a	Cuadro de control de envío de productos	Según modelo del documento facilitado por la dirección técnica.	

Metodología propuesta para postproceso vuelo fotogramétrico digital combinado con vuelo LIDAR

Tamaño de pixel: 0.25 m. Densidad de puntos LIDAR: 0.5 puntos/m²

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
1	SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA			
	a	Cotas ortométricas	Se utilizarán únicamente cotas ortométricas en todos los procesos de cálculo y en los productos finales con datos altimétricos.	
	b	Modelo de geoide: transformación de alturas elipsoidales a cotas ortométricas	Para realizar la transformación de alturas elipsoidales a cotas ortométricas, se utilizará el modelo de geoide.	La dirección técnica entregará las herramientas de transformación y los ficheros del modelo de geoide.
	c	Proyección cartográfica	UTM	Referido al huso correspondiente a cada zona
	d	Huso UTM a emplear	Cada hoja se realizará en su huso. Las hojas que caigan entre dos husos, se entregarán en ambos.	
	e	Distribución de hojas	La distribución 1:5.000 empleada será la división en 8 x 8 de las hojas MTN50 oficiales.	El corte de hojas se obtendrá aplicando un rebase de 50 metros con respecto a las cuatro esquinas teóricas, redondeado a múltiplos de 10 m. Las coordenadas de las esquinas de hoja serán las oficiales aprobadas por la comisión de normas cartográficas. La dirección técnica facilitará los listados de coordenadas correspondientes a: - Esquinas de hojas - Cortes de hojas (con el rebase mínimo)
2	ORIENTACIÓN DE IMÁGENES			
2.1	Ejecución de los trabajos			
	a	Método	Obligatoriamente digital, por la técnica de orientación directa utilizando parámetros GPS/INS de vuelo y datos de efemérides finales. Sistema de referencia altimétrico: se utilizarán exclusivamente cotas ortométricas, tanto en el proceso de cálculo como en los resultados finales.	Se realizará el postprocesamiento mediante la técnica Precise Point Positioning (PPP).
	b	Tamaño mínimo de un bloque	2 hojas MTN50 en longitudinal x 2 hojas MTN50 en transversal	Otras configuraciones diferentes deberán ser consultadas previamente con la dirección técnica.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	c	Tamaño máximo de un bloque	3 hojas MTN50 en longitudinal x 3 hojas MTN50 en transversal.	Otras configuraciones diferentes deberán ser consultadas previamente con la dirección técnica.
	d	Zona a recubrir	Para cada zona indicada, se orientarán las imágenes completas de todas las hojas 5.000 incluidas total o parcialmente en el área intervenida.	Los expedientes de contratación detallarán exactamente las hojas a orientar.
	e	Bloque perteneciente a dos husos distintos	En el caso de que un bloque quede comprendido entre dos husos distintos se calculará la orientación de imagen en cada uno de ellos, proporcionándose la orientación externa de las imágenes en cada uno de los husos.	
2.2 Precisión absoluta				
	a	Precisión planimétrica final	RMSE < GSD (metros)	Se obtendrá por estereoscopia y se utilizarán puntos de chequeo. Ground Sample Distance (GSD) (tamaño del pixel en el terreno – m.)
	b	Precisión altimétrica final	RMSE < GSD (metros)	Se obtendrá por estereoscopia y se utilizarán puntos de chequeo
2.3 Productos a entregar				
	a	Datos del cálculo de la orientación	Ficheros de entrada y salida del cálculo	Con toda la información de ajuste, residuos, coordenadas resultantes, etc...
	b	Base de datos del vuelo orientado	Parámetros de orientación de los fotogramas (X, Y, Z, Ω , Φ , K) En caso de sensor de barrido, ficheros de soporte, orientación y calibración.	Según criterio de signos y orígenes y formato que entregará la dirección técnica.
	c	Informe descriptivo del proceso de orientación	Según documento (informe postproceso vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica)	
3 TRATAMIENTO DE LOS DATOS LIDAR AJUSTADOS				
3.1 Ejecución de los trabajos				
	a	Objetivo	Obtención de los ficheros LAS ajustando las fluctuaciones entre las pasadas del vuelo LIDAR, con una clasificación automática y depurando la clase suelo. Sistema de referencia altimétrico: se utilizarán exclusivamente cotas ortométricas, tanto en el proceso de cálculo como en los resultados finales	
	b	Ajuste de fluctuaciones del vuelo LIDAR	Se realizará un ajuste altimétrico de los datos LIDAR de manera que se ajusten las fluctuaciones entre pasadas mediante un procedimiento de autocalibración.	A partir de una clasificación previa por pasadas de los ficheros LAS y los datos de las trayectorias LIDAR.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	c	Clasificación automática de los ficheros LAS	Se clasificarán automáticamente los ficheros LAS ajustados distinguiendo: - Suelo (terreno+puentes) - Vegetación - edificaciones - Solape	Se realizará una línea de mosaico entre pasadas en las zonas de recubrimiento, de manera que los puntos sobrantes de cada pasada a partir de esta línea se clasificarán como solape. Los puntos clasificados como solape se codificarán como clase 12, mientras que el resto de los puntos clasificados se codificarán de acuerdo al formato LAS v1.1.
	d	Edición de los ficheros LAS. Fichero LAS clase suelo depurado	Mediante edición manual, se obtendrá un fichero LAS depurado de la clase suelo, en la que se eliminarán errores de ruido en el momento de la captura y errores de clasificación, apoyándose en imágenes de intensidades, fotografías orientadas y visualización en 3D.	Todos los puntos deben estar situados sobre el terreno, ignorando las copas de árboles, tejados de edificaciones y otros objetos artificiales que sobresalgan del mismo. Los puentes contenidos inicialmente en la clase terreno se editarán y clasificarán con el código 32.
	e	Corte de los ficheros LAS	El corte de los ficheros LAS se realizará de acuerdo con cuadrados UTM de 2 km x 2 km	
	f	Versión de los ficheros LAS	Se utilizará la versión 1.1 tipo 1 del formato LAS	
3.2 Precisiones				
	a	Precisión de los datos LIDAR Ajustados	Diferencias relativas máx. entre pasadas: 0.40 m.	Se mantendrán las precisiones absolutas de los datos LIDAR de partida.
3.3 Productos a entregar				
	a	Fichero LAS ajustado y clasificado con suelo depurado	Fichero LAS ajustado y clasificado automáticamente, depurado y editada la clase suelo.	
	b	Informe descriptivo del proceso de ajuste de datos LIDAR	Según documento (informe postproceso vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica)	
4 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES (MDE)				
4.1 Modelo digital del terreno (MDT)				
	a	Objetivo	Obtener un modelo del terreno a nivel del suelo natural. Sistema de referencia altimétrico: se utilizarán exclusivamente cotas ortométricas, tanto en el proceso de cálculo como en los resultados finales.	Debe ser útil para fines múltiples tales como: hidrología (escorrentías, avenidas,...), estudios de erosión, anteproyectos de infraestructuras (regadíos, canalizaciones redes de carreteras, etc...)
	b	Obtención de un MDT	Se obtendrá un modelo digital del terreno a partir de la clase terreno de los ficheros LAS ajustados, clasificados y editados.	
	c	Paso de malla del MDT	El paso de malla del MDT será de 5m x 5m	
	d	MDT en formato GRID	Se procederá a obtener un MDT de malla regular mediante interpolación. El paso de malla del MDT será de 5m x 5m	Todos los puntos de la malla tendrán coordenadas X,Y UTM enteras, múltiplos del paso de malla.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	e	Precisión de los MDT: error medio cuadrático	RMSE \leq 1 m	
	f	Precisión de los MDT: error máximo	\leq 2 m en el 95% de los casos. No podrá haber ningún punto con error superior a 3 m.	
	g	Corte de ficheros	De acuerdo al corte rectangular establecido por hojas MTN25	
4.2 Modelo digital de superficie para ortofoto (MDSO)				
	a	Objetivo	Obtener un modelo a partir del cual se obtengan unas ortofotos correctas geoméricamente, incluso en las carreteras, viaductos, etc.	
	b	Método de obtención	A partir del MDT introduciendo las líneas de ruptura	
	c	Líneas de ruptura (breaklines)	Trazado manual por restitución estereoscópica.	Se trazarán en aquellos lugares en los que no quede adecuadamente definido el relieve con la malla de puntos LIDAR (principalmente elementos artificiales como presas, terraplenes, etc.), mediante trazado manual estereoscópico. Adicionalmente, se introducirán líneas de ruptura artificiales para definir puentes y viaductos. En las zonas de agua, (mar, embalses y lagos) la cota del MDT será constante e igual a la de la orilla.
	d	MDSO en formato GRID	Se procederá a obtener el MDSO de malla regular mediante interpolación del MDT + las líneas de ruptura. El paso de malla del MDSO será de 5m x 5m.	Los puntos de la malla serán coincidentes con los del MDT
	e	Precisión de los MDSO: error medio cuadrático	RMSE \leq 1 m	
	f	Precisión de los MDSO: error máximo	\leq 2 m en el 95% de los casos No podrá haber ningún punto con error superior a 3 m.	
	g	Corte de ficheros	De acuerdo al corte rectangular establecido por hojas MTN25	
4.3 Productos a entregar				
	a	Ficheros del MDT	Grid editado, en formato ASCII (X,Y,Z). Paso de malla 5m x 5m	
	b	Ficheros del MDSO	Grid editado, en formato ASCII (X,Y,Z). Paso de malla 5m x 5m	
	c	Líneas de ruptura del terreno (breaklines)	Fichero dxf	Se entregarán las líneas de ruptura naturales y artificiales en dos capas o niveles distintos. La dirección técnica entregará instrucciones concretas sobre la codificación y simbolización del fichero de líneas de ruptura.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	d	Imagen de sombreado del MDSO	Fichero ECW georeferenciado según corte de hojas MTN25	Tamaño de pixel: 5 m
	e	Informe descriptivo del proceso de generación de MDE	Según documento (informe postproceso vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica.	
5 ORTOFOTO				
5.1 Ejecución de los trabajos				
	a	Método	Flujo de trabajo digital	-Generado a partir del modelo digital de superficie para ortofoto. - Interpolación bilineal o bicúbica - Ortorectificación de las imágenes de 4 bandas o, alternativamente, color natural y falso color infrarrojo.
	b	Ortofotos a generar	- Ortofotos color natural (RGB) - Ortofotos falso color infrarrojo (CIR) o alternativamente: ortofoto 4 bandas RGBI	Para las ortofotos falso color infrarrojo no será necesario aplicar retoques estéticos ni generar líneas de mosaico manuales o editar las generadas automáticamente.
	c	Tamaño de pixel	0.25 m	
	d	Profundidad de color	8 bits por banda	
	e	Orientación de las imágenes	Norte UTM	
	f	Equilibrado radiométrico	- Unidad para el equilibrado: zonas de trabajo - Se deberá garantizar continuidad cromática entre todas las hojas de las zonas de trabajo (ortofoto continua), preservando el color natural sin dominantes. - Se eliminarán de la imagen los efectos producidos por <i>hot spot</i> , vignetting y cualquier otro que empeore la calidad de la imagen, como manchas y destellos. - La dirección técnica dará instrucciones para la realización del equilibrado.	- Si se aplica <i>dodging</i> , debe ser lo más suave posible para no <i>aplanar</i> la radiometría de la imagen.
	g	Mosaico	-Se ortoprojectarán todas las fotos, para utilizar sólo la parte más central de cada una. - Se recomienda el trazado automático de la línea de mosaico mediante algoritmo de <i>mínimos cambios radiométricos</i> con edición manual.	El mosaico se realizará sin volver a remuestrear ninguna ortofoto: cada pixel del mosaico final ha debido ser interpolado una sola vez en todo el proceso.

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
	h	Corte de imágenes por hojas	<ul style="list-style-type: none"> - Según distribución de hojas 1:5.000 que entregará la dirección técnica. - Rectángulo circunscrito con rebase de 50 metros y coordenadas de las esquinas múltiplo de 10m. - Se considera esquina superior izquierda de la imagen, la esquina superior izquierda del pixel superior izquierdo. 	La distribución 1:5.000 empleada será la división en 8 x 8 de las hojas MTN50 oficiales en coordenadas UTM (ETRS89)
5.2	Precisión geométrica			
	a	Error medio cuadrático	≤ 0.5 m	<p>El control se realizará mediante el levantamiento de una muestra de puntos con GNSS o puntos tomados de cartografía fiable sobre algunas zonas de trabajo elegidas al azar, a realizar sobre un 10 % de los bloques fotogramétricos.</p> <p>Criterio de rechazo: detección de problemas en más de un 5 % de las ortofotos.</p>
	b	Error máximo en cualquier punto	≤ 1m en el 95% de los casos, no podrá haber ningún punto superior a 2 m.	En puntos bien definidos con precisión 1/3 del RSM
	c	Discrepancias máximas entre ortofotos contiguos	< 2 pixel (tamaño de pixel 0.25 m.)	
5.3	Productos a entregar			
	a	Ortofotos RGB + IRG (o alternativamente RGBI) sin comprimir, equilibradas radiométricamente, mosaicadas y cortadas según división de hojas 1:5.000	Formato TIFF 6 plano (no Tiled), si cabecero Geo TIFF (para evitar discrepancias con el TFW correspondiente)	
	b	Fichero TFW en ETRS89 de cada TIFF	La esquina superior izquierda del pixel superior izquierdo de cada hoja tendrá obligatoriamente coordenadas UTM exactas, múltiplo de 10 metros.	<ul style="list-style-type: none"> - Las coordenadas que deben figurar en el fichero TFW serán múltiplos de 10 m con un incremento de + 1/2 pixel en X y -1/2 pixel en Y ya que se refieren al centro del pixel. De esta forma, los múltiplos enteros de 10 m corresponderán a la esquina superior izquierda del pixel. - En el fichero TFW se añadirá al final una línea de comentario donde se indique el sistema de referencia al que corresponde.
	c	Líneas de mosaico	En formato DXF con un texto interior que identifique el fotograma.	
	d	Informe descriptivo del proceso de generación de ortofotos	Según documento (informe postproceso vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica.	

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
6 GRABACIÓN Y ARCHIVO DE PRODUCTOS				
6.1 Ejecución de los trabajos				
	a	Grabación productos y documentos	<p>- Se realizará la grabación de todos los productos y documentos en discos duros sata.</p> <p>- Las entregas parciales se podrán realizar mediante la transferencia de ficheros por File Transfer Protocol (FTP) previo acuerdo con la dirección técnica.</p>	Previamente a la entrega, se comprobará que el modelo de los discos duros sata se adaptan a los interfaces e-sata de la dirección técnica.
	b	Almacenamiento de los ficheros de proyecto	La empresa adjudicataria deberá guardar los ficheros del proyecto durante todo el período de garantía, por si fuera necesario rehacer alguna fase de los trabajos.	
	c	Número de copias	Se entregarán dos copias de cada producto, debiendo de utilizarse marcas diferentes de discos para cada copia de los ficheros.	
	d	Medios y estructura de almacenamiento	Los productos y documentos serán grabados de acuerdo con la estructura de archivo: carpetas/ subcarpetas/ ficheros.	
	e	Entregas parciales	La empresa irá realizando entregas parciales a la dirección técnica, de fases del trabajo terminadas, con ámbitos correspondientes a los bloques para orientación de las imágenes en los que se haya dividido la zona de trabajo, de forma que se puedan ir efectuando las tareas de control de calidad paralelamente. Se evitarán las entregas masivas a la finalización de los trabajos de todo el material completo.	Se remitirá el cuadro de control de envío de productos acompañando a cada entrega que se realice.
	f	Nomenclatura de ficheros	Según documento (informe postproceso vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica.	
6.2 Productos a entregar				
	a	Listado de los ficheros contenidos en cada medio de almacenamiento	Fichero ASCII con detalle de carpetas, subcarpetas y ficheros	Mediante comando MS-DOS: dir /s > [nombre de fichero].txt o cualquier otro procedimiento similar.
	b	Informe descriptivo del proceso de archivo.	Según documento (informe postproceso vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica.	

Apdo.	Ítem	Fase / Parámetro	Especificaciones	Detalles
7	CONTROL DE CALIDAD			
7.1	Ejecución de los trabajos			
	a	Control de calidad de los trabajos realizados	Se deberá realizar un control de calidad en todos los procesos del trabajo y los productos generados para asegurar el cumplimiento de los parámetros establecidos en la presente metodología propuesta.	
7.2	Productos a entregar			
	a	Informe descriptivo del proceso de control de calidad	Según documento (informe postproceso vuelo combinado) facilitado por la dirección técnica.	
8	ENVÍO DE PRODUCTOS			
8.1	Productos a entregar			
	a	Cuadro de control de envío de productos	Según modelo del documento facilitado por la dirección técnica.	
PRODUCTOS COMPLEMENTARIOS A GENERAR POR EL IGN				
9	METADATOS ISO 19115			
9.1	Ejecución de los trabajos			
	a	Datos a cumplimentar	Se crearán metadatos (ficheros XML) según la norma ISO 19115, de acuerdo a las indicaciones de la dirección técnica.	Se utilizarán programas que garanticen el cumplimiento de la norma ISO 19115.
9.2	Productos a generar			
	a	Metadatos ISO de los productos de la fase de modelo digital de superficies	Metadatos ISO de los productos de la fase de modelo digital de superficies metadatos con la información del modelo digital de superficies para cada una de las hojas del MTN50 (un fichero XML por hoja).	
	b	Metadatos ISO de los productos de la fase de ortofoto	Metadatos con la información de la ortofotografía para cada una de las hojas del MTN50 (un fichero XML por hoja).	

ANEXO III

Test estadísticos para evaluación de calidad posicional

A continuación se exponen diversos test empleados para realizar el análisis de la calidad posicional sobre la cartografía final propuesta por Ariza (2002).

- **Test National Map Accuracy Standard (NMAS)**

El test NMAS estima si el producto analizado se encuentra dentro de ciertos límites de error preestablecidos tanto para la componente horizontal (XY) como para la vertical (Z). Los errores se obtienen mediante una comparación entre una muestra homogénea de puntos perfectamente definidos localizados sobre la cartografía a analizar y estos mismos puntos localizados sobre una fuente de mayor exactitud.

- **Características**

- Es un test simple, los resultados se expresan de la forma cumple/ no cumple y es de fácil interpretación.
- En la determinación de exactitud horizontal se puede utilizar un estándar predefinido o establecido por una institución cartográfica. El estándar United States Geological Survey (USGS), establece que como máximo, el 10 % de los puntos de la muestra pueden tener un error horizontal mayor de 0.846 mm en cartografía a escala mayor de 1/20.000, o de 0.508 mm cartografía a escala menor de 1/20.000.
- El error viene definido como la diferencia entre la posición de los puntos en el mapa y en la fuente de mayor exactitud.
- En la determinación de exactitud vertical el USGS establece un estándar que como máximo, el 10 % de los puntos pueden tener un error vertical mayor de la mitad del intervalo de las curvas de nivel.
- En NMAS la unidad de medida es la distancia sobre el mapa.

- **Test Engineering Map Accuracy Standard (EMAS) - American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)**

El test EMAS nos proporciona la exactitud de los mapas topográficos a gran escala, desarrollado por la ASPRS. En su comparación se emplean fuentes de mayor exactitud.

El test se basa en la obtención de estadísticos para analizar: si existen desplazamientos constantes (errores sistemáticos) y la variabilidad de la muestra (errores casuales).

- **Características**

- El estándar nos permite definir los límites máximos aceptables de error así como el nivel de confianza. Se basa en hipótesis sobre los límites aceptables para los errores aleatorios y sistemáticos.
- Se emplean de forma independiente para analizar las componentes X, Y, Z de una muestra de, al menos, 20 puntos perfectamente definidos.
- En EMAS/ASPRS las diferencias entre las localizaciones de los puntos sobre el mapa y sobre la fuente de mayor exactitud están expresadas en términos de distancias sobre el terreno.
- La cartografía cumple con el EMAS/ASPRS si todas las componentes han pasado los dos test exigidos por el estándar.

- **Estadístico para la detección de sistematismos (desplazamientos)**

Se calcula el test de cumplimiento o rechazo (para X,Y,Z) con la siguiente ecuación:

$$t_x = \frac{\bar{e}_x \sqrt{n}}{S_x}$$

Si se verifica que $|t_x| \leq t_{n-1,\alpha}$ el mapa cumple

Donde:

$n - 1$: Los grados de libertad

α : El nivel de significación

t: La medida teórica de la t de Student

- **Estadístico para la detección de errores casuales**

Se calcula el test de cumplimiento o rechazo (para X,Y,Z), empleando los límites de error aceptables para errores casuales (aleatorios). De esta forma se determina el grado de variabilidad de los errores. Para lo cual se emplea la siguiente ecuación:

$$X_x^2 = \frac{S_x^2(n-1)}{\sigma_x^2}$$

Si se verifica que $|X_x^2| \leq X_{n-1,\alpha}^2$ el mapa cumple con el estándar de calidad posicional en X.

Donde:

- σ_x : el límite de error aceptable (varianza máxima) en la componente X
- n-1: los grados de libertad
- α : el nivel de significación
- χ^2 : la medida teórica de la distribución Chi-Cuadrado

- **Test National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)**

El estadístico NSSDA, se basa en comparar el conjunto de datos a analizar con una fuente de mayor exactitud. Para ello, la exactitud horizontal del conjunto de datos se prueba comparando las coordenadas planimétricas de una serie de puntos bien definidos en el conjunto de datos con sus respectivas coordenadas X e Y procedentes de una fuente de mayor exactitud.

La exactitud vertical se verifica comparando las elevaciones en el conjunto de datos con las elevaciones correspondientes a los mismos puntos procedentes de una fuente de mayor exactitud.

- **Características:**

- El NSSDA utiliza el *error medio cuadrático* para estimar la exactitud posicional.
- La exactitud posicional se expresa en unidades terreno con un nivel de confianza del 95%. Esto quiere decir que el 95% de las posiciones del conjunto de datos tendrán un error con respecto a las verdaderas posiciones en el terreno que es igual o menor al valor de la exactitud posicional.

- Evalúa el componente posicional horizontal de forma conjunta (XY), y vertical de forma independiente (Z).
 - Este método permite obtener un índice de calidad posicional en unidades reales, sobre el terreno, pero es el usuario quien decide si la ortofoto es aceptada o rechazada.
 - La evaluación se realiza sobre elementos puntuales
 - Puede emplearse para datos cartográficos digitales
- **Valor NSSDA horizontal**

Se calcula el coeficiente de exactitud posicional a un 95% de nivel de confianza dependiendo de dos opciones:

En el cálculo se utiliza la siguiente fórmula

Si $RMSE_x = RMSE_y$

$$Exactitud_r = 1.7308 * RMSE_r$$

siendo $RMSE_r$ el error medio cuadrático en la componente posicional XY.

Si $RMSE_x \neq RMSE_y$

$$Exactitud_r = 1.22385 * (RMSE_x + RMSE_y)$$

- **Valor NSSDA vertical**

Se calcula el $RMSE_z$ para la componente Z de forma análoga, así como el coeficiente de exactitud posicional a un 95 % de confianza para la componente Z:

$$Exactitud_z = 1.96 * RMSE_z$$

- **Test fórmula de Koppe**

El test de la fórmula de Koppe al igual que el test NSSDA está basado en la comparación con fuentes de mayor exactitud, con la diferencia que analiza tan sólo la componente vertical (Z).

La exactitud se comprueba comparando las altitudes (Z) de una muestra de datos con las altitudes (Z) de los mismos puntos en otra fuente de mayor exactitud.

- **Características**

- El test emplea coeficientes derivados empíricamente para estudiar los efectos de las pendientes del terreno sobre el error medio en la componente vertical, según las relaciones establecidas por Koppe.
- Calcula el error vertical de cada punto
- Calcula el valor de la pendiente en cada punto
- Calcula el análisis de regresión empleando la tangente del valor de la pendiente como variable independiente y el error vertical como variable dependiente.

- **Error vertical en la fórmula de Koppe**

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\bar{e}_v = \pm(A + B * \tan \alpha)$$

Donde:

A el término independiente de la regresión

B el coeficiente de la regresión

α la pendiente del terreno

- **Error horizontal medio en la fórmula de Koppe**

$$\bar{e}_H = \pm(B + \cot \alpha)$$