INTENDENCIA DE MONTEVIDEO - URUGUAY

TOPOCART TOPOGRAFIA ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS LTDA

VUELO LIDAR Y COBERTURA AEROFOTOGRAMÉTRICA DEL DEPARTAMENTO DE MONTEVIDEO

- COBERTURA AEROFOTOGRAMÉTRICA
- PERFILADO LÁSER
- APOYO DE CAMPO
- AEROTRIANGULACIÓN
- MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE
- ORTOMOSAICO VERDADERO

Brasilia-DF, julio de 2025.

ÍNDICE

ANEXOS DIGITALES ..... ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

ÍNDICE DE FIGURAS 3

ÍNDICE DE TABLAS 4

1. CONSIDERACIONES INICIALES 5
1.1. Etapas y alcance de los servicios ejecutados 5

2. UBICACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO 7

3. COBERTURA AEROFOTOGRAMÉTRICA DIGITAL Y PERFILADO LÁSER 7

3.1.1 Planificación Cobertura Aerofotogramétrica Digital y Perfilado Láser ..... Erro! Indicador não definido.

3.1.2 Ejecución de la Cobertura Aerofotogramétrica Digital y Perfilado Láser 9

3.1.3 Procesamiento de los datos del Recubrimiento Aerofotogramétrico 14

3.1.4. GNSS/IMU 14

3.1.5 Procesamiento de las Imágenes 16

4. FOTOGRAFÍAS AÉREAS 17

Fotoíndice Digital 20

5. GENERACIÓN DE LA MALLA DE PUNTOS 21

5.1.1 Procesamiento de los datos del Perfilado Láser 23

o***5.1.2 Procesamiento da Trayectoria*** 23
5.1.3 Procesamiento da Malla de Puntos 24
5.1.4 Modelo Digital de Superficie - MDS 27
5.1.5 Classificación de MDS 28
5.1.6 Control de Calidad *32*

6. APOYO DE CAMPO 32

7. AEROTRIANGULACIÓN DIGITAL 35

7.1.1 Software Utilizado 36

7.1.2 Etapas del proceso de aerotriangulación 37

7.1.3 División Bloques Aerotriangulación 38

7.1.4 Análisis de la Calidad y Resultados Obtenidos 39

7.1.5 Control de Calidad 41

7.1.6 Productos Entregados 41

ANEXOS DIGITALES

- **ANEXO 01 – ARCHIVOS VECTORIALES EN FORMATO SHAPEFILE**

LÍMITE DEL PROYECTO

LÍMITES DE LOS PRODUCTOS DE LA ENTREGA 01

ARTICULACIÓN DE LAS HOJAS DE LA NUBE DE PUNTOS ORIGINAL, A ESCALA 1:500

ARTICULACIÓN DE LAS HOJAS DEL FOTOÍNDICE, A ESCALA 1:100.000

PLAN DE VUELO FOTOGRÁFICO

PLAN DE VUELO LÁSER

ÍNDICES DE CALIDAD

ANEXO 02 – PLANES DE VUELO FOTOGRÁFICO Y LÁSER EJECUTADOS

ANEXO 03 – GRÁFICOS DE ÁNGULO SOLAR

ANEXO 04 – INFORMES DE EJECUCIÓN DEL VUELO (FOTO Y LÁSER)

ANEXO 05 – ARCHIVOS RINEX DEL GNSS A BORDO

ANEXO 06 – ARCHIVOS DE ORIENTACIÓN EXTERIOR, PROCESADOS

ANEXO 07 – FOTOGRAFÍAS AÉREAS DIGITALES: R, G, B, NIR, RGB Y RGIR

ANEXO 08 – FOTOÍNDICES DIGITALES A ESCALA 1:100.000

ANEXO 09 – MOSAICO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Alcance de los servicios - Montevideo. ..... **Erro! Indicador não definido.**
Figura 2 - Plano de vuelo elaborado en software X-Track. 8
Figura 3 - Elaboración de plano de vuelo en software X-Track y análisis de cobertura aérea en relación al MDT. 8
Figura 4 - Vuelo Ejecutado. 10
Figura 5 - Conjunto integrado por Trimble, con Cámara Digital iXU-RS-1000, plataforma y Sistema GNSS/IMU AP50. 11
Figura 6 - Sistema Trimble Harrier 68i. 12
Figura 7 - Aeronave CX-BFO (Cessna 182). 13
Figura 8 - Posicionamento relativo utilizado en la ejecución del vuelo. 14
Figura 9 - Exemplo de infome de Ejecución de vuelo 14
Figura 10 - Flujo de procesamiento pos vuelo. 15
Figura 11 - Pantalla do software iX Process. 16
Figura 12 - Ejemplo de imagen colorida (RGB) proveniente da càmara fotogramétrica Phase One iXU-RS-1000. 17
Figura 13 - Ejemplo de Fotografia da iXU-RS-1000, en composición RGB. 17
Figura 14 - Ejemplo de Fotografia da iXU-RS-1000, en composición RGIR. 18
Figura 15 - Ejemplo da generación de fotografias en composição RGBI. 19
Figura 16 - Fotografias entregadas. 20
Figura 17 - Ejemplo de Fotoíndice Digital. 21

Figura 18 - Esquema de registro de retornos múltiples. 22
Figura 19 - Formas diversas de visualización de dados laser. 22
Figura 20 - Ejemplos de dados laser con efecto de visualización distintos. 23
Figura 21 - Procesamiento en RiANALYZE. 24
Figura 22 - Procesamiento en LPMaster. 25
*Figura 23 - Ejemplos de visualización de archivo bruto (formato *.LAS), abajo com perfil lateral.* 25
Figura 24 - Malla de Puntos da Colecta de Dados de Perfilamiento (puntos de suelo). 26
Figura 25 - Ejemplos de visualización de archivo bruto con perfil lateral. 27
Figura 26 - Nube de Puntos sin Clasificación. 29
Figura 27 - Parámetros de Classificación de Terreno. 29
Figura 28 - Visualización de Puntos por Clase posterior a la Primera Clasificación. 30
Figura 29 - Visualización dos Puntos de Suelo y Vegetación. 30
Figura 30 - Visualización de Puntos de edificaciones en área urbana. 31
Figura 31 - Visualización de MDS luego de interpolación de todos los Puntos. 31
Figura 32 - Distribución de Puntos do Apoyo de Campo. 33
Figura 33 - Puntos do Apoyo Suplementarios: Horizontal-Vertical. 34
Figura 30 - Parámetros de Orientación Exterior. 36
Figura 31 - Elementos necesarios en la orientación exterior y su obtención directa 36
Figura 33 - División de bloques de aerotriangulación para el área de estudo. 39
Figura 32 - Ejemplos: distribuición de Puntos de Apoyo de Campo Suplementarios. 40
Figura 33 - Análisis gráfico de distribuición y amarre de tie points. 40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabela 1 – Etapas previstas en Términos de Referencia para la execución de los servicios y generación de dados geoespaciales 5
Tabela 2 – Descripción de productos contratados, cantidades y referencias respecto a los formatos de entrega **Erro! Indicador não definido.**
Tabela 3 - Especificaciones estabelecidas por Plano de Vuelo para a colecta de imágenes. 9
Tabela 4 - Especificaciones técnicas adoptadas en la elaboración del plano de vuelo para el perfilamiento láser 9
Tabela 5 - Clases ASPRS para el MDS. 28

1. CONSIDERACIONES INICIALES

Se trata del informe de vuelo, productos y control de calidad referente al Contrato 09/2024 en cumplimiento del Término de Referencia - Tabla de Entregables - Ítem 6.

El Contrato tuvo como objetivo la adquisición de un conjunto de datos geoespaciales de alta calidad y precisión para el departamento de Montevideo, mediante el empleo de la tecnología LiDAR y la generación de ortofotos, con la finalidad de obtener datos útiles para una amplia gama de aplicaciones, desde planificación urbana y actualización cartográfica hasta modelado 3D.

El vuelo aerofotogramétrico se realizó íntegramente sobre el área de interés en el departamento de Montevideo, garantizando la cobertura prevista en el contrato. Cabe destacar que todas las etapas subsiguientes de procesamiento, generación de productos geoespaciales y control de calidad fueron ejecutadas en Brasil por el equipo técnico de Topocart, asegurando el cumplimiento de los requisitos de precisión y calidad establecidos.

1.1. Etapas de los Servicios Ejecutados

La Tabla 1 presenta las etapas previstas en los Términos de Referencia para la ejecución de los servicios y la generación de los datos geoespaciales.

Tabla 1 - Etapas previstas en los Términos de Referencia para la ejecución de los servicios y la generación de los datos geoespaciales.

Etapas	Unidad	
Cobertura Aerofotogramétrica	km²	600
Perfilado Láser	km²	600
Apoyo de Campo	und	60
Aerotriangulación	km²	600
Modelo Digital de Superficie	km²	600
Orto-Mosaico Verdadero	km²	600

La Tabla 2 describe los productos contratados, cantidades y referencias en cuanto a los formatos de entrega.

Tabla 2 - Descripción de los productos contratados, cantidades y referencias en cuanto a los formatos de entrega.

Entregables Obligatorios	Cantidad	Descripción del entregable
1 - Fotos Crudas	600km²	Fotografías Aéreas con composición RGBI, resolución geométrica de 5cm, formato *.GeoTIF; Fotoíndice que relaciona cada imagen con a localización geográfica aproximada do centro de cada foto, tempo de captura e condiciones de vuelo relevantes em formato *.PDF; Mosaico para Fotoindice, con resolución de 1m, formato *.ECW;
2- Orto-mosaico verdadero	600km²	GSD (Ground Sample Distance) de 5cm/pixel para o ortomosaico verdadero; ε - Error máximo permisible - 2 pixeles en xy, con 95% de confianza; Sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 60%; Los ortomosaicos deben ser entregues no formato *.GeoTIF, utilizando una compresión sin pérdida y deben incluir as cuatro bandas (RGBI); Resolución radiométrica debe ser de 8 bits por canal (RGB). Además, cada hoja debe ser entregada en color verdadero en formato *.JPG; Los ortomosaicos deben ser organizados y entregados siguiendo una grilla predefinida que será proporcionada, y cada hoja debe ser cortada con una sobreposición de 50 metros; Adicionalmente, debe ser entregue una imagen em formato *.JPG en falso color, donde las bandas serán ordenadas da la siguiente forma para destacar a visualización da Vegetación e cuerpos de agua;
3- Nube de Puntos LiDAR clasificada	600km²	Los dados LiDAR deben ser clasificados de acuerdo con la norma ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) para nubes de Puntos LiDAR;

Entregables Obligatorios	Cantidad	Descripción del entregable
		Debe ser entregado un informe técnico detallando los algoritmos y métodos utilizados para a clasificación, así como un control de calidad de la clasificación;*.PDF; La nube de Puntos clasificada debe ser entregada en formato estándar para nubes de Puntos *.LAS/LAZ, versión 1.4 o superior con 16 ptos/m²; Precisión Posicional de Nube de Puntos LiDAR: 10cm XY, 15cm Z; Los dados deben estar disponibles tanto en una nube de Puntos única como en archivos separados por clase; Los archivos deben ser organizados y entregados siguiendo una grilla predefinida que será proporcionada; La nube de Puntos LiDAR, entregada en formato *.LAS/LAZ, incluirá los dados obtenidos en el levantamiento para cada ponto;
4- Modelo Digital de Superficie (MDS)	600km²	Resolución Espacial: Mínima de 0,10m; Precisión Vertical: Mínima de 0,30m (con 95% de confianza); Los archivos deben ser organizados y entregados siguiendo una grilla predefinida que será proporcionada, *GeoTIF;
5- Estación de Trabajo	1un	Procesador: Intel i9 de última generación, con capacidad de Procesamiento para lidar con grandes conjuntos de dados y realizar cálculos complexos de manera eficiente. Memoria RAM: Mínimo de 64 GB, DDR4 o DDR5, conforme compatible con el resto del hardware, preferencialmente DDR5 se suportado pela placa-madre y por el procesador; Placa Gráfica de alta gama, con pelo menos 16 GB de memoria, capaz de suportar intensas cargas de trabajo de visualización y análisis de dados, con soporte para múltiples monitores. Ejemplos: placas NVIDIA Quadro o GeForce RTX; Dos discos de no mínimo 1 TB SSD NVMe cada una, para el sistema operacional y aplicaciones críticas; Un disco de no mínimo 2 TB SSD SATA, para almacenamiento secundario de archivos e programas; Mínimo de 4 TB HDD, para almacenamiento masivo de dados; Dos monitores de 27 pulgadas con resolución 4K, como mínimo; Una pantalla con resolución 4K, como mínimo, de 65 pulgadas o más para visualización compartida y análisis de los dados; Sistema Operacional: Windows 11 Pro. Software de Análisis Geoespacial: Incluir una licencia flotante de Global Mapper Pro, última versión disponible, y una licencia flotante de Global Mapper Standard, última versión disponible.
6- Informe de vuelo, productos y control de calidad	1un	Informe completo que detalle cada fase de los vuelos realizados, Procesamiento dos dados capturados y controles de calidad implementados. E informe debe ser presentado em formato *PDF, estructurado con secciones claramente definidas para cada tópico relevante, *.DOCX e *.PDF; Informaciones completas sobre el planeamiento y ejecución de los vuelos, incluyendo la identificación de la aeronave y los equipamientos utilizados, certificados de calibración para a cámara y sensor LiDAR, descripciones de rutas de vuelo, altitudes, velocidades, registro de condiciones meteorológicas y su impacto en la colecta de datos, juntamente con una lista de incidentes de las medidas correctivas adoptadas, *.PDF; Descripción detallada de los procesos técnicos aplicados a los datos crudos para obtener los productos finales, tales como ortomosaicos, modelaje 3D, modelos digitales de superficie, entre otros. Esta sección debe incluir metodologías de Procesamiento, software utilizado, ajustes de parámetros significativos y cualquier etapa de validación interna para asegurar la calidad y precisión de los productos generados;
7- Planilla de Puntos de control y apoyo	1un	Debe ser entregada en formato *.CSV e *.XLSX. Para cada ponto de apoyo y control, se debe entregar una monografía con las coordenadas precisas, Descripción detallada, informaciones de medición y fotografías como referencias visuales.

2. UBICACIÓN DE LA REGIÓN DE TRABAJO

La región de estudio abarca el Departamento de Montevideo con un área estimada de 600 km².

La ciudad de Montevideo es la capital y ciudad más grande de Uruguay, situada en la costa sur del país, en la margen noreste del Río de la Plata.

En la Figura siguiente se puede observar el límite de mapeo objeto del Contrato 09/2024.

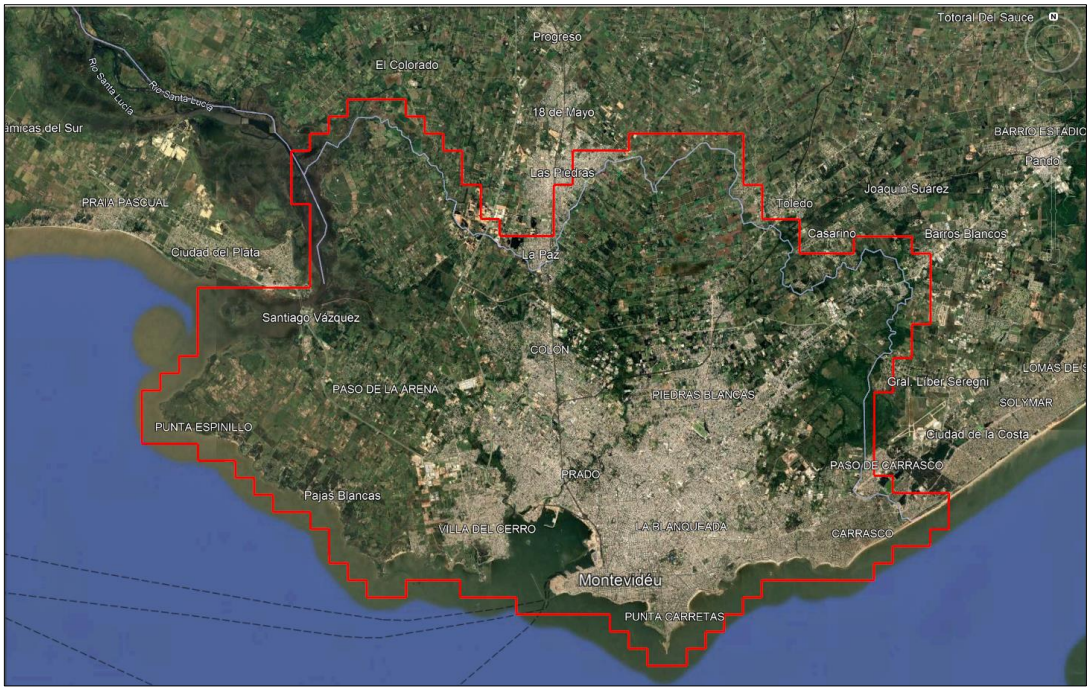


Figura 1 - Área de cobertura de los servicios - Montevideo.

En el Anexo 01 se presenta el LÍMITE DEL PROYECTO en formato *.KMZ, en la capa específica “Montevideo”.

3. COBERTURA AEROFOTOGRAMÉTRICA DIGITAL Y PERFILAMENTO LASER

3.1. Planificación de la *Cobertura Aerofotogramétrica Digital y Perfilado Láser*

Para la ejecución del vuelo se realizó una meticulosa planificación con el objetivo de definir la mejor geometría de recubrimiento aerofotogramétrico de tal forma que permitiera la completa cobertura estereoscópica y la recopilación de datos láser de acuerdo con las especificaciones técnicas.

TOPOCART utilizó el software X-Track a fin de obtener el plan de vuelo gráfico y analítico. X-Track fue también el sistema de gestión de vuelo utilizado a bordo del avión, como se puede observar en la Figura siguiente.

.



Figura 1 - Plano de vuelo elaborado en software X-Track para el control de Cobertura Aerofotogramétrica Digital y Perfilamiento Laser de Montevideo con resolución espacial de 5cm.

El plan de vuelo fue elaborado a partir del polígono del área a ser mapeada, suministrado por la contratante, y de un Modelo Digital de Terreno, en este caso proveniente del sensor orbital SRTM *(Shuttle Radar Topography Mission)*.

El X-Track permite la determinación de altitudes de vuelo diferentes para cada pasada a cubrir y, a partir de ello, se calculan las superposiciones entre las imágenes y se determinan las tolerancias que, a su vez, fueron confrontadas y ajustadas, véase la Figura a continuación.

.

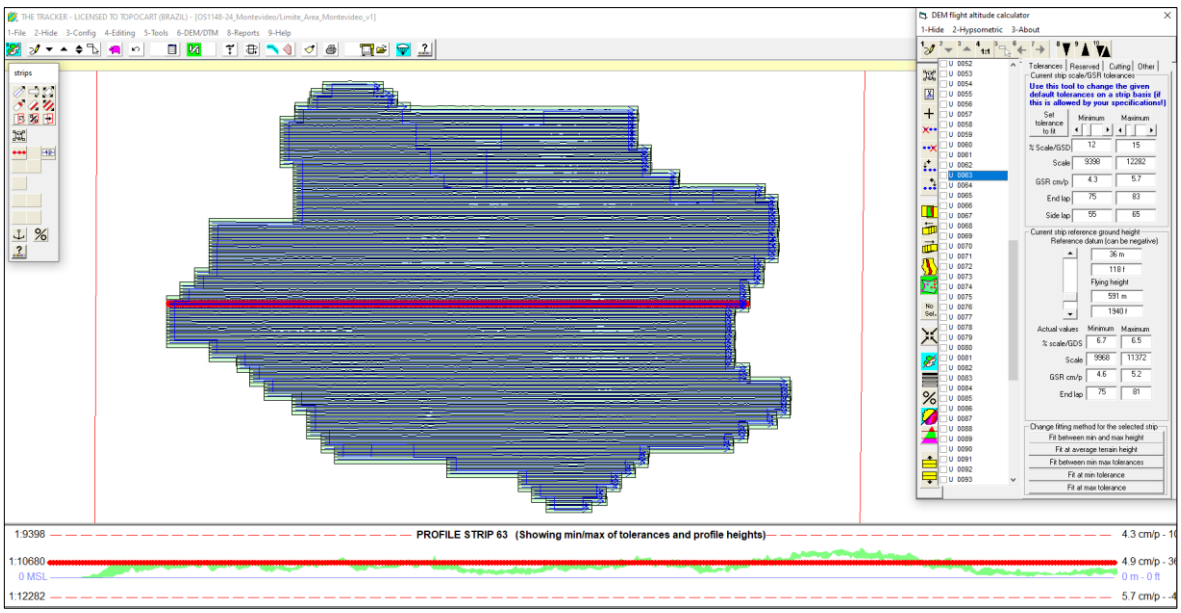


Figura 2 - Elaboración de Plano de Vuelo en software X-Track ilustrando la herramienta de análisis de cobertura aérea en relación al MDT.

Al finalizar la planificación, se obtuvo toda la información gráfica y analítica necesaria para la ejecución de la misión aerofotogramétrica. El plan de vuelo fue cargado para su grabación en el sistema X-Track a bordo de la aeronave, para permitir el control del vuelo, el

La Tabla 3 presenta un resumen de las cantidades del plan de vuelo establecido para la toma de imágenes.

Tabla 1 - Cuantitativos establecidos por el Plano de Vuelo para la colecta de las imágenes.

Total lines:	121
Total photos :	31873
Total models:	30223
Total length :	3213 km
Total length :	1735 nm
Velocidad	180,0 km/h
Velocidad	97,2 knots
Tiempo	17,85 horas
Tiempo de maniobra 5 min	10,00 horas

La Tabla 4 presenta un resumen de las especificaciones técnicas adoptadas en la elaboración del plan de vuelo para el perfilamiento láser.

Tabla 2 - Especificaciones técnicas adoptadas en la elaboración del plan de vuelo para el perfilamiento laser

Informaciones Plan de Vuelo	**Especificaciones Técnicas**
Altura médica de vuelo:	550m
Densidad de Puntos	16pm²
Velocidad de aeronave	50ms
Potencia del Sensor Laser	400kHz
Ángulo de abertura: FOV (Field Of View)	60º

En Anexo 2 se podrán observar mayores detalles del plan de vuelo gráfico e analítico.

3.1.2 Ejecución de Cobertura Aerofotogramétrica Digital y Perfilamiento Laser

La ejecución da la Cobertura Aerofotogramétrica fue realizada por el conjunto de equipamientos especialmente adaptados para el mapeamiento por aerofotogrametría, contando con una aeronave especialmente preparada con equipamientos de alta sensibilidad para adquisición de datos con posicionamiento preciso en el momento de la toma de las imágenes.

El sensor utilizado fue la cámara fotogramétrica aérea digital Phase One iXU-RS-1000. La cámara está equipada con la última versión del sistema de gestión de vuelo (FMS), X-Track o POSTrack, que asiste a la tripulación en todas las tareas durante la ejecución de la cobertura fotogramétrica aérea, además de proporcionar funcionalidades adicionales que permiten un vuelo más preciso.

La precisión se logró mediante un conjunto de equipos que operan de forma integrada mediante sensores, el sistema de orientación integrada del sensor (ISO), o comúnmente conocido como "vuelo asistido". El sistema está conectado a una unidad de medición inercial (IMU), que proporciona un registro continuo de los ángulos de inclinación de la cámara (actitud), y a un receptor GNSS geodésico de doble frecuencia, con una antena aeronáutica instalada verticalmente sobre su eje óptico, lo que permite obtener las coordenadas precisas del centro de perspectiva (CP) de cada imagen grabada.

La Figura XXX muestra el plan de vuelo ejecutado para la cobertura fotogramétrica aérea digital y el perfilado láser.

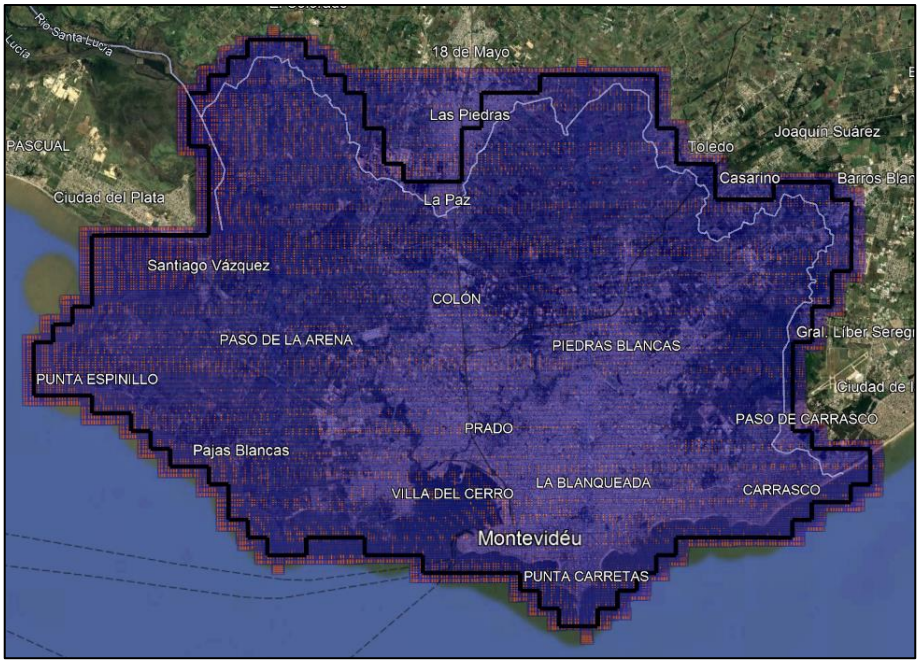


Figura 3 - Vuelo Ejecutado.

Descripción de los equipamientos utilizados en la Cobertura Aérea y Perfilamiento Laser:

- **Sistema de Gestión de Vuelo Fotogramétrico**: POSTrack, que permite planificar la misión fotogramétrica, definiendo las coordenadas de disparo de cada imagen y garantizando la cobertura longitudinal y lateral. Durante la misión, el sistema permite al piloto (pantalla táctil) y al operador (portátil) visualizar el vuelo simultáneamente, lo que

permite seleccionar las rutas de vuelo y definir la mejor maniobra para cada entrada y salida. Además, el sistema monitoriza los parámetros necesarios para una buena calidad de vuelo, como la visualización en tiempo real de la calidad de las imágenes digitales, los ajustes de contraste y brillo, la presencia de nubes, la calidad y continuidad de los datos GNSS/IMU y el funcionamiento de la plataforma.

- **Cámara aérea digital de formato medio iXU**: Esta cámara Phase One iXU-RS-1000 está equipada con un sistema de gestión de vuelo (FMS) y cuenta con un marco de adquisición de imágenes de aproximadamente 100 megapíxeles (11 608 x 8708 píxeles) con una resolución geométrica de 4,6 micrómetros, lo que le permite capturar imágenes aéreas con una resolución real de hasta 4 cm. La cámara incorpora dos unidades de almacenamiento de imágenes redundantes capaces de almacenar hasta 6400 imágenes (lo que cubre toda la autonomía de la aeronave durante trabajos de fotogrametría aérea). La cámara utiliza objetivos Schneider-Kreuznach de sincronización rápida extraíbles con una distancia focal de 50 mm. Los sensores capturan imágenes en las bandas PAN, R, G, B y NIR a 14 bits, lo que permite el procesamiento de imágenes en color. El sistema de compensación de la resistencia aerodinámica se realiza de forma totalmente electrónica a través del dispositivo FMC.



Figura 4 - Conjunto integrado por Trimble, con Cámara Digital iXU-RS-1000, plataforma y Sistema GNSS/IMU AP50.

- **Sensor láser Trimble Harrier 68i**: fabricado por Trimble Germany GmbH. Este sensor opera a frecuencias de hasta 400 kHz, lo que significa que puede disparar hasta 400.000 pulsos por segundo. Tiene un campo de visión máximo de 60°, capacidad de grabación de hasta 4 retornos por cada pulso emitido, distinción de intensidad de señal de 8 bits para cada retorno y una altitud máxima de operación de 1.600 m. Incluye una unidad de grabación de 500 GB, equivalente a 10 horas de funcionamiento, considerando el uso de la capacidad de frecuencia máxima del sensor.



Figura 5 - Sistema Trimble Harrier 68i.

• **Unidad de Medición Inercial**: fabricada por Trimble/Applanix, modelo IMU/GNSS AP50, este sistema adquiere y registra ángulos giroscópicos residuales (no absorbidos por la plataforma) durante el vuelo, utilizando un sistema de triple giroscopio, a una velocidad de 250Hz con una precisión nominal de 0,005°.

• **Receptor GNSS**: El sistema también cuenta con un receptor GNSS geodésico de doble frecuencia que registra señales de la constelación de satélites a partir de datos recopilados por la antena acoplada a la aeronave a una velocidad de 1 Hz.

En la operación aérea a Topocart utilizó una aeronave modelo Cessna 182 matrícula CX-BFO. A Figura 7 presenta la aeronave utilizada en las etapas de Cobertura Aérea y Perfilamiento Laser.



Figura 6 - Aeronave CX-BFO (Cessna 182).

Para la ejecución de la Cobertura Fotogramétrica Aérea Digital y el Perfilado Láser, se utilizó corrección GNSS global mediante tecnología RTX, lo que permitió calcular las coordenadas del centro de perspectiva de cada fotografía tras el procesamiento.

El Applanix POSPac MMS 9.0 PP-RTX es un sistema de corrección GNSS global basado en la nube que utiliza la tecnología RTX de Trimble para proporcionar una precisión de posicionamiento centimétrica posprocesada sin necesidad de estaciones base. La tecnología Trimble RTX utiliza datos de una red global de estaciones de seguimiento para calcular correcciones de la órbita del satélite e información del reloj, así como modelos de retardo atmosférico. Applanix POSPac utiliza estos datos para posprocesar la trayectoria inercial GNSS de la aeronave. La información de trayectoria registrada durante la misión se envía al servidor Trimble RTX mediante POSPac, y esta información se utiliza para generar un conjunto de correcciones RTX específicas para la misión, que posteriormente se transmiten de vuelta a POSPac. POSPac procesa las correcciones junto con los datos GNSS e IMU sin procesar para generar un SBET con precisión centimétrica, que corresponde a la trayectoria ajustada y, en consecuencia, a las coordenadas de los centros de perspectiva de las imágenes y los datos láser.

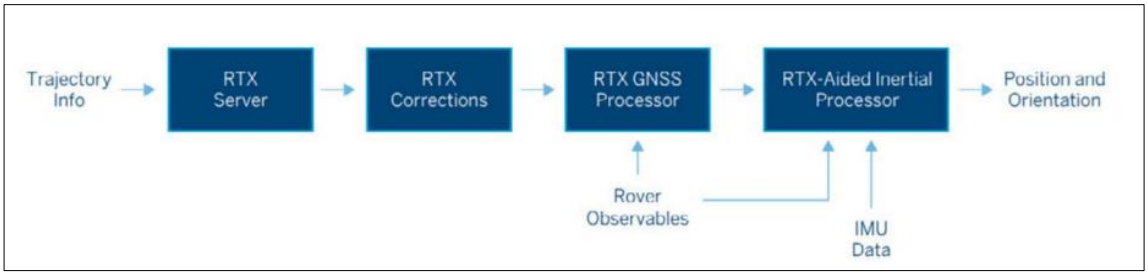
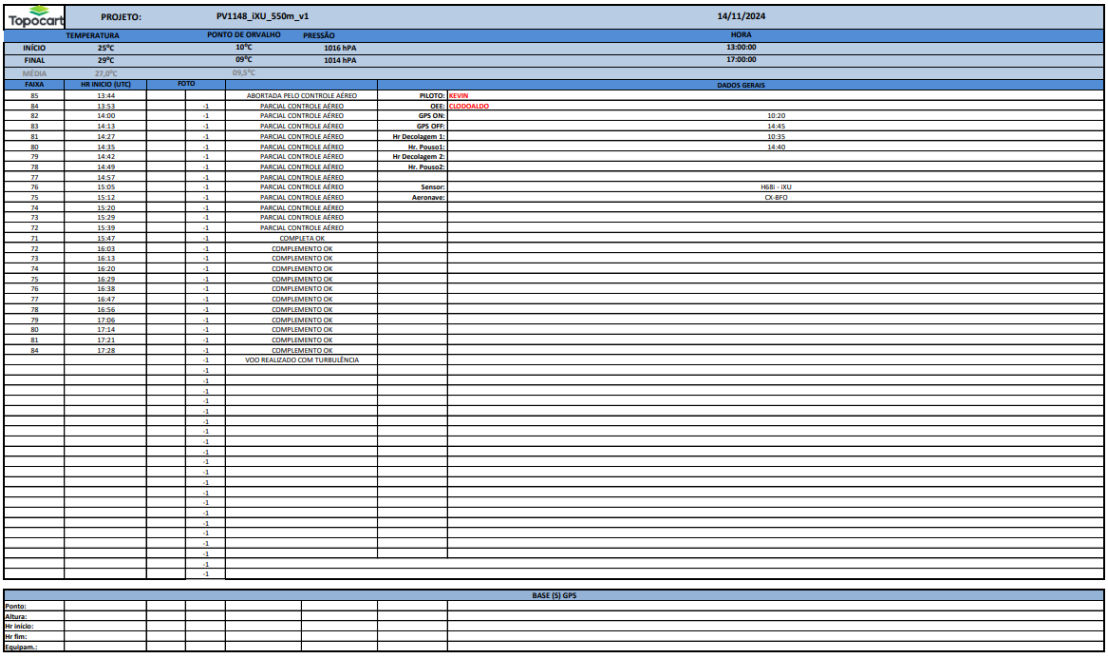


Figura 7 - Posicionamiento relativo utilizado en la ejecución del vuelo.

En el Anexo 05 se presentan los INFORMES DE EJECUCIÓN DEL VUELO FOTO-LASER, EN formato *.PDF.



Topocart	PROJETO:	PV1148_iXU_550m_v1			14/11/2024
	TEMPERATURA	PONTO DE ORVALHO	PRESSÃO		HORA
INÍCIO	25°C	10°C	1016 hPA		13:00:00
FINAL	29°C	09°C	1014 hPA		17:00:00
MÉDIA	27,0°C	09,5°C			

FAIXA	HR INICIO (UTC)	FOTO			DADOS GERAIS	
85	13:44			ABORTADA PELO CONTROLE AÉREO	PILOTO:	KEVIN
84	13:53		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO	OEI:	CLODOALDO
82	14:00		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO	GPS ON:	10:20
83	14:13		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO	GPS OFF:	14:45
81	14:27		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO	Hr Decolagem 1:	10:35
80	14:35		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO	Hr. Pouso1:	14:40
79	14:42		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO	Hr Decolagem 2:	
78	14:49		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO	Hr. Pouso2:	
77	14:57		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO		
76	15:05		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO	Sensor:	HIGI - IXU
75	15:12		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO	Aeronave:	CX-BFO
74	15:20		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO		
73	15:29		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO		
72	15:39		-1	PARCIAL CONTROLE AÉREO		
71	15:47		-1	COMPLETA OK		
72	16:03		-1	COMPLEMENTO OK		
73	16:13		-1	COMPLEMENTO OK		
74	16:20		-1	COMPLEMENTO OK		
75	16:29		-1	COMPLEMENTO OK		
76	16:38		-1	COMPLEMENTO OK		
77	16:47		-1	COMPLEMENTO OK		
78	16:56		-1	COMPLEMENTO OK		
79	17:06		-1	COMPLEMENTO OK		
80	17:14		-1	COMPLEMENTO OK		
81	17:21		-1	COMPLEMENTO OK		
84	17:28		-1	COMPLEMENTO OK		
			-1	VOO REALIZADO COM TURBULÊNCIA		

BASE (S) GPS							
Ponto:							
Altura:							
Hr início:							
Hr fim:							
Equipam.:							

Figura 8 - Ejemplo de Informe de Ejecución de Vuelo

3.1.3 Procesamiento de datos de Recubrimiento Aerofotogramétrico

3.1.4. GNSS/IMU

Los datos registrados durante el vuelo se extrajeron y procesaron mediante el software POSPAC, que cuenta con una solución GNSS/IMU integrada. Mediante algoritmos como la solución GNSS y el filtro Kalman, al final del proceso se obtuvieron con alta precisión los elementos de orientación exterior X, Y y Z de los centros de perspectiva y los ángulos ω, φ y K para cada imagen.

Con este proceso, el número de puntos de control suplementarios necesarios para la aerotriangulación se reduce considerablemente, ya que los datos de posición precisos del centro de perspectiva de la cámara, junto con los datos de orientación de la IMU, permiten una precisión adecuada con un número mínimo de puntos de control.

Para una mejor comprensión del uso de la solución GNSS/IMU integrada, se muestra a continuación el diagrama de flujo con la descripción de los procesos posteriores al vuelo (Figura 10).

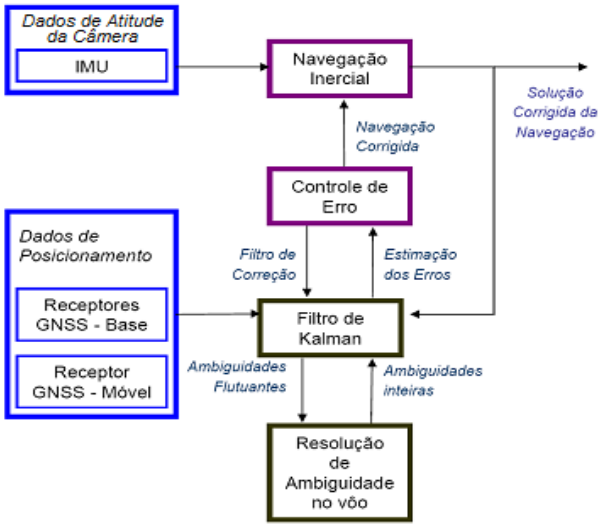


Figura 9 – Diagrama de flujo de Procesamiento pos vuelo.

Características principales del uso de datos GNSS/IMU:

• Alta precisión de los datos originales de los elementos de orientación externos, determinados en tiempo real y posprocesados;

• Reducción significativa del número de puntos medidos en el Soporte Suplementario, eliminando sus errores de identificación y reduciendo el tiempo de ejecución de este paso;

• Reducción de problemas en la depuración de errores graves en la aerotriangulación, principalmente debidos a errores en la identificación de puntos fotogramétricos;

• Mayor velocidad en el procesamiento y ajuste de la aerotriangulación (método ISO), dado que los elementos de orientación externos se obtienen previamente con gran precisión.

3.1.5 Procesamiento de las Imágenes

El archivo que compone la imagen de alta resolución viene en formato .*raw en una composición de color en formato RGB, donde es abierto en el software iX Process (desarrollado por la empresa Phase One) y transformado al formato *.tiff (Figura 11).

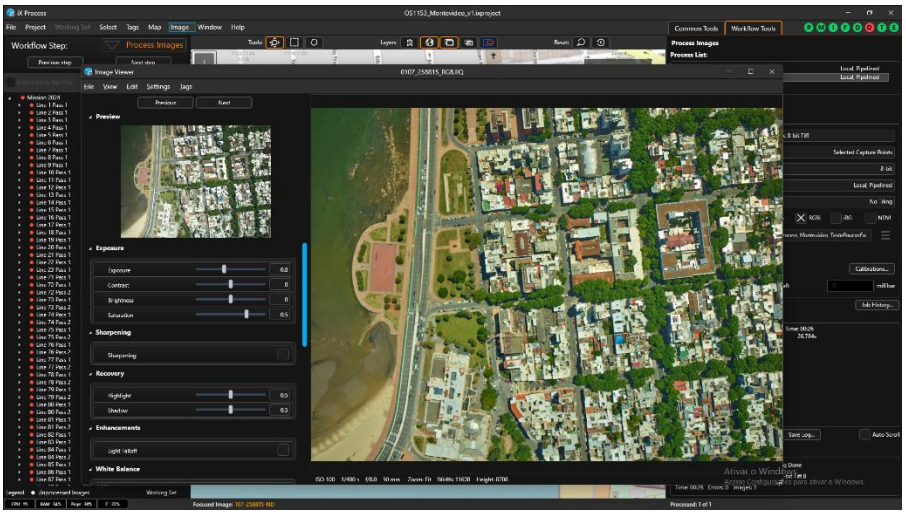


Figura 10 - Pantalla del software iX Process.

Con la imagen transformada al formato TIFF, se inició el procesamiento de datos. Utilizando técnicas modernas, se realizaron procesos de filtrado, suavizado y ecualización, garantizando así el estándar de calidad de la imagen.

Al final del proceso, se obtuvieron imágenes en color de alta resolución para la generación de productos resultantes de la cobertura fotogramétrica aérea (Figura 12).

En cuanto al análisis de la calidad de la imagen, se observaron sus aspectos visuales y los criterios esenciales para garantizar los mejores resultados de los productos resultantes de su uso.

En resumen, los elementos evaluados en esta etapa se describen a continuación:

• Resolución radiométrica: Tras el procesamiento, la imagen se exportó a 16 bits;

• Resolución espectral: Las imágenes se exportaron considerando las bandas espectrales R, G y B;

• Estándar visual: Se analizaron los aspectos visuales de la imagen en función de los criterios de nitidez, brillo, contraste y ausencia de nubes. Para ello, todas las imágenes se cargaron en un software de visualización específico, y el operador analizó cada foto para detectar inconsistencias como saturación, nubosidad, color, etc.



Figura 11 - Ejemplo de imagen color (RGB) proveniente da cámara fotogramétrica Phase One iXU-RS-1000.

4. Fotografías Aéreas

Tras la verificación interna y aprobación de los datos recopilados, las exposiciones (imágenes) y las rutas de vuelo se organizaron en directorios identificados por ruta de vuelo.



Figura 12 - Ejemplo de Fotografía da iXU-RS-1000, en composición RGB.



Figura 13 - Ejemplo de Fotografía da iXU-RS-1000, en composición RGIR.

Las fotografías se entregan digitalmente, individualmente, en formato *.TIF. No se prevé la impresión de fotografías ni la inserción de datos marginales.

El nombre de archivo de cada imagen tiene una designación estándar que indica el número de rango, el número de foto y el sufijo RGBI, por ejemplo: **FXA-FOTO-RGBI**

Ejemplo: **0801-000001-RGBI**:

- FXA (número da faja): 0001 a 9999 (4 dígitos)
- FOTO (número de foto): 000001 a 999999 (6 dígitos)
- SUFIJO (RGBI)

Las entregas se realizaron para composiciones RGBI. Las siguientes figuras ilustran el proceso de generación de las fotografías.

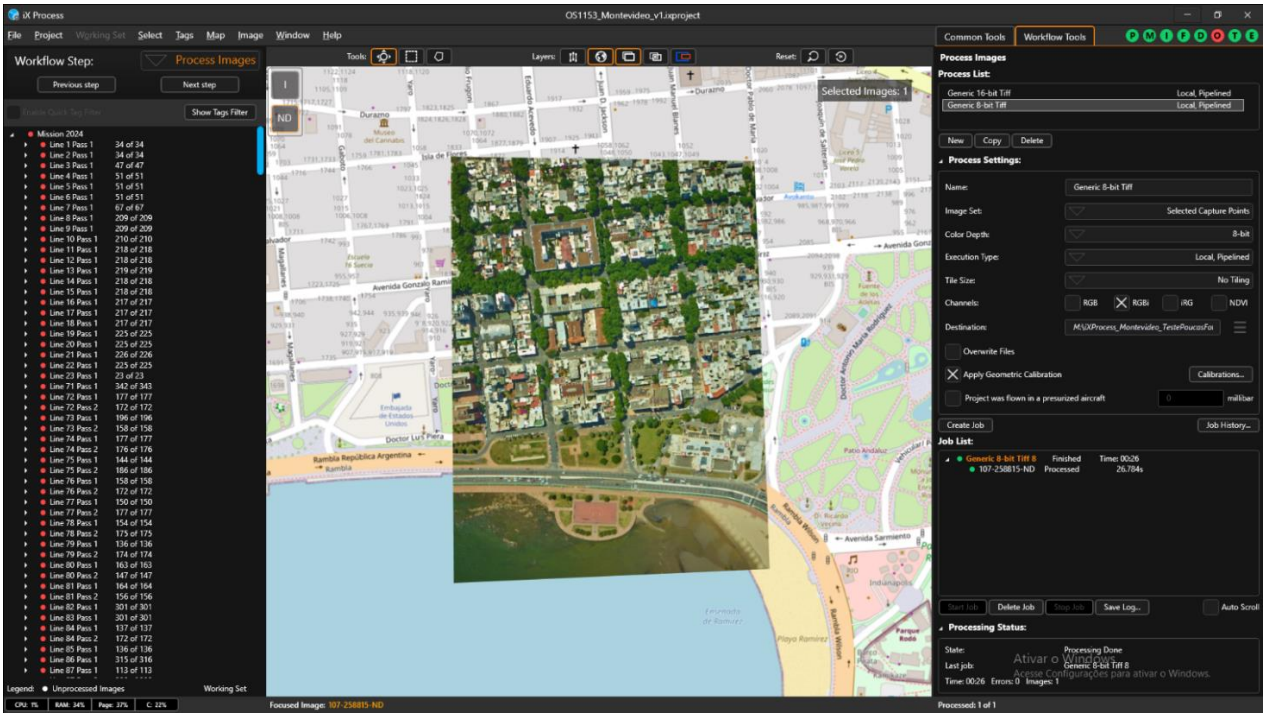


Figura 14 - Ejemplo da generación de fotografías en composición RGBI.

Se entregaron 31.873 imágenes, lo que corresponde al 100 % de las entradas planificadas para el área objetivo. La figura a continuación muestra la ubicación de las fotografías entregadas.

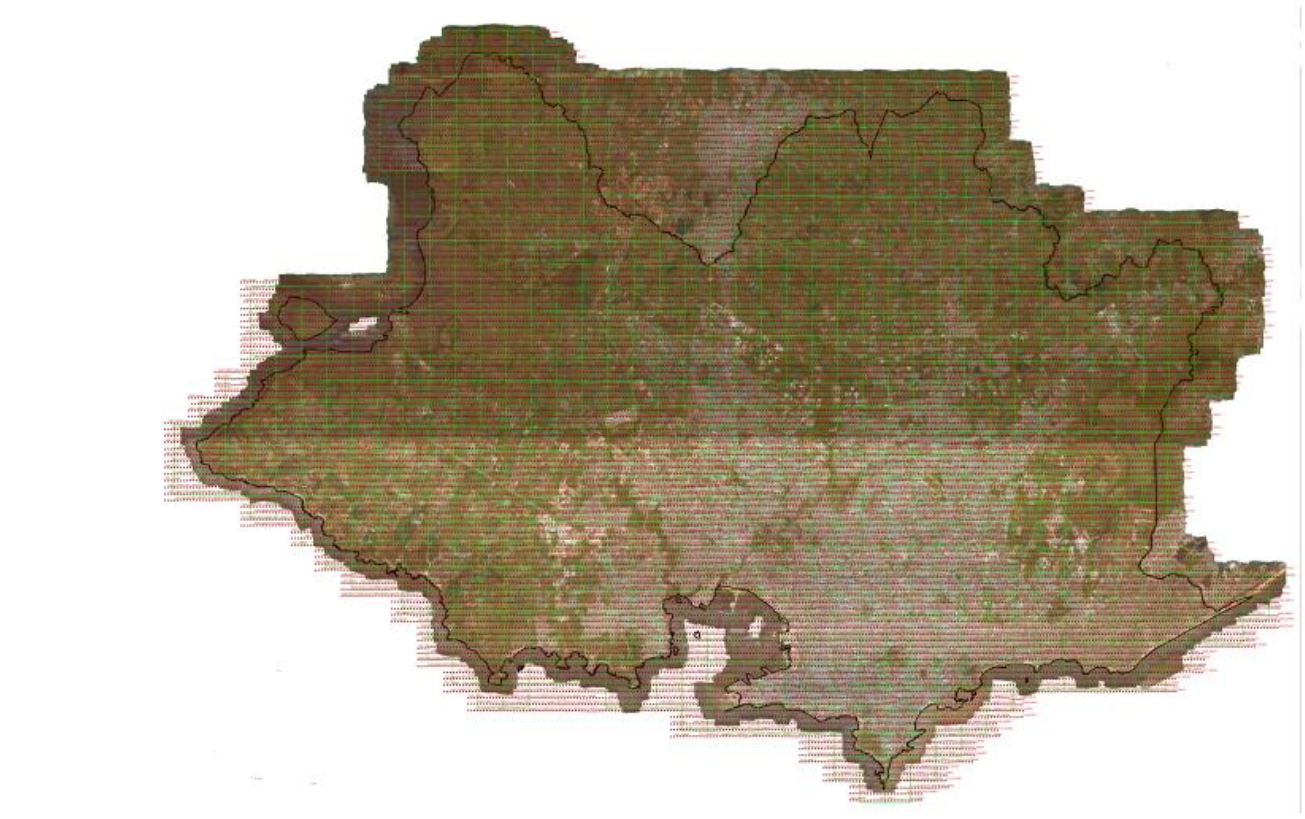


Figura 15 - Fotografías entregadas.

El Apéndice 06 contiene FOTOGRAFÍAS AÉREAS DIGITALES, en composición RGBI, disponibles en formato *.TIF. Las imágenes puntuales posprocesadas de las fotografías recopiladas también están disponibles en formato *.SHP.

Fotoíndice Digital

Para la creación del índice fotográfico, se utilizaron las imágenes originales en formato JPG, con un ajuste de bloque realizado a calidad reducida para optimizar el tiempo de procesamiento. El posicionamiento de las imágenes se basó en las coordenadas de los centros de las fotos, obtenidas mediante posprocesamiento.

A partir del bloque ajustado, se generó una nube de puntos con densidad reducida, que sirvió de base para la creación de un Modelo Digital de Superficie (MSS). Este modelo permitió la ortorrectificación de las imágenes, dando como resultado un mosaico ortorrectificado con una desviación estándar de 1 metro, que abarca toda el área de interés.

Con el mosaico y los centros de las fotos en formato shapefile, se realizó una impresión del índice fotográfico en tamaño A0, a una escala aproximada de 1:35.000.

La siguiente información se incluyó en el Índice Digital de Fotos:

- Área do aerolevantamiento
- Limite do Proyecto;
- Número de cada exposición (imagen),
- Escala aproximada do Fotoíndice;
- Indicación de norte geográfico y de cuadrícula

Fotoíndice generado.

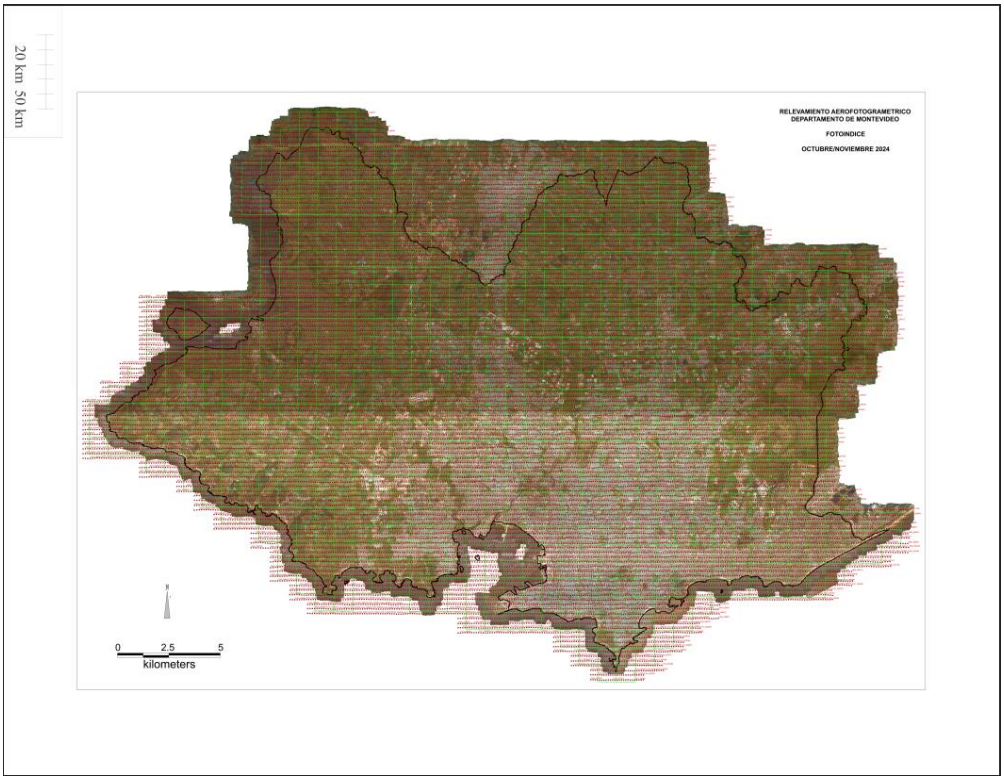


Figura 16 - Ejemplo de Fotoíndice Digital.

Los índices fotográficos se presentan en color y se entregan digitalmente en formato *.PDF, y el mosaico fotográfico se entrega con una resolución geométrica de 1 m en formato *.TIF. No se prevé la impresión de índices fotográficos.

El Anexo 07 contiene el ÍNDICE FOTOGRÁFICO DIGITAL a escala 1:30.000, así como el MOSAICO FOTOGRÁFICO para demostrar su ejecución.

5. Generación de Malla de Puntos

Una característica del sistema LIDAR utilizado es su capacidad para registrar múltiples retornos, como se puede observar en la siguiente figura. Esto permitió determinar la altura de los objetos en la superficie mapeada y, además, generó una masa de puntos que siempre siguen el patrón

de escaneo.

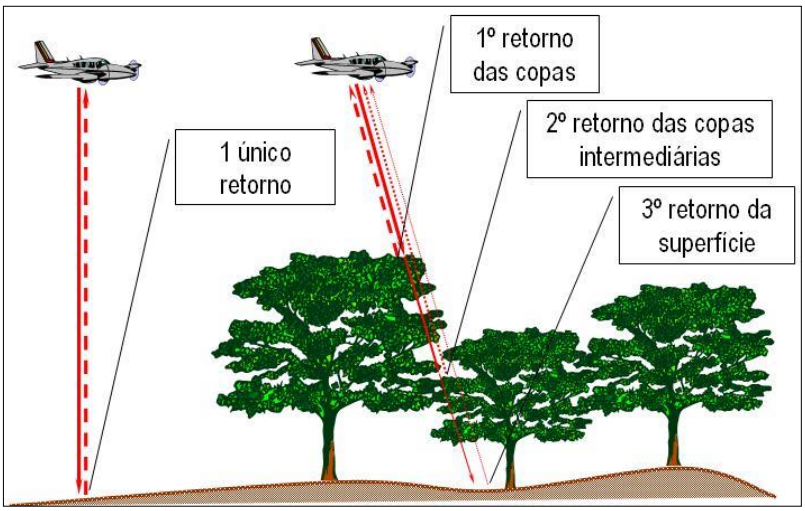


Figura 17 - Esquema de registro de retornos múltiplos.

Al analizar los múltiples retornos, según la intensidad de la señal, es posible determinar y clasificar el objeto en el terreno, su forma y altura, con base en las nubes de puntos generadas. Para fines de visualización, podemos presentar este producto de diferentes maneras; las figuras a continuación ejemplifican las situaciones.

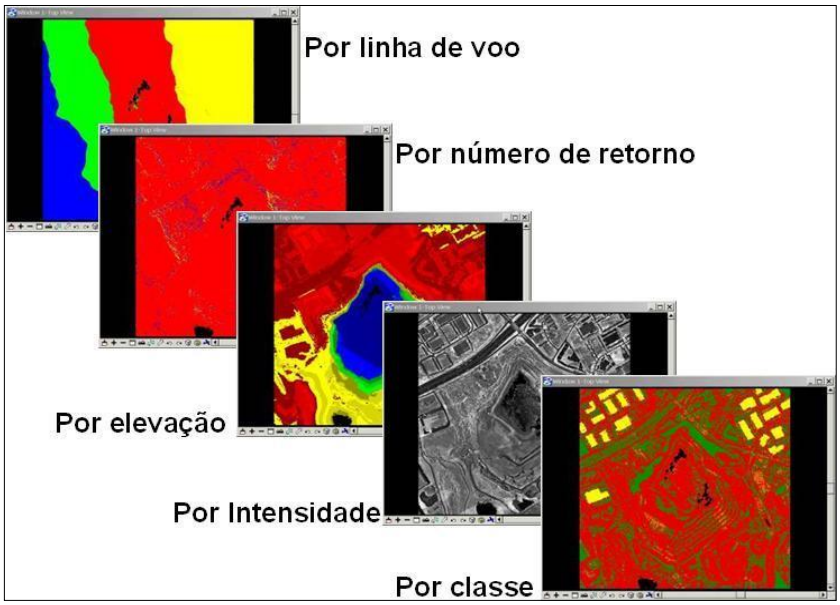


Figura 18 - Formas diversas de visualización de datos laser.

A continuación se muestran algunos ejemplos de productos obtenidos a través de datos láser.

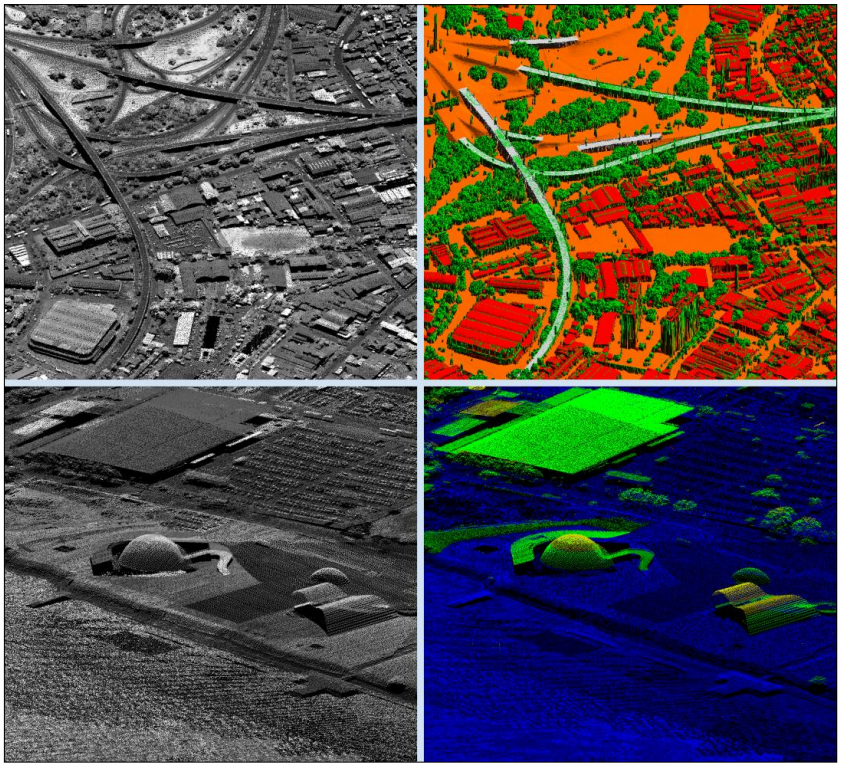


Figura 19 - Ejemplos de datos laser con efecto de visualización distintos.

Luego de clasificar los Puntos de Perfilado Láser (suelo, edificación y vegetación), se creó el archivo DSM (Modelo Digital de Superficie), y a partir de este archivo se separaron los puntos relacionados con el “suelo” para generar el DTM (Modelo Digital del Terreno).

5.1.1 Procesamiento de datos de Perfilamiento Laser

Una vez finalizado el vuelo, los datos brutos del sistema láser (LiDAR) fueron procesados hasta que estuvieron totalmente refinados y pudieron utilizarse para generar productos.

5.1.2 Procesamiento de Trayectoria

En la primera fase, se procesaron y refinaron los datos GNSS e IMU con el software PosPAC 9.0, lo que resultó en la generación de un archivo de entrada con coordenadas X, Y, Z, Kappa, Phi y Omega para cada segundo. En esta primera fase, se analizó la calidad del vuelo y su procesamiento; es decir, se generaron informes gráficos con datos como el error cuadrático medio (RMS), la dirección y orientación del vuelo, la desviación estándar de los componentes GNSS y el perfil del vuelo durante el levantamiento. Si alguno de estos parámetros no se aprueba, el procesamiento se reefectúa o incluso el vuelo se cancela. A continuación, se muestran ejemplos de imágenes de los gráficos de vuelo.

5.1.3 Procesamiento da Malla de Puntos

Tras procesar la trayectoria, se realizó un nuevo procesamiento con el software Riegl RiANALYZE y LPMaster, generando un archivo con la nube de puntos (*.LAS) en el sistema de coordenadas obtenido del GNSS. Durante este proceso, también se calculó la información de calibración y corrección de datos. La figura a continuación muestra la pantalla de procesamiento de Riegl RiANALYZE y LPMaster. En este paso, se procesaron y ajustaron las trayectorias de vuelo, lo que permitió corregir posibles errores y ruido, obteniendo así la nube de puntos más precisa y homogénea para toda el área mapeada. Si bien el bloque de vuelo fue uniforme, se crearon franjas transversales para ajustarlo. En general, para bloques regulares, la superposición entre franjas es suficiente para el ajuste.

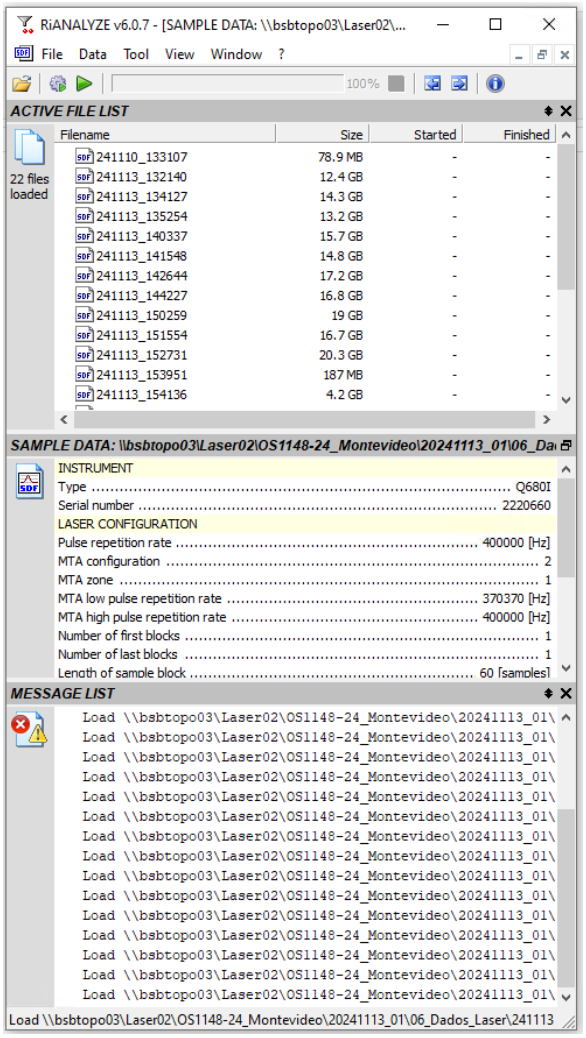


Figura 20 - Procesamiento en RiANALYZE.

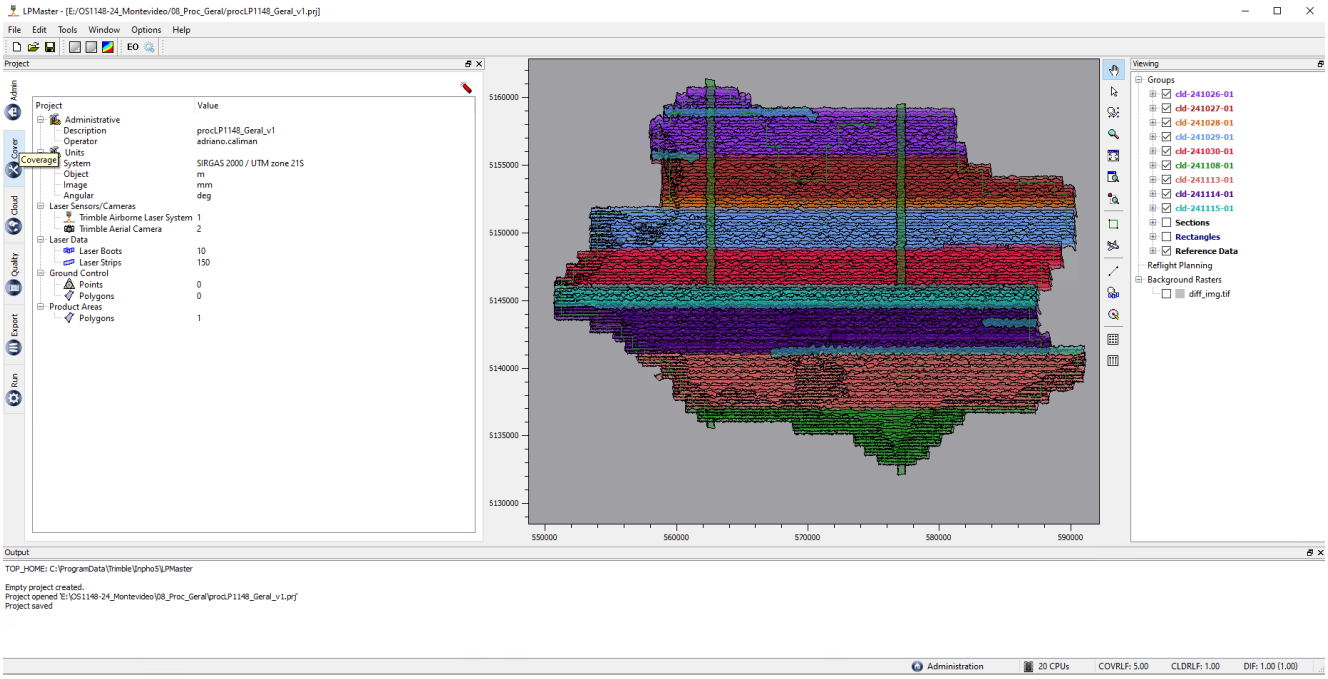


Figura 21 - Procesamiento no LPMaster.

Los archivos láser sin procesar (ya en formato *.LAS) se pusieron a disposición en el Sistema de Referencia SIRGAS ROU98, en el Sistema de Proyección UTM-21S, según el alcance cartográfico. En esta etapa, contamos con los productos de vuelo láser, que corresponden a la nube de puntos sin clasificar con una densidad planificada de 16,0 puntos/m².

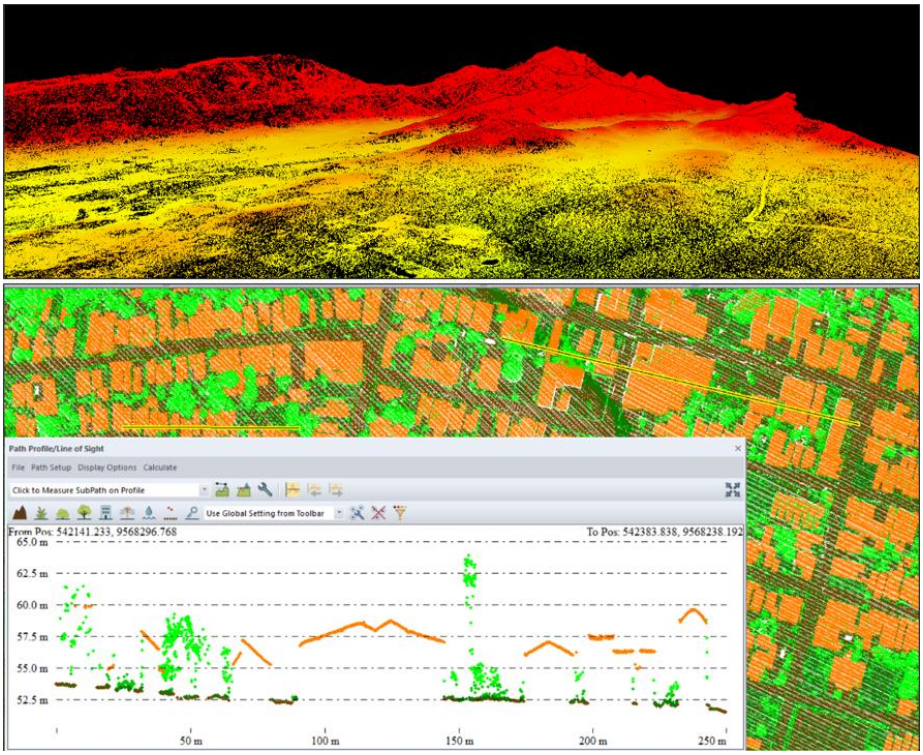


*Figura 22 - Ejemplos de visualización de archivo bruto (formato *.LAS), abajo con perfil lateral.*

Para verificar el sobrevuelo láser (y la adquisición de datos), se analizaron los archivos relacionados con la recopilación de datos del Perfilado Láser.

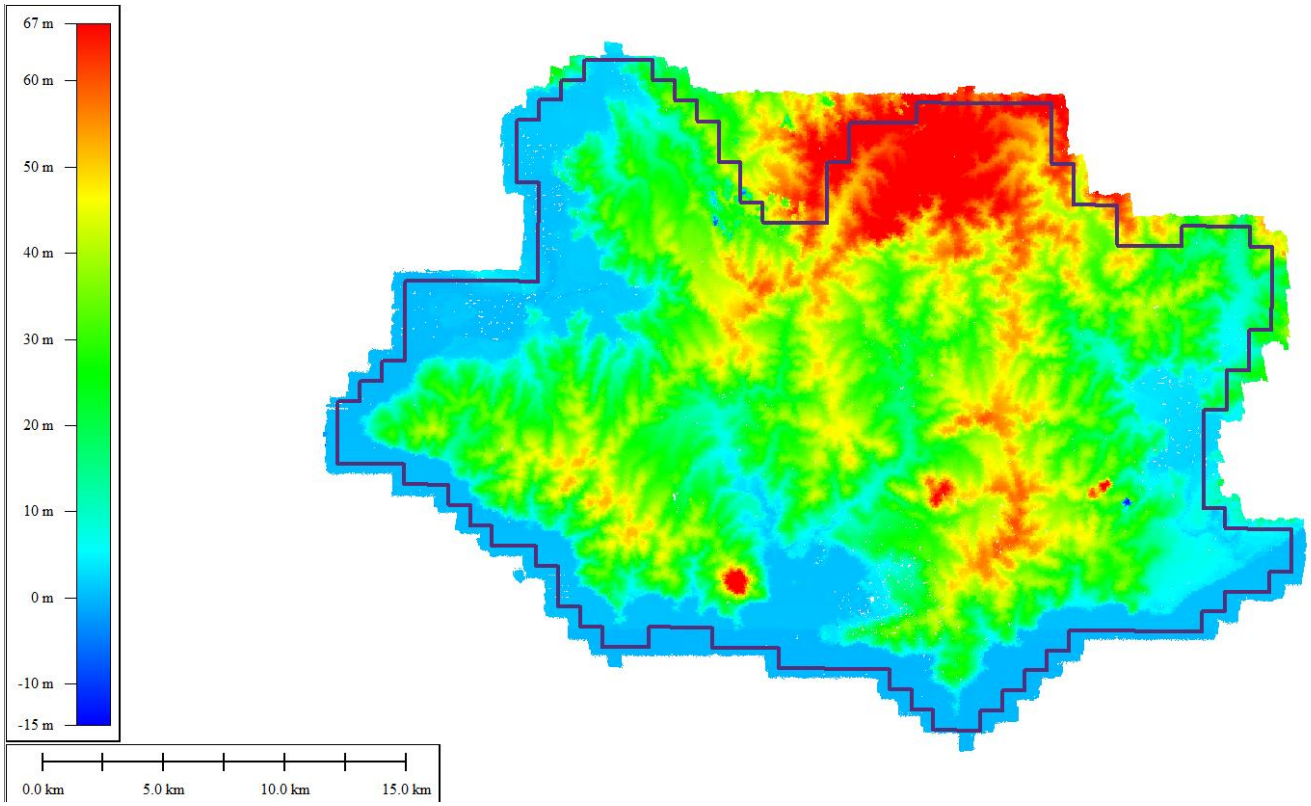


Figura 23 - Malla de Puntos da Colecta de Datos de Perfilamiento (solamente Puntos de suelo).

El Apéndice 10 presenta la MALLA DE PUNTOS LÁSER REMUESTREADA, disponible en formato *.LAS.

La figura a continuación muestra una visualización de una franja de vuelo láser, generada a partir del archivo de adquisición sin procesar, con clasificación automática de la malla de puntos y una vista de perfil lateral de los edificios.

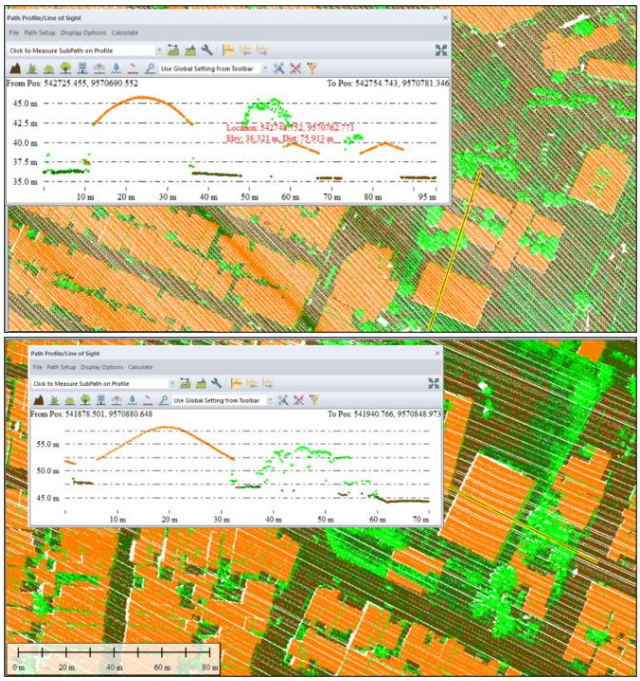


Figura 24 - Ejemplos de visualización de archivo bruto con perfil lateral.

5.1.4 Modelo Digital de Superficie - MDS

El MDS es un producto cartográfico obtenido a partir de un modelo matemático que representa el terreno (expuesto o no) y las características que se encuentran sobre él (edificios, puentes, vegetación, etc.), de forma continua y suavizada, a partir de datos reales debidamente estructurados y muestreados. El MDS se obtuvo mediante el procesamiento y la clasificación de todos los puntos topográficos (allpoints) obtenidos mediante perfilado láser.

Tras el procesamiento de la trayectoria y la integración de los datos brutos del sensor láser, el posterior ajuste de la nube de puntos y la exportación de los archivos en formato *.LAS1.2, estos no solo se entregaron como datos brutos de perfilado láser, sino que también se enviaron al sector responsable de la clasificación de la nube de puntos. Esto tiene como objetivo separar los elementos de cada clase prevista en la licitación y eliminar el ruido atmosférico, lo que permite la composición de archivos que representan la superficie y sus elementos componentes.

Los productos MDS cumplen las especificaciones establecidas en el CONTRATO 09/2024 para este producto y cumplen los requisitos:

- La nube de puntos MDS tiene una densidad horizontal de 16 puntos/m² y se clasificó en formato *.LAS y *.LAZ, con los datos clasificados en suelo, vegetación y edificaciones.
- Se proporcionó un modelo digital de superficie, derivado de datos láser, interpolado mediante el método del vecino más cercano con una resolución de 1 m en formato *.TIF/*.TFW.

- El control de calidad incluye la distribución homogénea de los puntos de control en el área de mapeo para garantizar estadísticamente que el modelo digital de superficie generado se corresponda con la realidad de la superficie.

5.1.5 Clasificación de MDS

Para la clasificación, se utilizó el software Terrasolid, que funciona como un complemento de Microstation V8i. En este paquete de software, se utilizó el módulo TerraScan, capaz de leer la nube de puntos y reconocer toda la información asociada, como el número de retorno, la intensidad del pulso, la identificación de la trayectoria de vuelo y otros detalles.

Las clases que se identificarán en la MDS son las previstas para el formato *.LAS1.4 ASPRS, según la tabla a continuación.

Tabla 3 - Clases ASPRS para el MDS.

1	Default (No clasificado)
2	Terreno (Ground)
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificación (Building)
9	Agua
11	Superficie de carretera (Road surface)
13	Protector de cable (Wire guard / Shield)
14	Conductor eléctrico (Wire conductor / Phase)
15	Torre de transmisión
17	Plataforma de puente (Bridge Deck)
24	Clase-24 (sin descripción específica)
105	Construcción especial
106	Viaducto / Pasarela / Puente
120	Estallidos (puntos fuera de rango)
121	Torre de comunicación
144	Edificación/Construcción(Building_Construcao)

Los datos se clasificaron como se indicó anteriormente en las clases 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Una breve ilustración del proceso de clasificación en el software TerraScan con las diversas visualizaciones, donde comienza con todos los puntos en la Clase 1 (Sin clasificar) y comienza el proceso de configuración y aplicación de macros específicas a los datos.

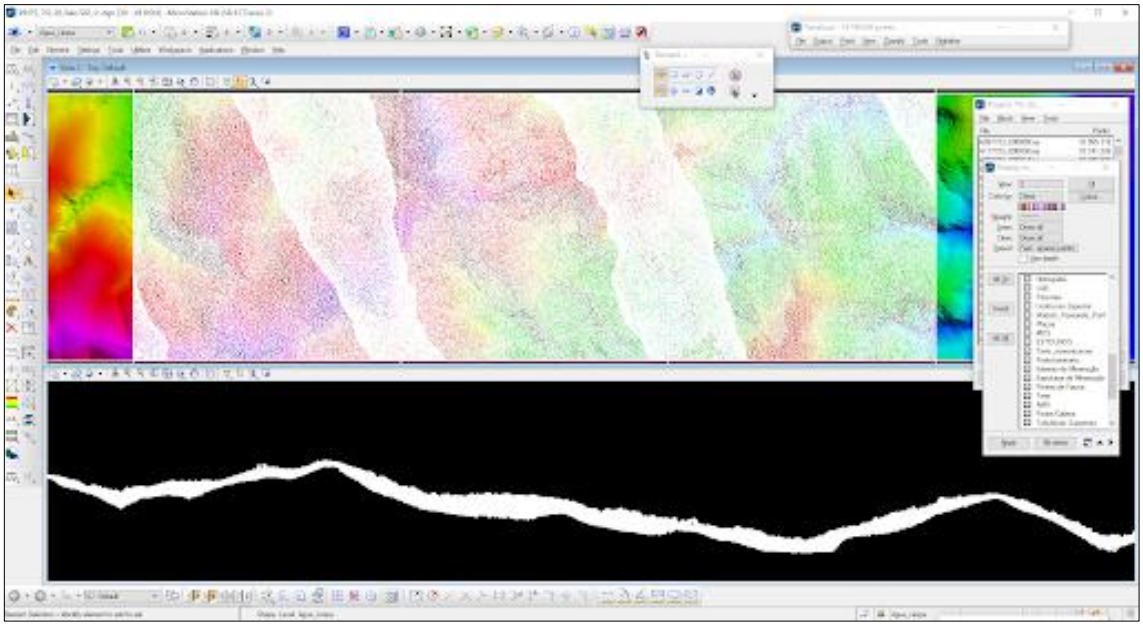


Figura 25 - Nube de Puntos Sin Clasificación.

La primera macro en el proceso de clasificación busca identificar los puntos por su retorno, evaluando siempre si, para un pulso dado, hay más retornos. La lógica es que el último retorno siempre corresponde al suelo (Clase 2). De esta manera, con los puntos identificados automáticamente, se analiza la morfología (geometría de la triangulación), considerando los ángulos y las distancias de la cuadrícula triangular, como se muestra en la figura siguiente.

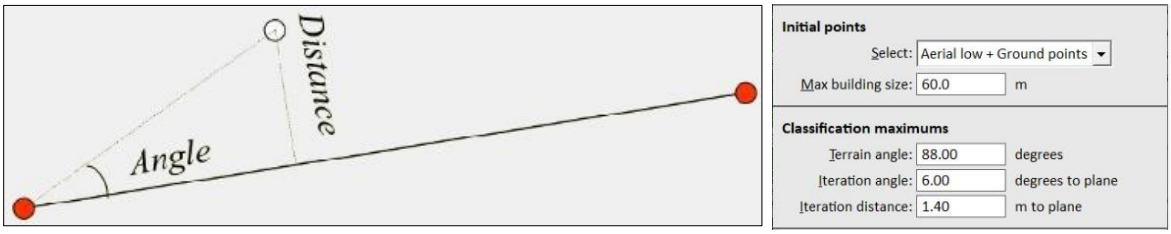


Figura 26 - Parámetros de Clasificación de Ground.

Luego de ejecutar la rutina sobre todos los datos, el primer resultado es el terreno clasificado, y con estos puntos es posible ajustar la visualización del software para ver los puntos por su clase, como se muestra en la siguiente figura.

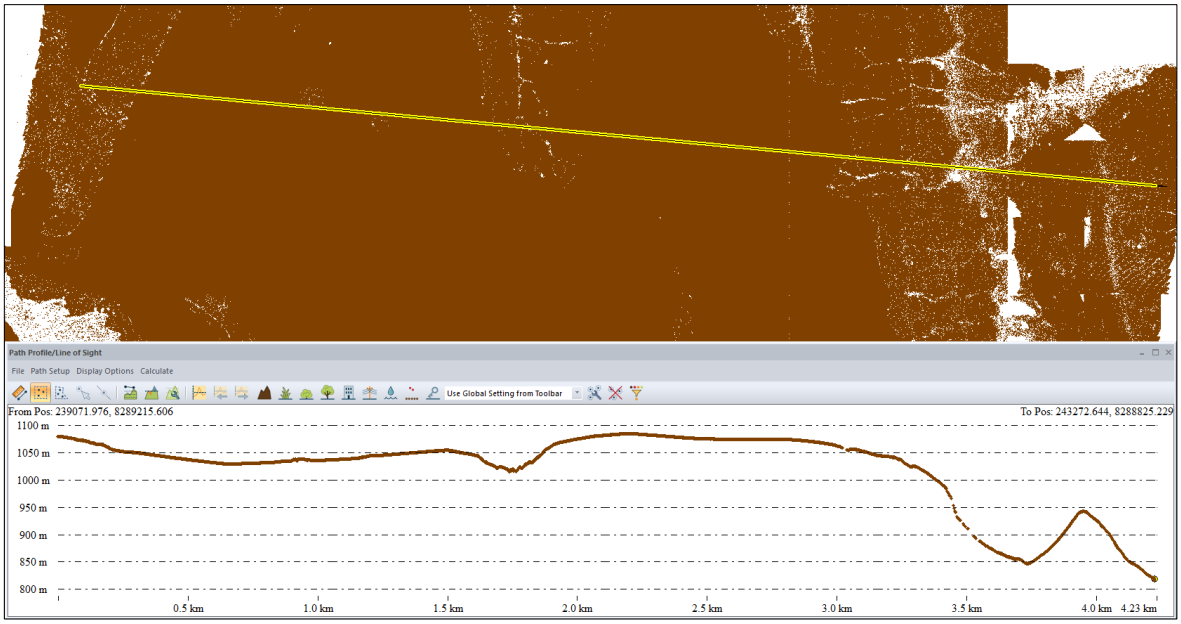


Figura 27 - Visualización de Puntos por Clase luego de la Primera Clasificación.

Tras obtener los puntos de suelo, el siguiente paso es determinar su clasificación entre los puntos restantes, dentro de las clases de vegetación, clasificándolos en tres clases (baja, media y alta). Esto generará una nube de puntos con los resultados de suelo y vegetación, todos dentro del mismo archivo *.LAS1.2.

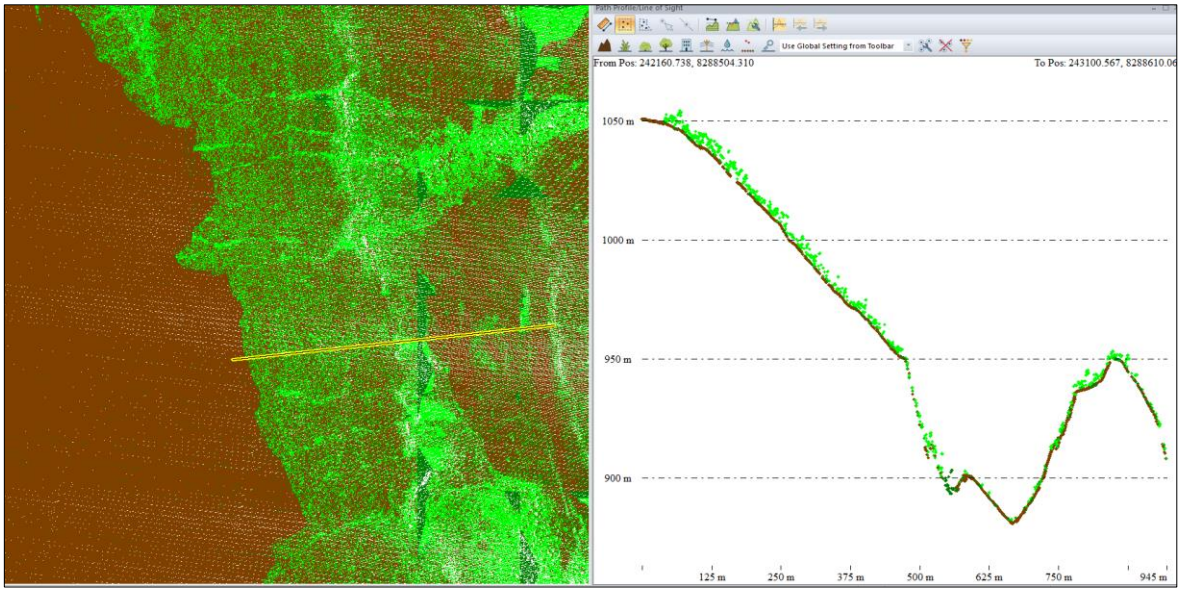


Figura 28 - Visualización dos Puntos de Solo e Vegetación.

Luego de clasificar la vegetación, es posible buscar edificaciones en esta nube de puntos; el resultado en zonas urbanizadas se puede ver en la siguiente figura.

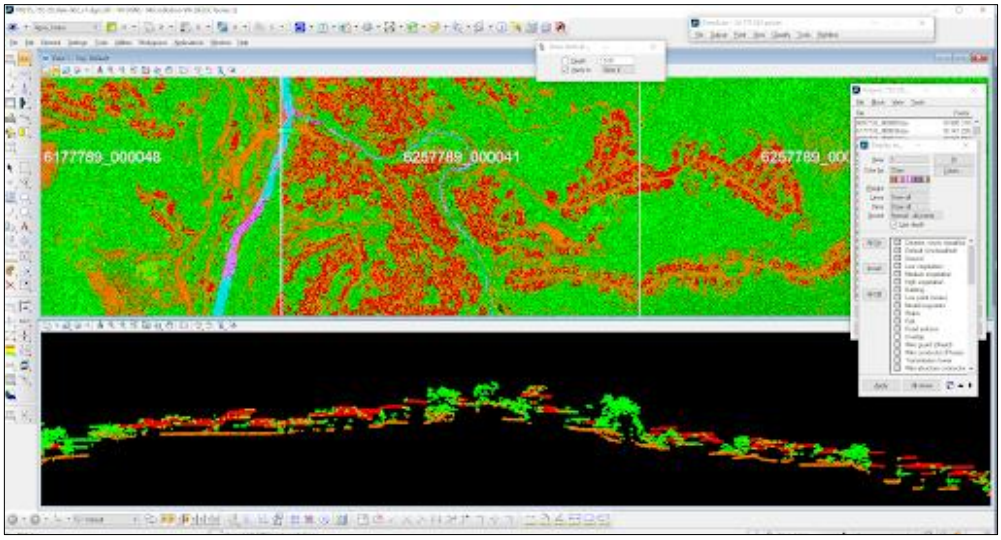


Figura 29 - Visualización de Puntos de edificaciones en área urbana.

Una vez finalizada la clasificación, los datos se exportarán en formato *.LAS, versión 1.4, correctamente recortados por hoja a escala 1:1000, conservando todos los puntos de clasificación resultantes (clases 2, 3, 4, 5 y 6). Esto permitirá al usuario realizar diversos análisis, como cargar un solo archivo de una región geográfica, comprobar la altura de la vegetación, los edificios e incluso filtrar solo los puntos del terreno.

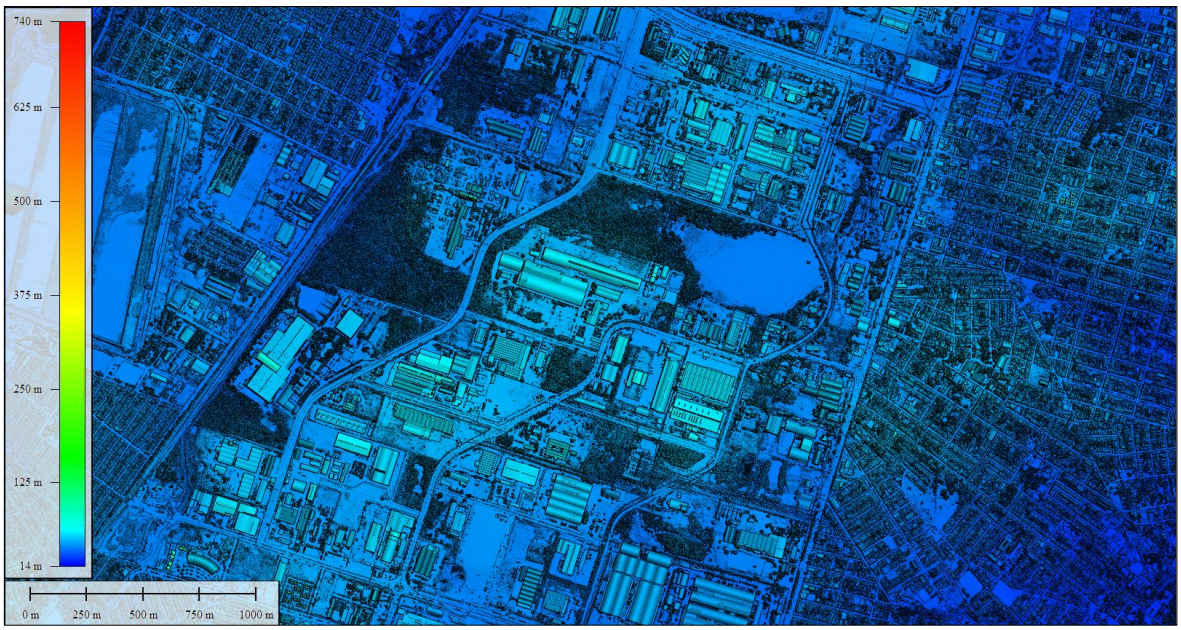


Figura 30 - Visualización de MDS luego de interpolar todos los Puntos.

El Apéndice 12 contiene los archivos relacionados con la entrega del MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE, basado en la articulación a escala 1:500. Están disponibles en los siguientes formatos: *.LAS y *.TIF.

5.1.6 Control de Calidad

Para garantizar la calidad del producto, se realizaron las siguientes actividades de control:

Imágenes aéreas

Calidad geométrica

• Verificación del solapamiento lateral;

• Verificación del solapamiento longitudinal;

• Verificación de la deriva y la orientación de la cámara;

• Verificación del tamaño de píxel.

Calidad radiométrica y visual de las imágenes digitales

• Verificación de la ausencia de ruido y desenfoque de movimiento;

• Evaluación de la nitidez, el brillo y el contraste;

• Verificación de la ausencia de nubes, neblina y humo;

• Verificación de los niveles de gris de cada imagen;

• Verificación del ajuste del histograma de las imágenes (ajuste de las diferencias de brillo y saturación).

Generación de archivos de entrega

• Verificación y validación de fotografías aéreas.

Nube de puntos láser

6. APOYO DE CAMPO

Para la adquisición de puntos de control terrestre, se utilizaron dos receptores GNSS Trimble, modelos R5 y R780. Estos son dispositivos de alta precisión ampliamente utilizados en levantamientos topográficos y aerofotogramétricos. La selección de los puntos se realizó previamente, basándose en el análisis de fotografías aéreas, con el objetivo de garantizar una buena distribución espacial y representatividad en toda el área de interés.

Estos puntos se organizaron en un mapa georreferenciado, con sus ubicaciones predefinidas, para optimizar el movimiento en campo y facilitar la navegación a cada una de las ubicaciones. El mapa se cargó en dispositivos móviles, como teléfonos celulares y colectores SIG, lo que permitió a los equipos de campo acceder a la información de forma práctica y eficiente durante las actividades.

Durante el levantamiento, se utilizaron correcciones en tiempo real mediante la tecnología NTRIP, conectándose a las bases de referencia del Instituto Geográfico Militar (IGM). Este enfoque permitió obtener coordenadas con precisión centimétrica directamente en el momento de la toma. Paralelamente, se registraron todos los datos brutos para permitir su posterior posprocesamiento, lo que aumentó aún más la fiabilidad y precisión de la información obtenida. Para cada punto estudiado, se elaboró una monografía individual que contenía el nombre del punto, sus coordenadas geográficas, una fotografía de campo del objeto de apoyo (punto de referencia o elemento visual utilizado como referencia) y la posición exacta de la varilla GNSS en el momento de la medición. Estos registros detallados garantizan la trazabilidad y la calidad de los datos, además de servir como documentación de apoyo para futuras validaciones.

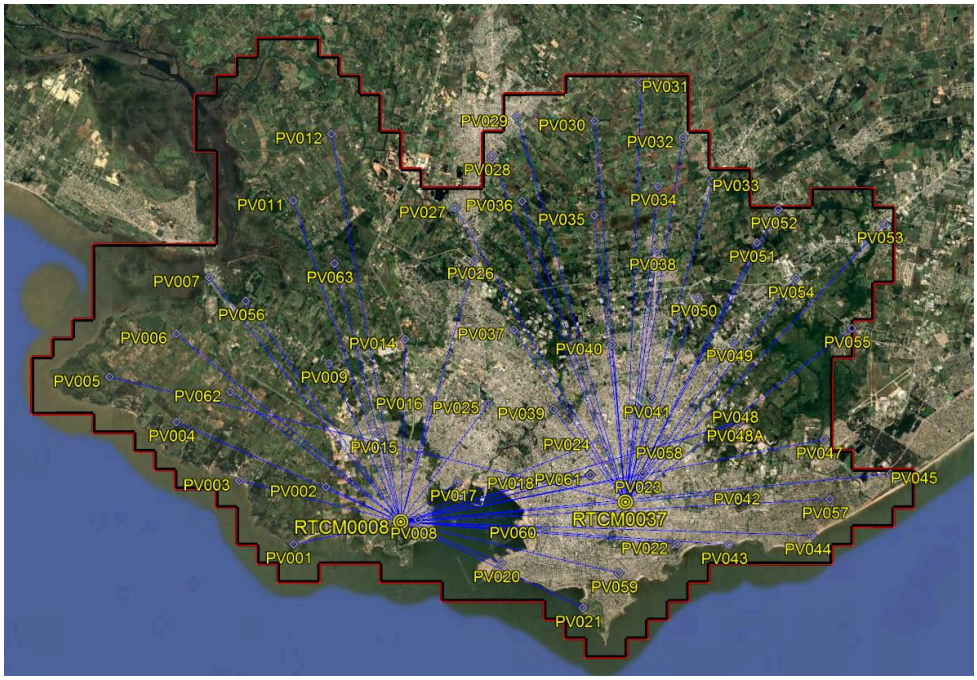


Figura 31 - Distribución de Puntos do Apoyo de Campo.

En total, se recopilaron 60 puntos de tipo suplementario para controles fotogramétricos y de calidad. Las siguientes tablas presentan las coordenadas de los puntos de apoyo suplementarios, tanto horizontales como verticales, y de calidad.

Figura 32 - Puntos do Apoyo Suplementario



El Anexo 08 contiene el informe de APOYO COMPLEMENTARIO, que incluye los puntos de recolección de datos de campo. Está disponible en los siguientes formatos: *.KMZ y *.XLSX.

Ponto	Este	Er_Est	Norte	Er_Nort	Latitud	Longitud	Alt_Geo	Er_Geo	N_Real	Alt_Ort	Vert_Amar	Alt.Antena	Dat_Visita	Observações
PV001	562825,933	0,018	6138122,053	0,018	S34°53'50,54411"	O56°18'44,54027"	29,891	0,043	14,630	15,261	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em estrutura de concreto.
PV002	564303,232	0,015	6140662,950	0,015	S34°52'27,73103"	O56°17'47,03892"	47,464	0,034	14,660	32,804	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em estrutura de concreto.
PV003	560429,213	0,021	6140960,859	0,021	S34°52'18,91696"	O56°20'19,70806"	16,071	0,052	14,721	1,350	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em rampa.
PV004	557651,683	0,022	6143581,478	0,022	S34°50'54,42882"	O56°22'09,75766"	42,261	0,057	14,794	27,467	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em terreno.
PV005	554686,934	0,020	6145607,580	0,020	S34°49'49,24748"	O56°24'06,97528"	46,964	0,057	14,852	32,112	RTCM0037	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em estrutura de madeira.
PV006	557673,720	0,031	6147507,574	0,031	S34°48'46,97647"	O56°22'09,86179"	26,295	0,067	14,838	11,457	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em estrutura de concreto.
PV007	559156,088	0,094	6149994,443	0,094	S34°47'25,94202"	O56°21'12,14693"	22,174	0,162	14,845	7,329	RTCM0008	2,000	12/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV008	568395,238	0,010	6139179,285	0,010	S34°53'14,92937"	O56°15'05,42640"	53,166	0,020	14,561	38,605	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em calçada.
PV009	564452,195	0,022	6146128,981	0,022	S34°49'30,26349"	O56°17'42,68439"	40,850	0,065	14,749	26,101	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em rampa.
PV011	562928,853	0,099	6153368,169	0,099	S34°45'35,61150"	O56°18'44,60264"	37,249	0,163	14,832	22,417	RTCM0008	2,000	12/12/2024	Ponto coletado em estrutura de concreto.
PV012	564654,645	0,088	6156313,697	0,088	S34°43'59,60616"	O56°17'37,53462"	33,699	0,149	14,834	18,865	RTCM0008	2,000	12/12/2024	Ponto coletado em estrutura de concreto.
PV014	567874,979	0,020	6147180,517	0,020	S34°48'55,32828"	O56°15'28,25482"	35,590	0,066	14,720	20,870	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV015	566638,857	0,014	6143001,069	0,014	S34°51'11,29158"	O56°16'15,71287"	31,503	0,029	14,670	16,833	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em calçada.
PV016	569038,895	0,014	6144499,987	0,014	S34°50'22,05884"	O56°14'41,64925"	31,914	0,034	14,663	17,251	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado em calçada.
PV017	570174,728	0,015	6140829,710	0,015	S34°52'20,91850"	O56°13'55,82348"	19,668	0,030	14,570	5,098	RTCM0008	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV018	573980,483	0,011	6140930,216	0,011	S34°52'16,68376"	O56°11'25,96003"	38,322	0,023	14,509	23,813	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV020	572074,040	0,015	6137221,643	0,015	S34°54'17,55863"	O56°12'39,89664"	18,742	0,038	14,449	4,293	RTCM0008	2,000	13/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV021	575703,418	0,016	6135200,260	0,016	S34°55'22,22075"	O56°10'16,23321"	19,512	0,037	14,329	5,183	RTCM0008	2,000	13/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV022	579926,195	0,028	6138007,487	0,028	S34°53'49,93281"	O56°07'30,78059"	39,114	0,061	14,320	24,794	RTCM0008	2,000	13/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV023	578403,721	0,039	6141149,676	0,039	S34°52'08,36568"	O56°08'31,82255"	64,506	0,068	14,434	50,072	RTCM0008	2,000	13/12/2024	Ponto coletado na calçada.
PV024	576481,891	0,018	6142633,249	0,018	S34°51'20,73627"	O56°09'48,00039"	65,857	0,031	14,505	51,352	RTCM0008	2,000	13/12/2024	Ponto coletado na calçada.
PV025	571557,835	0,022	6144296,769	0,022	S34°50'28,02856"	O56°13'02,41365"	46,690	0,042	14,621	32,069	RTCM0008	2,000	16/12/2024	Ponto coletado na calçada.
PV026	571008,542	0,016	6150681,055	0,016	S34°47'00,92810"	O56°13'25,98420"	65,518	0,039	14,723	50,795	RTCM0008	2,000	12/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV027	570149,332	0,076	6152978,267	0,076	S34°45'46,57235"	O56°14'00,47903"	56,857	0,139	14,755	42,102	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado em terreno.
PV028	571791,036	0,020	6155257,411	0,020	S34°44'32,17762"	O56°12'56,60282"	78,737	0,054	14,754	63,983	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV029	572927,045	0,023	6156992,619	0,023	S34°43'35,56097"	O56°12'12,47024"	82,259	0,060	14,754	67,505	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV030	576387,394	0,022	6156784,231	0,022	S34°43'41,41467"	O56°09'56,35199"	97,490	0,066	14,714	82,776	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV031	578479,748	0,028	6158481,261	0,028	S34°42'45,75679"	O56°08'34,65457"	76,865	0,079	14,701	62,164	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV032	580310,674	0,080	6156019,817	0,080	S34°44'05,14419"	O56°07'21,83712"	72,098	0,121	14,661	57,437	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado em estrutura de concreto.
PV033	581589,492	0,044	6154067,159	0,044	S34°45'08,16285"	O56°06'30,87298"	57,643	0,068	14,625	43,018	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV034	579183,570	0,022	6153873,067	0,022	S34°45'15,14560"	O56°08'05,42873"	75,308	0,054	14,655	60,653	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado na calçada.
PV035	576335,466	0,025	6152608,560	0,025	S34°45'56,97383"	O56°09'57,03127"	72,066	0,053	14,678	57,388	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado na calçada.
PV036	573135,814	0,023	6153252,643	0,023	S34°45'36,91056"	O56°12'03,09310"	79,343	0,063	14,723	64,620	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado em mureta.
PV037	572717,837	0,039	6147558,823	0,039	S34°48'41,84414"	O56°12'17,76034"	50,447	0,093	14,659	35,788	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV038	579123,959	0,017	6151012,481	0,017	S34°46'48,01781"	O56°08'06,80485"	64,271	0,045	14,619	49,652	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV039	574464,822	0,021	6144016,958	0,021	S34°50'36,35992"	O56°11'07,87173"	27,746	0,059	14,569	13,177	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado em terreno.
PV040	577063,812	0,021	6146862,098	0,021	S34°49'03,30898"	O56°09'26,48454"	61,460	0,060	14,582	46,878	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado em meio-fio,
PV041	578821,416	0,022	6144469,019	0,022	S34°50'20,50381"	O56°08'16,49617"	67,678	0,051	14,504	53,174	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV042	581537,395	0,013	6140183,584	0,013	S34°52'38,83643"	O56°06'28,06715"	44,263	0,027	14,346	29,917	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado em terreno.
PV043	582227,591	0,048	6137950,621	0,048	S34°53'51,11669"	O56°06'00,09159"	18,977	0,081	14,267	4,710	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado na calçada.
PV044	585952,888	0,049	6138331,085	0,049	S34°53'37,65587"	O56°03'33,46645"	17,978	0,093	14,193	3,785	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV045	589446,428	0,016	6141038,085	0,016	S34°52'08,70346"	O56°01'16,88063"	19,224	0,031	14,209	5,015	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado em terreno.
PV047	586496,768	0,012	6142589,543	0,012	S34°51'19,26416"	O56°03'13,62449"	19,401	0,028	14,312	5,089	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado em estrutura de concreto.
PV048	582747,427	0,017	6143379,406	0,017	S34°50'54,74943"	O56°05'41,54341"	46,215	0,038	14,406	31,809	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado em estrutura de concreto.
PV048A	582739,976	0,016	6143387,879	0,016	S34°50'54,47658"	O56°05'41,83978"	45,922	0,037	14,407	31,515	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV049	582516,458	0,018	6146941,241	0,018	S34°48'59,20110"	O56°05'51,89910"	43,719	0,050	14,494	29,225	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado em terreno.
PV050	580936,765	0,018	6148942,570	0,018	S34°47'54,69473"	O56°06'54,76845"	49,675	0,044	14,558	35,117	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado em terreno.
PV051	583569,034	0,025	6151334,793	0,025	S34°46'36,27839"	O56°05'12,04430"	53,871	0,057	14,559	39,312	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado em estrutura de concreto.
PV052	584539,599	0,022	6152805,213	0,022	S34°45'48,26073"	O56°04'34,39448"	51,681	0,060	14,566	37,115	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado na calçada.
PV053	589271,438	0,019	6152118,460	0,019	S34°46'09,10062"	O56°01'28,01510"	48,182	0,062	14,481	33,701	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV054	585292,161	0,021	6149735,001	0,021	S34°47'27,69323"	O56°04'03,67284"	44,695	0,062	14,504	30,191	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV055	587777,935	0,021	6147504,430	0,021	S34°48'39,33584"	O56°02'25,02818"	23,985	0,051	14,416	9,569	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV056	560786,102	0,054	6148926,956	0,054	S34°48'00,24904"	O56°20'07,72995"	30,680	0,091	14,819	15,861	RTCM0008	2,000	12/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV057	586743,989	0,018	6139932,402	0,018	S34°52'45,43653"	O56°03'02,89872"	20,642	0,032	14,227	6,415	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV058	579353,249	0,019	6142653,783	0,019	S34°51'19,27726"	O56°07'54,93924"	73,099	0,040	14,453	58,646	RTCM0037	2,000	16/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV059	577314,373	0,035	6136732,653	0,035	S34°54'32,04209"	O56°09'13,25588"	43,770	0,068	14,339	29,431	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV060	574054,467	0,012	6138741,608	0,012	S34°53'27,70696"	O56°11'22,34874"	25,707	0,025	14,454	11,253	RTCM0008	2,000	14/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV061	576083,987	0,035	6141087,457	0,035	S34°52'11,02035"	O56°10'03,16355"	54,031	0,081	14,476	39,555	RTCM0008	2,000	13/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV061A	576053,621	0,034	6141103,818	0,034	S34°52'10,49743"	O56°10'04,36486"	54,367	0,054	14,477	39,890	RTCM0008	2,000	13/12/2024	Ponto coletado em estrutura metálica.
PV062	560067,471	0,021	6144909,816	0,021	S34°50'10,80543"	O56°20'34,97543"	51,986	0,045	14,784	37,202	RTCM0008	2,000	17/12/2024	Ponto coletado no asfalto.
PV063	564745,946	0,043	6150557,264	0,043	S34°47'06,44832"	O56°17'32,35054"	40,755	0,067	14,793	25,962	RTCM0008	2,000	12/12/2024	Ponto coletado no asfalto.

Figura 33 - Monografía de Puntos de Apoyo.

7. AEROTRIANGULACION DIGITAL

El objetivo de la aerotriangulación es calcular los parámetros de orientación externa de las imágenes, dando como resultado las coordenadas X, Y y Z de los centros de perspectiva y los ángulos Omega (ω), Phi (φ) y Kappa (κ) en el momento en que se tomaron las fotos con una precisión compatible con la escala final deseada (Figura 30).

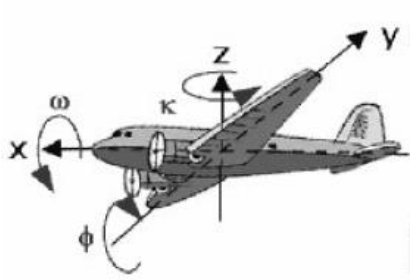


Figura 34 - Parámetros de Orientación Exterior.

Para el desarrollo de la aerotriangulación, TOPOCART adoptó el método ISO (Orientación Integrada de Sensores) con la introducción de mediciones GPS/INS del receptor GPS y la IMU, además de los puntos de apoyo suplementarios e imágenes aéreas.

La cantidad y distribución de los puntos de apoyo suplementarios se planificaron para garantizar la precisión esperada en los resultados de la aerotriangulación para la elaboración de productos cartográficos a escala 1:500.

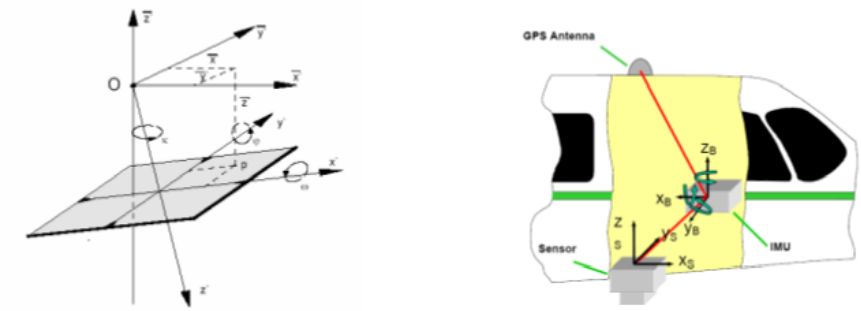


Figura 35 - Elementos necesarios en la orientación exterior e su obtención directa durante el vuelo para empleo del Método ISO - Integrated Sensor Orientation en la Aerotriangulación.

7.1.1 Software Utilizado

Para realizar la aerotriangulación, TOPOCART utilizó el software Match-AT de Inpho. El modelo de ajuste se basa en el método de bloques de haz de perspectiva, con la imagen como unidad del proceso. Match-AT es un programa informático centrado en la aerotriangulación automática y asistida.

En resumen, las características distintivas del software utilizado en la etapa de aerotriangulación son las siguientes:

• Ajuste riguroso mediante el método de bloques de haz de perspectiva, que permite ajustar bloques de diferentes tamaños y formas;

• Disponibilidad de diversas herramientas de análisis espacial y visualización de informes, que facilitan la interpretación de los datos y la intervención del usuario para identificar y corregir posibles inconsistencias;

• Procedimientos de correlación altamente sofisticados. Para ello, se utilizan robustos modelos matemáticos y estadísticos;

• Cabe destacar también su interfaz perfectamente estructurada para el uso de datos de vuelos con asistencia, lo que permite obtener los resultados finales del ajuste en menos tiempo y con mayor precisión.

7.1.2 Etapas del proceso de aerotriangulación

Inicialmente, toda la información relevante para el diseño del proyecto, el establecimiento de los estándares de precisión de ajuste y los datos del sensor utilizado se introdujeron en el software Match-AT.

Con la determinación de los datos del vuelo con soporte (coordenadas de los centros de perspectiva y ángulos de las fotografías) y la disponibilidad de imágenes de la región de estudio, los modelos se orientaron preliminarmente en el software Match-AT.

Utilizando herramientas de correlación robusta, se generaron puntos de enlace entre los modelos y los puntos recopilados en el soporte suplementario se insertaron mediante lectura estereoscópica.

Tras completar los pasos mencionados, se realizó el ajuste de bloques, observando los resultados estadísticos y el análisis gráfico de la distribución y el enlace de los puntos de enlace.

Los valores calculados de la orientación exterior se exportaron para su uso en actividades posteriores. El sistema cartográfico utilizado fue SIRGAS ROU98.

A continuación, se describe un resumen del proceso de aerotriangulación.

DATOS DE ENTRADA

• Centros de proyección y ángulos aproximados de las fotografías determinados por el receptor GPS y la IMU durante la cobertura fotogramétrica aérea;

• Imágenes digitales en formato TIFF;
• Puntos de apoyo suplementarios;
• Datos adicionales (información del certificado de calibración de la cámara).

CÁLCULO

- Generación del Proyecto AT: introducción de coordenadas y giros (debidamente posprocesados en la etapa de cobertura aerofotogramétrica), datos de entrada como calibración de cámaras, coordenadas de puntos de apoyo y verificación, altura promedio del terreno, altura de vuelo e imágenes digitales;
- Orientación interna: Para procesar la orientación interna de las imágenes obtenidas por la cámara digital Phase One iXU-RS-1000, fue necesario ingresar los datos del certificado de calibración;
- Inicialización: la inicialización del proceso permite definir la ubicación de las áreas de Von Gruber, los puntos de partida son los valores aproximados de X, Y, Z, Omega (ω), Phi (φ) y Kappa (κ);
- Generación de Puntos de Enlace: En la aerotriangulación automática, se generó automáticamente una gran cantidad de puntos en las áreas conocidas como Gruber. Estos puntos son responsables de conectar los modelos y las pistas.
- Medición de Puntos de Lazo: una vez generados los Puntos de Lazo, la lectura de los Puntos de Lazo suplementarios se realiza de forma asistida y estereoscópica, asegurando la perfecta ubicación y consistencia de cada punto;
- Posprocesamiento: En esta fase, se realiza el procesamiento matemático del bloque, describiendo los residuos de los Puntos de Enlace, el soporte suplementario y la verificación (Check). Se utiliza un sistema de detección de errores llamado Detección Automática de Errores. El análisis de los resultados se realiza gráfica y numéricamente, previendo el número de iteraciones necesarias hasta que los resultados establecidos converjan.

7.1.3 División de Bloques de Aerotriangulación

La ejecución de la etapa de Aerotriangulación Digital comprendió la división del área en 33 (treinta y tres) bloques, como se muestra en la Figura 37.

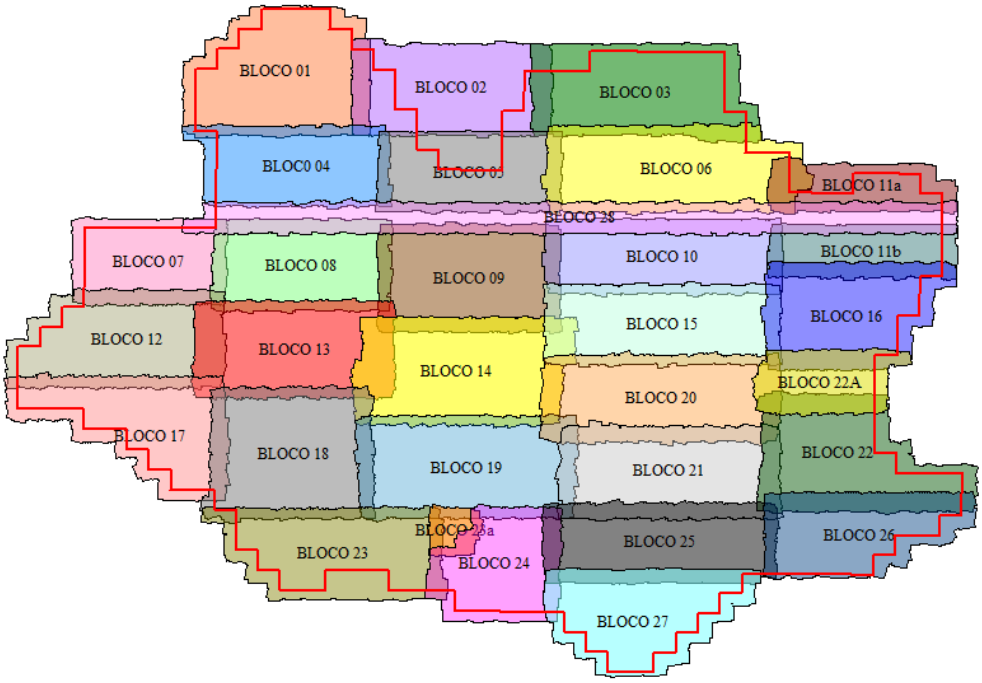


Figura 36 - División de bloques de aerotriangulación para a área de estudio.

7.1.4 Análisis de Calidad y Resultados Obtenidos

Durante el proceso de aerotriangulación, se llevó a cabo un riguroso control de calidad en todas las etapas, incluyendo el análisis de la orientación interna, la verificación de la densidad y distribución de los puntos de enlace, y la evaluación de los resultados estadísticos, destacando el estudio comparativo de las coordenadas de los puntos de control.

Los informes sobre el ajuste de los bloques aerotriangulados están disponibles en el Apéndice 01.

Las figuras a continuación muestran la distribución de los Puntos de Apoyo Suplementarios y los Puntos de Enlace generados.

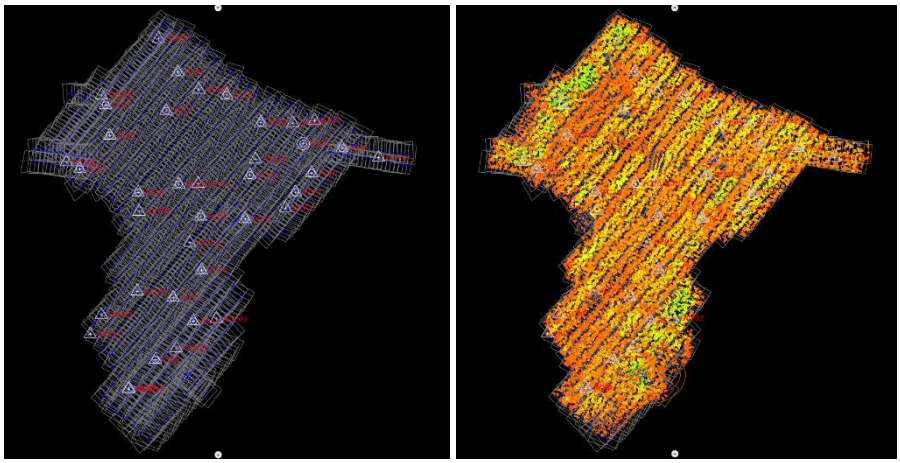


Figura 37 - Ejemplos: izquierda, distribución de los Puntos de Apoyo de Campo Suplementarios. Derecha, distribución de Puntos de enlace.

La Figura siguiente muestra el análisis gráfico de Puntos de enlace.

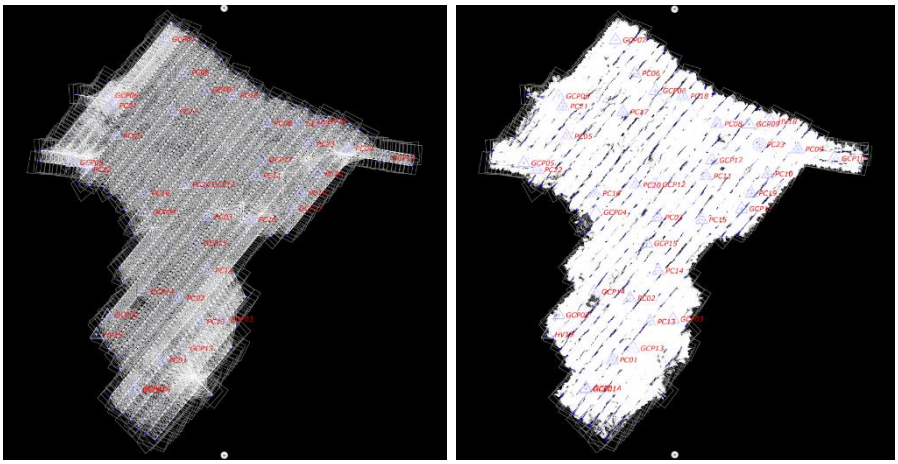


Figura 38 - Análisis gráfico de distribución y amarre de tie points.

Tras el ajuste final del bloque aerotriangulado, se exportaron los datos definitivos de orientación exterior para su uso por las estaciones fotogramétricas en las etapas de Restitución Estereofotogramétrica Digital y Ortoimagen Digital, en la orientación de los modelos estereoscópicos.

La aerotriangulación cumplió con los criterios de precisión descritos a continuación, con las precisiones esperadas para el ajuste de triangulación de:

- Puntos Fotogramétricos:
  i. EMQ (X, Y)= 25µm (11,5cm);
  ii. EMQ (Z)= 25µm (11,5cm);
  iii. Tolerancia máxima admitida (X, Y, Z)= 50µm (23,0cm);

- Puntos de Apoyo:

i. EMQ (X, Y, Z)= 40µm (18,4cm);
ii. Tolerancia máxima admitida (X, Y, Z)= 60µm (27,6cm);

- Desvío Estándar de Bloque Aerotriangulado:
  i. Em X, Y= 25µm (11,5cm);
  ii. Em Z= 95µm (43,7cm);

- Puntos de Enlace (Tie Points):
  i. Em X, Y= 0,25mm a escala 1:1.000 (25,0cm);
  ii. Em Z= 0,25 * equidistancia de curva (25,0cm).

7.1.5 Controle de Calidad

Durante a Aerotriangulación fue realizado un control de calidad de todas las etapas, entre las cuales se citan:

- Verificación de densidad y distribución de Puntos de enlace;
- Verificación de resultados estadísticos;
- Estudio comparativo de los residuos de las coordenadas de los Puntos de control.

7.1.6 Productos Entregados

Los productos que componen la etapa de Aerotriangulación Digital se enumeran a continuación:

• Informe de Resultados de Aerotriangulación, que contiene los resultados de la verificación y el análisis estadístico que acreditan la calidad de los bloques aerotriangulados, en formato TXT;

• Informe Técnico de Aerotriangulación, que contiene el detalle de los pasos involucrados y los resultados del proceso, en formato PDF.