



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Comparación de información
geográfica obtenida de
levantamientos con drone:
fotogramétrico y LiDAR**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geomática

P R E S E N T A

Alejandra Gutiérrez Rojas

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Manuel Núñez
Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado COMPARACION DE INFORMACION GEOGRAFICA OBTENIDA DE LEVANTAMIENTOS CON DRONE: FOTOGRAMETRICO Y LIDAR que presenté para obtener el título de INGENIERA GEOMÁTICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ALEJANDRA GUTIERREZ ROJAS
Número de cuenta: 314247041

Resumen

La fotogrametría y el LiDAR aerotransportado mediante RPAS son dos métodos ampliamente utilizados para la recopilación y generación de información geoespacial de alta resolución, ambos ocupan sensores ópticos y de tipo remoto para este fin, el primero de manera pasiva y el segundo de manera activa. Sin embargo, persisten diferencias técnicas relevantes en términos de precisión, desempeño geométrico, eficiencia operativa y subproductos que generan, es decir, la eficiencia de cada método, todavía es un tema de debate. El objetivo de este estudio es comparar la información geoespacial generada del levantamiento fotogramétrico y LiDAR realizados con dron en un área agrícola de aproximadamente 7 ha en el estado de Tlaxcala evaluando la calidad y precisión de productos cartográficos base como el Modelo Digital de Superficie (MDS), el Modelo Digital de Terreno (MDT) Y la ortofoto, así como sus productos derivados.

La metodología consistió en la adquisición de datos utilizando un dron DJI Matrice 300 RTK equipado con cámara Zenmuse P1 y escáner Zenmuse L1, complementada con el levantamiento de puntos de control terrestre mediante GNSS. Posteriormente, los datos fueron procesados mediante flujos de trabajo para cada técnica, permitiendo la generación de los modelos base y de productos secundarios como pendientes, curvas de nivel, hidrografía y modelos de altura de vegetación. Finalmente, se realizó un análisis comparativo enfocado en precisión altimétrica, comportamiento geométrico y desempeño operativo. Los resultados evidencian diferencias asociadas a las características de la cobertura superficial, particularmente en zonas con vegetación, así como variaciones en densidad de información. A partir de estos hallazgos se proponen criterios técnicos que apoyan la selección metodológica en proyectos geomáticos realizados con RPAS.

Palabras clave: Fotogrametría, LiDAR, GNSS, Modelos y RPAS.

Abstract

Photogrammetry and airborne LiDAR using RPAS are two extensively used methods for collecting and generating high-resolution geospatial information. Both employ optical and remote sensors for this purpose, the first passively and the second actively. However, there are still significant technical differences in terms of accuracy, geometric performance, operational efficiency, and the byproducts they generate, meaning that the efficiency of each method is still a matter of debate. The objective of this study is to compare the geospatial information generated from photogrammetric and LiDAR surveys conducted with a drone in an agricultural area of approximately 7 ha in the state of Tlaxcala, evaluating the quality and accuracy of base cartographic products such as the Digital Surface Model (DSM), the Digital Terrain Model (DTM), and the orthophoto, as well as their derivative products.

The methodology consisted of data acquisition using a DJI Matrice 300 RTK drone equipped with a Zenmuse P1 camera and Zenmuse L1 scanner, complemented by the survey of ground control points using GNSS. The data was then processed using workflows for each technique, allowing the generation of base models and secondary products such as slopes, contour lines, hydrography, and vegetation height models. Finally, a comparative analysis was performed focusing on altimetric accuracy, geometric behavior, and operational performance. The results show differences associated with surface coverage characteristics, particularly in areas with vegetation, as well as variations in information density. Based on these results, technical criteria are proposed to support methodological selection in geomatics projects carried out with RPAS.

Keywords: Photogrammetry, LiDAR, GNSS, Models, and RPAS.

Índice

Lista de Abreviaturas.....	9
Introducción.....	11
Delimitación del Estudio.....	12
Objetivos del Estudio.....	13
Capítulo 1. Fundamentos de la Medición de Terrenos.....	15
1.1. Geodesia.....	15
1.2. Alturas y Superficies de Referencia.....	16
1.3 Georreferenciación: Sistemas, Marcos y Datums.....	17
1.4. Geomática.....	18
1.5. Representación de la Información Geográfica.....	18
1.6. Mapas y Modelos del Terreno.....	20
Capítulo 2. Recolección de Datos con Referencia Espacial.....	22
2.1. Levantamientos Geodésicos.....	22
2.2. Exactitud y Precisión.....	22
2.3. Sistema de Navegación Global por Satélite.....	23
2.3.1. Métodos de Recolección.....	24
2.3.2. Correcciones En Tiempo Real (RTK).....	27
2.4. Percepción Remota y Plataformas Aéreas.....	28
2.5. Fotogrametría Digital.....	29
2.5.1. Escala de las Fotografías.....	30
2.5.2. Plan de Vuelo.....	33
2.5.3. Control Terrestre.....	36
2.5.4. Recolección y Tratamiento de Datos Fotogramétricos.....	37
2.5.5. Productos Fotogramétricos, Errores y Mitigación.....	38
2.6. LiDAR Aéreo.....	40
2.6.1. Sistema de Escáner Láser.....	44
2.6.2. Sistemas GNSS, INS y Control.....	45
2.6.3. Recolección y Tratamiento de Datos LiDAR.....	46
2.6.4. Productos LiDAR Errores y Mitigación.....	49
2.7. LiDAR y Fotogrametría, Puntos de Encuentro y Discrepancias.....	50
2.7.1. Encuentro.....	50
2.7.2. Discrepancias.....	52
2.7.3. Técnicas Complementarias.....	53
Capítulo 3. Aproximación Metodológica.....	55
3.1. Área de estudio.....	57
3.2. Equipo y software.....	59
3.2.1. Computadora.....	59

3.2.2. Receptores GNSS Para PCT y Su Software.....	59
3.2.3. Plataforma Aérea.....	59
3.2.4. Sensor Fotogramétrico.....	60
3.2.5. Sensor LiDAR.....	60
3.2.6. Software.....	60
3.3. Adquisición de Datos.....	60
3.3.1. Planeación en gabinete.....	60
3.3.2. Trabajo en Campo.....	64
3.3.2.1. Levantamiento de Puntos de Control Terrestre (PCT).....	64
3.3.2.2. Vuelo Fotogramétrico.....	65
3.3.2.3. Vuelo LiDAR.....	65
3.3.2.4. Cierre de Actividades.....	66
3.4. Procesamiento.....	66
3.4.1. Control de Calidad de PCT.....	66
3.4.2. Procesamiento Fotogramétrico.....	67
3.4.3. Procesamiento LiDAR.....	67
3.4.4. Ajuste y Alineación de Nubes.....	68
3.4.5. Generación de Productos Cartográficos Derivados.....	68
3.4.6. Criterios de Evaluación Comparativa.....	69
Capítulo 4. Resultados, Análisis Comparativo y Criterios.....	70
4.1. Resultados del Levantamiento Fotogramétrico.....	70
4.1.1. Nube de Puntos Generada y Ortofoto.....	71
4.1.2. Precisión Geométrica.....	73
4.1.3. Clasificación de Terreno.....	73
4.1.4. Productos Derivados.....	75
4.2. Resultados del Levantamiento LiDAR.....	80
4.2.1. Nube de Puntos Generada.....	80
4.2.2. Precisión Geométrica.....	83
4.2.3. Clasificación de Terreno.....	83
4.2.4. Productos Derivados.....	85
4.3. Análisis Comparativo.....	90
4.3.1. Evaluación Operativa.....	90
4.3.2. Comparación de Exactitud Posicional.....	91
4.3.3. Comparación en la Clasificación de Terreno.....	94
4.3.4. Comparación de Densidad.....	99
4.3.5. Comparación de Productos Derivados.....	102
4.3.6. Comparación Sintética de Técnicas.....	112
4.4. Criterios Para la Selección de Metodologías Geomáticas.....	114

4.4.1. Factores Técnicos.....	115
4.4.2. Factores del Entorno.....	116
4.4.3. Factores Operativos.....	116
4.4.4. Propuesta de Flujo de Decisión.....	117
4.4.4. Recomendaciones según tipo de proyecto.....	120
Capítulo 5. Conclusiones.....	121
Referencias.....	124
Anexos.....	132
Anexo 1. Lista de Verificación.....	132
Anexo 2. Evidencia de Campo.....	139
Anexo 3. Formato de Identificación de Puntos Control Terrestre.....	141
Anexo 4. Reporte de Reconstrucción Fotogramétrica en DJI Terra.....	142
Anexo 5. Reporte de Reconstrucción LiDAR en DJI Terra.....	151
Anexo 6. Bitacoras.....	156

AGRADECIMIENTOS

Después de años de terminar la carrera hoy me encuentro aquí redactando una parte de mi tesis que pensé en ya no escribir por cansancio pero una muy buena amiga me recordó que, sin los agradecimientos, a mi escrito le faltaría el alma y empatía que veo en el mundo y cuando los empecé a escribir, vinieron a mi mente tantas personas a las que me gustaría darles las gracias. Es común empezar con madre y padre y por fortuna para mi, así será, les agradezco infinitamente a estos dos seres llenos de bondad que me han cuidado desde antes de que naciera y siempre pusieron como una de las prioridades mi formación académica, agradezco mucho a mi mamá, su amor a la madre Tierra me llevó a querer conocerla y cuidarla, le agradezco el darme ánimos en los días en los que yo no creía en mí y por siempre tener comida y amor para nutrir mi cuerpo y mis ideas, a mi papá, que me inculcó el valor de la responsabilidad, el amor por la lectura y la ciencia ficción, por despertarse junto conmigo cada mañana para llevarme a la escuela “el que despierte primero, despierta a su compañero”, tantos chistes que nos unen. Agradecerle a mi hermana, Manis te amo, tu compañía me inspira todos los días, me desafiaste a conocer el mundo, me motivaste a ir a España y en el proceso de escribir esta tesis me llevaste a Brasil, en general ver el mundo desde tus ojos es renovador, siempre has tenido oídos atentos para escuchar las historias que invento y para compartírnos lo que aprendimos del mundo.

De mi familia en general una lista importante de tías, tíos, primos, primas, sobrinas y sobrinos que siempre me sacan una sonrisa y me hacen sentir en hogar. Académicamente gracias a la UNAM vaya que me ha llevado lejos, laboralmente a cada lugar donde he trabajado que también me ha formado, a mis alumnos de prepa que, aunque nunca lean esto, me enseñaron mucho sobre el conocimiento.

A mis amigas, Les y Sofí, gracias por querer y abrazar a la Ale rebelde, valiente, miedosa, fiestera y reflexiva, contar mi vida estaría incompleto sin hablar de ustedes, a mi amigo Alonso que siempre defendió a la Ale ingeniera y a mi amigos Santiago que ha escuchado múltiples reflexiones sobre mi escribir. Gracias a unos Guerreros que hicieron inolvidable mi época universitaria y una mujer que completamente se lleva una ovación de pie como conoedora del territorio y como ser humano, Ari, gracias, gracias por darme un espacio para escribir esta tesis, por proporcionar un área de estudio y sobre todo por la amiga que he encontrado en tí, me siento más capaz, más valiente y más sabia.

Para realizar esta tesis le agradezco a mis tíos Joaquin y Margarita, que siempre me han cuidado y me prestaron su camioneta para llegar a Tlaxcala, a la empres Abreco Topografía que facilitó los receptores GNSS, a mi amigo Leonel que confía en mí y proporcionó el dron y los sensores con los que se levantó la información geográfica, los miembros de Flying labs México que me dieron un espacio donde escribir.

Agradezco mucho a este mundo, me queda claro con esta experiencia que la fuerza y el triunfo está en lo colectivo, en la comunidad, gracias a dios que me ha cuidado y finalmente gracias a mi por elegir seguir aprendiendo, por tenerme paciencia, amor y gracias a todos los momentos que me han hecho sentir que vale la pena hacer ciencia.

Lista de Abreviaturas

- (CHM, Canopy Height Model) - Modelo de Altura del Dosel
- (CSV, Comma-Separated Values) - Valores Separados por Comas
- (DJI) - DaJiang Innovations
- (ECW, Enhanced Compression Wavelet) - Wavelet de Compresión Mejorada
- (Em) - Escala Media
- (GNSS, Global Navigation Satellite System) - Sistemas Globales de Navegación por Satélite
- (GPS, Global Positioning System) - Sistema de Posicionamiento Global
- (GSD, Ground Sample Distance) - Tamaño del píxel sobre el terreno
- (IG) - Información Geográfica
- (IMU, Inertial Measurement Units) - Unidad de Medición Inercial
- (INEGI) - Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- (INS, Inertial Navigation System) - Sistemas de Navegación Inercial
- (ITRF, International Terrestrial Reference Frame) - Marco de Referencia Terrestre Internacional
- (KML, Keyhole Markup Language) - Lenguaje de Marcado de Ojo de Cerradura
- (LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) - Amplificación de la Luz por Emisión Estimulada de Radiación
- (LiDAR, Light Detection And Ranging) - Detección y Alcance de la Luz
- (M300) - Matrice 300 RTK
- (MDE) - Modelo Digital de Elevación
- (MDS) - Modelo Digital de Superficie
- (MDT) - Modelo Digital de Terreno

(m.s.n.m.) - Metros sobre el nivel del mar

(NMM) - Nivel Medio del Mar

(PCT) - Puntos de Control Terrestre

(PPK, Post-Processing Kinematic) - Cinemático en Post-Proceso

(RGB, Red Green Blue) - Rojo Verde Azul

(RMSE) - Raíz del Error Medio Cuadrático

(RPAS, Remotely Piloted Aircraft System) - Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia

(RTK, Real-Time Kinematic) - Cinemático en Tiempo Real

(SIG) - Sistemas de Información Geográfica

(SNIEG) - Sistema Nacional de Información Estadística y Geografía

(TIFF, Tagged Image File Format) - Archivo de Imágenes con Etiquetas

(TIN, Triangulated Irregular Network) - Red Irregular de Triángulos

Introducción

El uso de sensores remotos aerotransportados mediante plataformas piloteadas a distancia (RPAS, por sus siglas en inglés) ha transformado los procesos de adquisición de información geoespacial, permitiendo obtener modelos tridimensionales de alta resolución espacial con reducción significativa de tiempos de levantamiento y costos operativos (Salamanca & Pérez, 2008; Berné et al., 2014). En el ámbito de la ingeniería geomática, estas tecnologías se han integrado de manera creciente en aplicaciones relacionadas con caracterización del terreno, planeación territorial, infraestructura y análisis hidrológico (INEGI, 2015).

Entre las técnicas más utilizadas para recopilación de datos geográficos destacan la fotogrametría digital y el escaneo LiDAR, estas técnicas resultan altamente prácticas al reducir las mediciones directas en terreno y aumentar el número de datos sobre este. Ambas permiten la generación de nubes de puntos tridimensionales y productos cartográficos como Modelos Digitales de Superficie (MDS) y Modelos Digitales de Terreno (MDT), aunque presentan diferencias importantes en su principio de funcionamiento, densidad de información, capacidad de penetración de vegetación y comportamiento geométrico frente a distintas condiciones del terreno (Dong & Chen, 2018). La fotogrametría se basa en procesos estereoscópicos de imágenes, mientras que LiDAR utiliza pulsos láser activos capaces de registrar múltiples retornos, lo cual representa una ventaja potencial en escenarios con cobertura vegetal o superficies complejas (Goossens, et al., 2013).

A pesar de su uso extendido, en la práctica profesional la selección entre ambas metodologías suele realizarse en función de criterios económicos, disponibilidad de equipo o experiencias previas, más que a partir de evaluaciones técnicas comparativas basadas en métricas objetivas de precisión y desempeño geométrico. Esta situación genera

incertidumbre metodológica, especialmente en proyectos que requieren alta confiabilidad altimétrica, representación precisa del terreno natural y generación de productos derivados. Adicionalmente, factores como la cobertura vegetal, la morfología del terreno y las condiciones de levantamiento influyen directamente en la calidad de los productos obtenidos con cada técnica (Cartaya et al., 2014), lo que refuerza la necesidad de contar con análisis comparativos aplicados bajo condiciones reales de levantamiento con RPAS.

La presente investigación resulta necesaria desde un enfoque técnico y metodológico, ya que contribuye al análisis aplicado de dos de las principales tecnologías empleadas actualmente para la adquisición de información geoespacial con RPAS, fotogrametría y LiDAR y evalúa su desempeño real en términos de resolución espacial, consistencia geométrica y confiabilidad altimétrica, aspectos fundamentales para aplicaciones ingenieriles.

Delimitación del Estudio

El presente estudio se delimita espacialmente a un área agrícola de aproximadamente 7 ha ubicada en el estado de Tlaxcala. Desde el punto de vista tecnológico, la investigación se enfoca exclusivamente en el uso de plataformas RPAS, empleando un dron DJI Matrice 300 RTK equipado con cámara fotogramétrica Zenmuse P1 y escáner LiDAR Zenmuse L1. Metodológicamente, el estudio se limita a la comparación técnica entre levantamientos fotogramétricos y LiDAR realizados bajo condiciones similares de adquisición, procesamiento y referencia espacial, utilizando puntos de control terrestre obtenidos mediante GNSS para la evaluación geométrica. No se consideran en este trabajo otros sensores, plataformas aéreas tripuladas, imágenes satelitales ni técnicas distintas a las aquí descritas.

El alcance principal de esta investigación consiste en la evaluación de la calidad geométrica y precisión altimétrica de los productos cartográficos generados. El estudio contempla la generación y comparación de MDT, MDS y ortofoto obtenidos mediante ambas metodologías, así como el análisis de su comportamiento en zonas con distinta cobertura superficial, particularmente en áreas con vegetación. Asimismo se generan productos cartográficos derivados —como pendientes, curvas de nivel, hidrografía, modelos de sombreado y altura de vegetación— con el fin de evaluar su consistencia y utilidad técnica. A partir de estos análisis, se proponen criterios técnicos que apoyan la selección de la metodología más adecuada en proyectos geomáticos similares.

Las limitaciones se asocian principalmente a las condiciones específicas de levantamiento y procesamiento de los datos. Factores como la cobertura vegetal, las condiciones atmosféricas durante los vuelos pueden influir en la calidad de la información adquirida. De igual manera, la precisión de los modelos generados depende de la configuración de vuelo, la densidad de puntos obtenida, la distribución de los puntos de control terrestre y los parámetros de procesamiento utilizados, lo que puede introducir variaciones que responden a las condiciones particulares del proyecto y no necesariamente al potencial máximo de cada tecnología. Finalmente, el trabajo se centra en la comparación técnica de productos cartográficos y no incluye un análisis económico detallado ni evaluaciones de costo–beneficio.

Objetivos del Estudio

El objetivo general de la investigación es comparar la información geoespacial generada mediante levantamientos con dron a través de técnicas fotogramétricas y LiDAR, evaluando la calidad y precisión de los productos cartográficos obtenidos —como Modelos

Digitales del Terreno (MDT), Modelos Digitales de Superficie (MDS) y ortofoto— en un área de estudio específica.

Como objetivos específicos enumeramos

1. Ejecutar dos levantamientos aéreos con dron en la misma zona de estudio, uno mediante cámara fotogramétrica y otro mediante sensor LiDAR, complementados con el levantamiento de Puntos de Control Terrestre (PCT) mediante GNSS para el control y evaluación geométrica de los modelos generados.
2. Procesar y generar productos cartográficos base (MDT, MDS y ortomosaico) a partir de cada levantamiento.
3. Derivar productos cartográficos secundarios (pendientes, curvas de nivel, hidrografía, modelos de sombreado y altura de vegetación) a partir de los modelos base.
4. Analizar comparativamente la precisión altimétrica y el comportamiento geométrico de los modelos obtenidos en zonas con diferente cobertura superficial.
5. Proponer criterios técnicos que apoyen la selección de la metodología más adecuada según el tipo de proyecto geomático.

Capítulo 1. Fundamentos de la Medición de Terrenos

La medición del territorio ha estado ligada históricamente a la necesidad de ubicar, delimitar y representar espacios geográficos (Foucault, 2006).

Con el desarrollo científico y tecnológico, las técnicas de medición evolucionaron desde instrumentos mecánicos hasta sistemas digitales capaces de obtener información geoespacial con alta precisión (Mircea et al., 2021; Berné et al., 2014) . Este conjunto de técnicas y ciencias asociadas al manejo de información con referencia espacial es conocido como geomática, disciplina encargada de capturar, procesar, analizar e interpretar datos geográficos para apoyar la toma de decisiones territoriales (Cartaya et al., 2014).

1.1. Geodesia

La geodesia es la ciencia que determina la forma, dimensiones y posición de la Tierra, así como su campo de gravedad y sus variaciones en el tiempo. Su importancia radica en que permite establecer sistemas de referencia que posibilitan la localización global de puntos sobre la superficie terrestre (Muñoz, 2009).

Para representar la Tierra, la geodesia utiliza superficies de referencia que simplifican su forma real, sin embargo, esta tarea se complica ya que como reporta Berné et al., (2014), la Tierra no es un cuerpo homogéneo, si no un elemento vivo y dinámico sujeto a deformaciones. Actualmente, se trabaja con dos modelos fundamentales de la Tierra: el físico, también conocido como Geoide que corresponde a una superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre, esta superficie se observaría si el mar estuviera en completa calma debido a que el agua de los océanos busca estar en equilibrio, así el Geoide coincide con el nivel medio del mar (NMM) (Jekeli, 2006) y el matemático, también conocido como Elipsoide que constituye una superficie matemática regular utilizada para el cálculo de coordenadas (Villa, 2016).

Se han mencionado hasta ahora dos tipos de superficies geodésicas, el Geoide y Elipsoide, que intentan aproximarse a una tercera superficie, la superficie de la Tierra (superficie topográfica), estas tres superficies raramente coinciden, lo cual conlleva que podamos calcular tres valores de altitud diferentes en un mismo punto sobre la Tierra.

1.2. Alturas y Superficies de Referencia

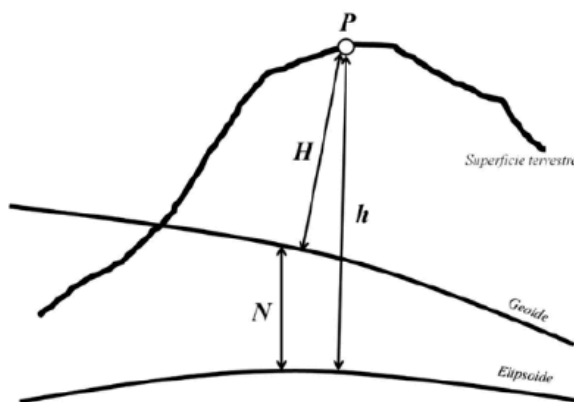
La altura elipsoidal o geométrica que se mide respecto al elipsoide [h] y la altura ortométrica o física que se mide respecto del geoide (NMM) [H] están relacionadas por la ondulación del Geoide [N], que representa la separación entre ambas superficies (ver *Figura 1*) de la siguiente manera:

$$h = H + N$$

Donde N puede ser positiva o negativa dependiendo de si el geoide está por encima o por debajo del elipsoide en un punto dado (Hoffmann-Weelenhof, Lichtenegger & Wasle, 2008).

Figura 1.

Relación de las alturas físicas referidas al geoide y la alturas elipsoidales referidas al elipsoide



Nota: Imagen en que se puede ver un punto P sobre la superficie terrestre, el cual tiene dos coordenadas verticales, primero la altura elipsoidal [h] que mide la distancia del punto en la superficie al Elipsoide y segundo la altura física [H] que mide la distancia del punto en la superficie al Geoide (NMM), la distancia [N] ilustra la separación del Elipsoide y el Geoide (ondulación geoidal). Figura tomada de Moya-Zamora & Cedeño-Montoya, (2017).

La correcta comprensión de estas superficies resulta fundamental para la generación de modelos digitales del terreno y la integración de información geoespacial con referencia altimétrica consistente.

1.3 Georreferenciación: Sistemas, Marcos y Datums

La información geoespacial está generada dentro de una estructura física - matemática (Moya-Zamora, et. al, 2017). La georreferenciación consiste en asignar coordenadas a los objetos geográficos dentro de un sistema de referencia. Para ello, es necesario distinguir entre sistema de referencia, marco de referencia y datum geodésico, elementos que permiten ubicar posiciones de manera consistente en la superficie terrestre (Altamimi, Sillard & Boucher, 2002).

El sistema de referencia representa la estructura matemática utilizada para definir coordenadas, mientras que el marco de referencia corresponde a su materialización física mediante puntos conocidos en el terreno. El datum establece la orientación y posición del elipsoide respecto a la Tierra, asegurando la compatibilidad entre datos geográficos.

Los sistemas de referencia son la idealización matemática de una estructura geométrica, utilizadas para definir coordenadas denominadas como coordenadas elipsoidales o geodésicas: latitud, longitud y altura (ϕ , λ , h respectivamente), por otro lado, los marcos de referencia corresponde a su materialización física mediante puntos conocidos en el terreno (Lu et al, 2014) , la distinción entre “sistema” y “marco” resulta sutil, ya que el primero es invariable e inaccesible, mientras que el segundo es accesible y perfectible (Altamimi, Sillard & Boucher, 2002). El datum establece la orientación y posición del elipsoide respecto a la Tierra, asegurando la compatibilidad entre datos geográficos (Berne et al, 2014).

1.4. Geomática

Es un término científico que surge en el siglo XXI como un nuevo concepto en el campo de las ciencias geográficas (Berné et al., 2014), es el conjunto de ciencias y técnicas dedicadas al manejo de información geográfica, incluyendo su captura, almacenamiento, procesamiento, presentación, análisis e interpretación con el fin de ayudar en la toma de decisiones territoriales (Cartaya et al., 2014).

Esta disciplina integra tecnologías como los sistemas de navegación satelital, sensores remotos, sistemas de información geográfica y plataformas aéreas para la generación de datos espaciales con fines científicos y técnicos.

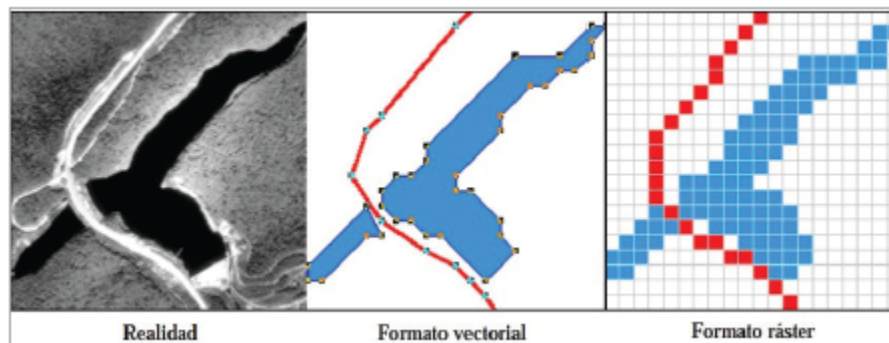
1.5. Representación de la Información Geográfica

La información geográfica se genera a partir de organizar e interpretar los datos geográficos, lo cuales se componen de dos partes: 1) la parte temática, que describe su papel en el territorio y 2) la parte espacial que informa su localización y representación geométrica (estructura y formato) (Cartaya et. al., 2014).

Las estructura de los datos puede ser de tipo vectorial o de tipo raster. El sistema vectorial representa objetos discretos mediante puntos, líneas y polígonos mientras que la estructura raster ocupa matrices y representa al territorio como un todo continuo. Ambas estructuras, vectorial y raster (*ver Figura 2*), se diferencian en las relaciones topológicas, el volumen físico de la información y los métodos de análisis (Domínguez, 2000).

Figura 2.

Estructura de datos geográficos

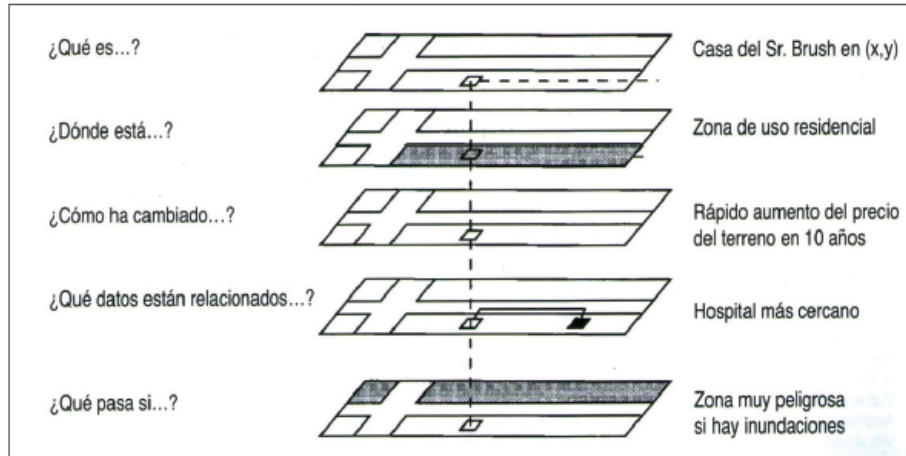


Nota: Imagen que muestra de izquierda a derecha primero una fotografía aérea de un cuerpo de agua por el que pasa un camino, la segunda imagen es el camino vectorizado por una línea y los cuerpos de agua con polígonos, la última imagen muestra la fotografía como una malla de píxeles que por el color que toma cada celda nos permite saber que está representando. Figura tomada de Cartaya et al., (2014).

Quirós, (2014) define como formato al método estandarizado para organizar y almacenar un archivo, existen formatos para la estructura vectorial (.shp, .kml, .csv, etc.) y formatos para los raster (.tiff, .ecw, etc.).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son gestores de datos geográficos, es decir, tecnología capaz de trabajar y sacar provecho de ellos (*ver Figura 3*) (Sitjar i Suñer, 2009).

Figura 3.
Preguntas que responde un SIG



Nota: Imagen que muestra un área geográfica y que del lado izquierdo se hace una pregunta de la localización mostrada y del lado derecho la respuesta a la pregunta. Figura tomada de Murai (1999).

1.6. Mapas y Modelos del Terreno

Un mapa se define como una abstracción simbólica de la realidad, ya que simplifica y generaliza un fenómeno (Secretaría de Políticas Integrales sobre Drogas de la Nación Argentina [Sedronar], 2013).

El mapa debe ser capaz de transmitir la información que la persona que lo diseño ha determinado, para ello está sujeto a normas y convenciones del lenguaje cartográfico como son la proyección y la escala. Las proyecciones cartográficas son funciones matemáticas que ayudan a pasar la realidad volumétrica en coordenadas geodésicas (lat, long) a un plano (norte, este), con la menor deformación posible, por otro lado, la escala de un mapa nos permite conocer la relación entre éste y la realidad (Domínguez, 2000).

Un modelo es una representación de un fenómeno con el que interactuamos (Villa-Ochoa, 2007). El modelo se vuelve parte fundamental en la construcción de conocimiento científico y en las ciencias de la Tierra estos modelos integran características del territorio.

Los modelos que digitalizan los cambios de elevación en una escena, Modelos Digitales de Elevación (MDE), lo hacen asignando valores de alturas a coordenadas 2D, por lo que se conocen como modelos 2.5D. Existen dos tipos de MDE: 1) los Modelos Digitales de Superficie (MDS) que modelan todo objeto que conforme el paisaje geográfico y 2) los Modelos Digitales de Terreno (MDT) que únicamente modelan las elevaciones correspondientes al Terreno Natural (TN) (*ver Figura 4*) (Hirt, 2015).

Figura 4.

Comparación visual de una imagen de un Modelo Digital de Terreno (MDT) y un Modelo Digital de Superficie (MDS).



Nota: Imágenes que representan una parte del tren de alta velocidad de Alemania, tomadas con un láser aerotransportado. Del lado izquierdo se observa el MDT y del derecho el MDS. Figura tomada de Hirt (2015).

A partir de estos modelos es posible derivar productos cartográficos como pendientes, curvas de nivel, análisis hidrológicos y modelos de altura de vegetación (Peña & Buitrago, 2015), por ejemplo, el Modelo de Altura del Dosel (CHM, por sus siglas en inglés) se obtiene restando el Modelo Digital del Terreno (MDT) del Modelo Digital de Superficie (MDS) y permite caracterizar la altura máxima del dosel vegetal (Dong & Chen, 2018).

En la actualidad los datos necesarios para la generación de estos modelos provienen de diversas fuentes. A continuación hablaremos de las técnicas de recolección de datos que cuentan con ubicación geográfica.

Capítulo 2. Recolección de Datos con Referencia Espacial

La obtención de información geoespacial requiere métodos de medición capaces de determinar la posición y altura de puntos sobre la superficie terrestre con niveles de exactitud y precisión definidos. Estas mediciones se realizan mediante diferentes tecnologías. Estas mediciones se realizan mediante diferentes metodologías y sus tecnologías, como son los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés), la fotogrametría aérea digital y los escaneos LiDAR, los cuales permiten generar modelos del terreno con distintos niveles de resolución y precisión (Cartaya et al., 2014).

2.1. Levantamientos Geodésicos

Los levantamientos geodésicos son el conjunto de procedimientos destinados a determinar las coordenadas geodésicas (latitud, longitud, altura), de puntos sobre el terreno con respecto a un sistema de referencia Sistema Nacional de Información Estadística y Geografía (2010). El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), con el fin de que los levantamientos realizados en el país sean homogéneos, compatibles y comparables, decreta un Sistema Geodésico Nacional.

2.2. Exactitud y Precisión

Las mediciones geodésicas se suponen aproximadas, es decir, susceptibles a error, que tan precisa es su medición depende de múltiples factores como pueden ser el instrumento utilizado, la técnica de medición elegida y las condiciones físicas que rodean a

la medición. El último dígito de una magnitud continua se ha calculado mediante algún tipo de estimación (Tippens, 2011).

SNIEG (2010) define la precisión como el grado de cercanía entre sí, de mediciones repetitivas de una misma cantidad, con respecto a su valor medio. Por otro lado, la exactitud es el grado de cercanía de una cantidad medida con respecto a su valor verdadero (ver Figura 5).

Figura 5.

Representación de la diferencia entre exactitud y precisión.



Nota: Se observan cuatro dianas cada una con cinco estrellas, la posición de las estrellas respecto al centro y entre ellas ejemplifican los grados de exactitud y precisión respectivamente. Figura tomada de INEGI (2015).

2.3. Sistema de Navegación Global por Satélite

Una de las técnicas que estudia la Geomática para capturar coordenadas geodésicos son los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS), la cual permite determinar la posición tridimensional de puntos sobre la superficie terrestre las 24 hrs del día los 365 días del año en distintos niveles de exactitud (INEGI, 2015). Hoy en día, el usuario del GNSS puede estimar su posición llegando incluso a precisiones milimétricas (Fernández, 2023).

Los GNSS se conforman por tres componentes: 1) El componente espacial, 2) el componente control y 3) el componente usuario. Respecto al primero, lo conforman los satélites de las diferentes agencias espaciales orbitando la tierra (GPS, GLONASS, GALILEO etc.). Cada satélite emite varias señales administradas por el componente control, las cuales permiten determinar la distancia satélite – receptor. Triangulando las

distancias a diferentes satélites es como el usuario consigue su posición (Berné et al., 2014). Es importante recalcar que las elevaciones medidas con un receptor GNSS inicialmente son elipsoidales (Jiménez, Magaña & Soriano, 2019).

Para un buen cálculo de coordenadas geodésicas con GNSS el sitio donde se coloca el receptor debe ubicarse en una zona con clara visibilidad del cielo, es decir, no debe presentar obstrucciones por encima de los 15° de elevación respecto al horizonte (edificios, árboles, etc.) que impidan la "visión" satélite - receptor, debe estar lejos de superficies reflectantes, colocado en un entorno seguro, alejado del tráfico y circulación, preferiblemente con posibilidad de dejar el receptor trabajando y lejos de transmisiones potentes (antena de radio, TV, postes de alta tensión, etc.) (Leica geosystems, 2000).

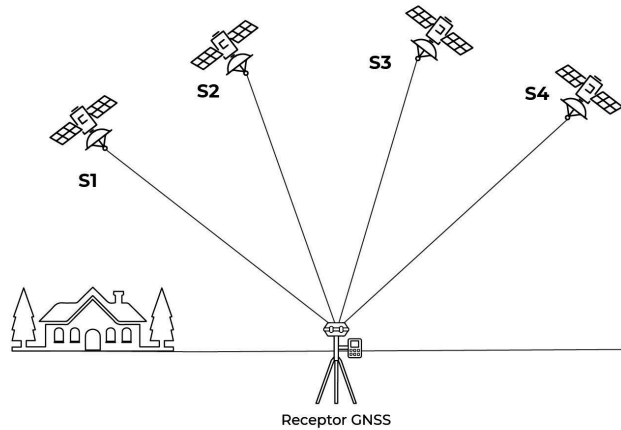
La exactitud y precisión obtenida en las mediciones GNSS depende del equipo receptor, planificación, el procedimiento de la recolección de datos y el método de recolección utilizado (Jiménez et al., 2019).

2.3.1. Métodos de Recolección

Los métodos de recolección se pueden dividir en absolutos y diferenciales. Los métodos de recolección absolutos se realizan con un solo receptor (*ver Figura 6*). Este posicionamiento está muy afectado por errores producidos por la atmósfera.

Figura 6.

Representación del levantamiento geodésico con el método absoluto.

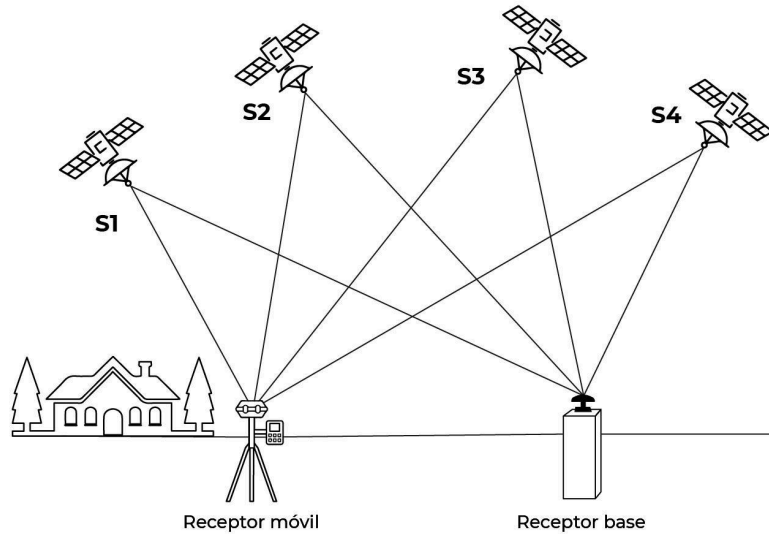


Nota: Esquema que muestra un receptor GNSS haciendo un levantamiento de tipo absoluto, montado sobre un tripié se representa con el nombre “receptor GNSS” al receptor que está triangulando su posición y en una extensión del tripié vemos la controladora. En la parte superior se ven 4 satélites, las “S” nombran a los diferentes satélites y el subíndice los enumera. Las líneas que unen cada receptor con un satélite ejemplifican el estar haciendo mediciones a la posición de los satélites. Elaboración propia.

En aplicaciones geomáticas donde se requiere alta exactitud posicional, es común emplear métodos diferenciales, también llamados método relativos, ya que estos permiten reducir errores asociados a la señal satelital y mejorar la confiabilidad de las coordenadas obtenidas. Un método relativo consiste en hallar la posición geodésica de un punto desconocido mediante la observación simultánea a otro punto de coordenadas conocidas. Para ello se emplean por lo menos dos receptores: uno ubicado en un punto de referencia, llamado receptor base, receptor control o receptor de referencia y otro en el punto a medir, conocido como receptor móvil o rover (*ver Figura 7*) (Ferrecio, 2006).

Figura 7.

Ilustración de un levantamiento geodésico con el método diferencial.



Nota: Esquema que muestra dos receptores GNSS, del lado izquierdo montado sobre un tripie se representa al receptor móvil de coordenadas desconocidas y en una extensión del tripie vemos la controladora. Del lado derecho con el nombre de “Receptor base” y sobre una columna se representa al receptor de coordenadas conocidas. En la parte superior se ven 4 satélites, las “S” nombran a los diferentes satélites y el subíndice los enumera. Las líneas que unen cada receptor con un satélite ejemplifican el estar haciendo mediciones a la posición de los satélites. Elaboración propia.

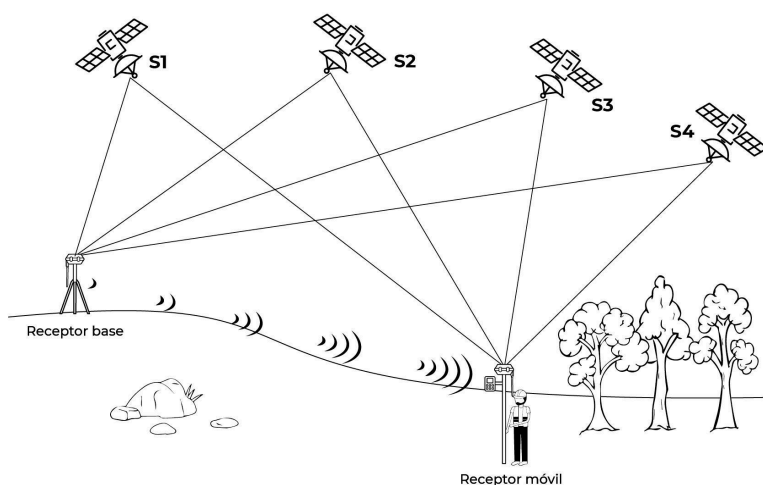
Las coordenadas del punto de referencia donde se coloca el receptor base se pueden obtener de distintas maneras, enumeremos algunas: 1) utilizar una marca previamente estudiada, 2) establecer las coordenadas utilizando el modo estático y corregirlas tomando como base previa un receptor que grabe información las 24 hrs del día (INEGI, 2019), 3) La estación base usa el método absoluto para promediar observaciones y obtener una posición estimada. En este escenario, todos los puntos registrados tendrán una precisión de entre 1 y 2 cm entre sí y con respecto a la estación base, pero todo el conjunto de datos podrá llegar a un alto grado de inexactitud (hasta varios metros) en relación con las coordenadas del mundo real. Sin embargo pueden ser aceptables y hasta más críticas las mediciones relativas precisas para fines de estudios enfocados en la relación espacial entre objetos del levantamiento (Hill et al., 2019).

2.3.2. Correcciones En Tiempo Real (RTK)

Una de las variantes del método diferencial es el posicionamiento Cinemático en Tiempo Real (RTK), en el cual los errores de la medición generados por la refracción atmosférica sobre la estación base se calculan en tiempo real y se envían de forma instantánea, a través de un enlace de telecomunicaciones, al receptor móvil obteniendo con ello coordenadas precisas respecto a la base (ver Figura 8) (Hill et al, 2019). La exactitud alcanzada mediante RTK depende de la correcta determinación de las coordenadas del punto base; cuando este se encuentra definido dentro de un sistema geodésico confiable, es posible alcanzar precisiones centimétricas (Jiménez et al., 2019).

Figura 8.

Ilustración de un levantamiento RTK.



Nota: Se observa en la parte izquierda sobre un tripie un receptor con una antena de radio que envía correcciones en tiempo real al receptor móvil colocado sobre un bastón con controladora que sujeta una persona. En la parte superior se ven 4 satélites, las “S” nombran a los diferentes satélites y el subíndice los enumera. Las líneas que unen cada receptor con un satélite ejemplifican el estar haciendo mediciones a la posición de los satélites. Elaboración propia.

En este tipo de levantamiento se sugiere un tiempo de medición entre 5 segundos y dos minutos. Mientras sea menor la distancia entre los receptores y mayor la cantidad de satélites comunes entre ellos, menor puede ser el tiempo de lectura, lo más importante será

mantener la señal de radiofrecuencia entre el receptor móvil y el fijo sin interferencias (Ferreccio, 2006).

En levantamientos aerotransportados mediante Sistemas de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés), el uso de sistemas RTK integrados en la plataforma permite registrar la posición del sensor con correcciones en tiempo real, mejorando la coherencia geométrica de los productos generados (Berné et al., 2014). Sin embargo, la confiabilidad de estas correcciones está condicionada a la disponibilidad de un punto base con coordenadas conocidas o a la conexión con redes de referencia activas, por lo que la utilización de puntos de control terrestre continúa siendo un elemento relevante para validar la exactitud de los modelos digitales obtenidos (INEGI, 2015)

2.4. Percepción Remota y Plataformas Aéreas

De acuerdo a Dong & Chen, (2018) la percepción remota es un conjunto de técnicas que permiten obtener información de un objeto sin contacto directo, mediante el registro de energía electromagnética reflejada o emitida por éste. Para ello se utilizan sensores, los sensores pasivos dependen de la energía ambiental y miden la magnitud de la radiación reflejada, por otro lado los sensores activos generan su fuente de energía y son capaces de emitir y recibir la señal que rebota de la superficie (Veneros et al., 2020). Finalmente se requiere de una plataforma para transportar al sensor, entre las que destacan las aéreas (Veneros et al., 2020).

La evolución de la aeronáutica, hace posible que el mundo contemporáneo este descubriendo el paisaje a través de la mirada aérea de los RPAS, llamados comúnmente *dron*, estos se han consolidado como herramientas de gran utilidad para levantamientos geodésicos, debido a su capacidad para operar en espacios reducidos, reducir costos, no interfiere con las líneas aéreas comerciales y obtener productos mayor frecuencia

(resolución temporal) y de alta resolución espacial (Bernardo, 2017). Aunque aún cuentan con algunas limitaciones, tienen poca capacidad de defensa contra elementos ambientales, dependen del estado climático, presentan restricciones en cuanto al peso y volumen de los equipos a bordo, la distancia al control para no romper el canal de comunicación con el operador y la duración de batería. Finalmente existe una falta de regulación y una discusión ética debido a que la grabación o captura puede resultar en una amenaza a la privacidad Jiménez et al, (2019)

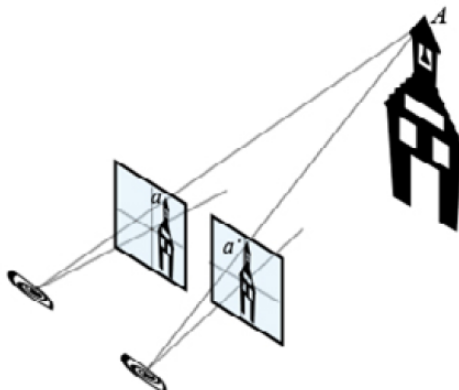
A pesar de sus ventajas y limitaciones los *drones* son una herramienta de gran utilidad para la percepción remota al integrarse con un receptor GNSS (Bernardo, 2017) y una Unidad de Medición Inercial (IMU, por sus siglas en inglés) que permita conocer la orientación del dron en los tres ejes del espacio, lo que permite registrar información georreferenciada con alta precisión (Flores & Rivadeneira, 2013).

Dependiendo del sensor incorporado, los RPAS pueden emplearse en técnicas como la fotogrametría digital o el escaneo LiDAR.

2.5. Fotogrametría Digital

La fotogrametría etimológicamente significa la métrica de lo escrito con luz (Quirós, 2014). Es una ciencia que permite determinar las propiedades geométricas - tamaño, forma y posición - de los objetos que se ven en las fotografías (Pacheco, 2016), mediante la reconstrucción tridimensional basada en principios de visión estereoscópica, visión inherente a los seres humanos. Este principio se basa en el paralaje, es decir, el desplazamiento aparente de un objeto cuando es observado desde dos posiciones distintas, fenómeno que permite percibir la profundidad. De forma artificial este efecto se logra utilizando pares de fotografías tomadas desde perspectivas diferentes, cuya convergencia genera la apreciación del relieve (*ver Figura 9*) (Cárdenas, Morales & Ussa, 2015).

Figura 9.
Estereoscopia.



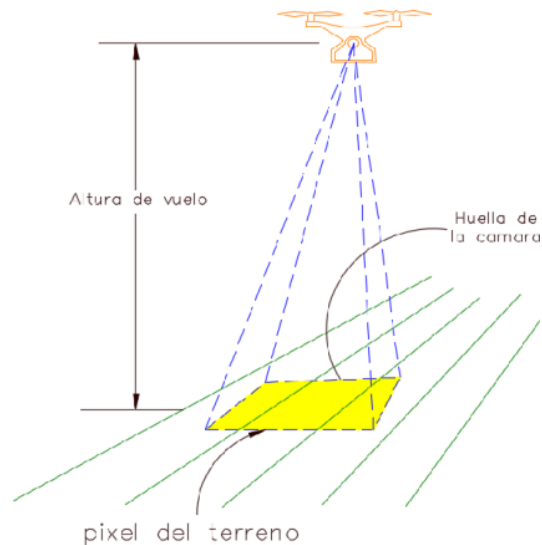
Nota: La imagen muestra dos ojos, cada uno genera una imagen en color azul donde se ve la iglesia y una línea que une el ojo con la punta de la iglesia, en el ojo izquierdo este punto se nombra a , en el ojo derecho se llama a' , en conjunto generan el punto A que es donde se cruza la visión de ambos ojos lo que permite apreciar la punta de la profundidad. Figura tomada de Quirós (2014).

Para asegurar la existencia de un área común entre imágenes que permita la visión estereoscópica, es necesario calcular la escala de las fotografías (Jiménez et al. 2019).

2.5.1. Escala de las Fotografías

La escala de vuelo o Escala Media de la fotografía (E_m) depende de cuatro elementos principales: 1) La distancia focal (f), definida como la distancia entre el centro óptico y el punto focal (Prado, 2016). 2) El formato (l), correspondiente a las dimensiones del sensor. 3) La altura de vuelo (H), medida desde el centro óptico al nivel medio del terreno y 4) Huella de la cámara (L), que representa el área cubierta por la fotografía (ver *Figura 10*) (Dirección General de Servicios Técnicos, 2014).

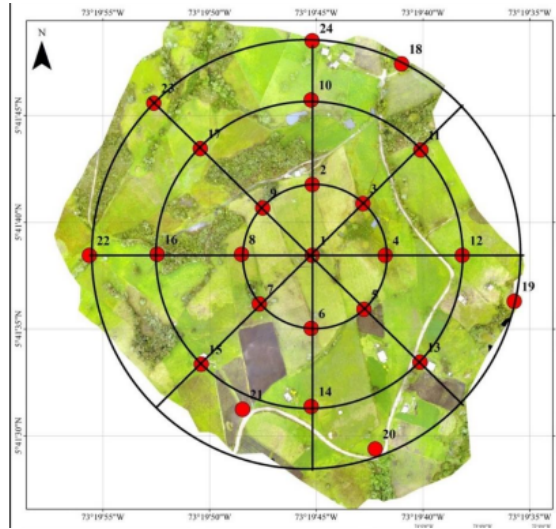
Figura 10.
Altura de Vuelo y Huella de la Cámara



Nota: El *drone* de color naranja lleva cargando la cámara fotográfica representada por un círculo, desde el centro óptico de esta cámara hasta el nivel medio de terreno, representado por las líneas verdes, se mide la altura de vuelo. También observamos de color amarillo el área cubierta por esa fotografía, llamada huella de la cámara. Figura adaptada de Riaño, (2018).

Para determinar la huella y escalar correctamente el modelo, es indispensable contar con Puntos de Control Terrestre (PCT), cuyas coordenadas permitan georreferenciar el proyecto y establecer distancias reales en el terreno (INEGI, 2015). Como mínimo se requieren tres puntos contenidos en el modelo, aunque pueden incorporarse más para mejorar el control geométrico (*ver Figura 11*) (Kersten et al, 2022).

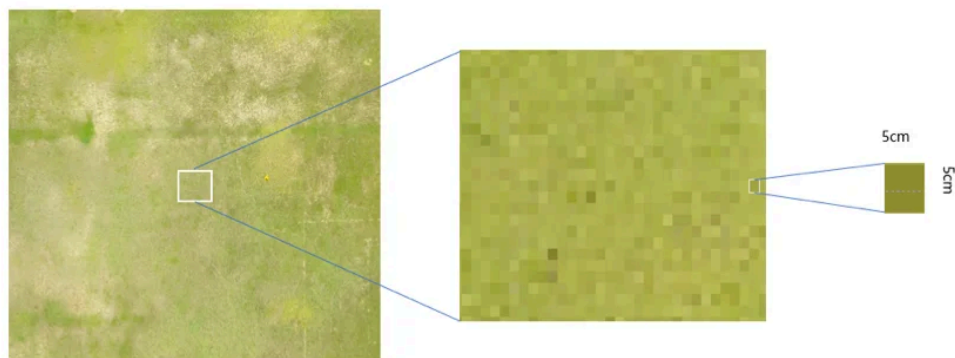
Figura 11.
Grilla de posicionamiento de Puntos de Control



Nota: Se muestra el mapa de una zona de estudio con su grilla de coordenadas, los puntos rojos representan PCT de los que se conocen sus coordenadas, lo que permitió saber las distancias reales entre ellos y con eso escalar el modelo. Figura adaptada de Ríos & Puerto (2019).

En imágenes digitales, la escala se expresa como resolución espacial y se representa mediante el Ground Sample Distance (GSD, por sus siglas en inglés) que indica el tamaño del píxel proyectado sobre el terreno (*ver Figura 12*) (Perez & Muñoz, 2006).

Figura 12.
Tamaño del píxel en el terreno

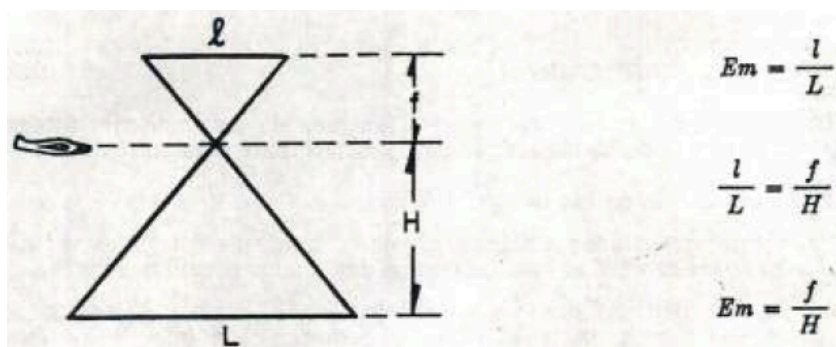


Nota: La imagen del lado izquierdo es una fotografía digital de una zona de estudio, la imagen de enmedio es un acercamiento a dicha fotografía para ver los píxeles que la conforman y finalmente la imagen de la derecha es un píxel de esa imagen con sus medidas en terreno. Figuras tomadas de DJI Enterprise (2021).

El GSD depende de la relación entre altura de vuelo, distancia focal y dimensiones del sensor. A partir de la relación matemática entre estos parámetros puede deducirse la ecuación para el cálculo de la escala (*Ver Figura 13*) (Felipe-García et al., 2012).

Figura 13.

Relación matemática de los parámetros involucrados en el cálculo de la escala



Nota: l - representa el formato (ancho del sensor óptico), f - representa la distancia focal, H - representa la altura de vuelo y L - representa el ancho cubierto en el suelo por la fotografía. Figura tomada de (DGST, 2014).

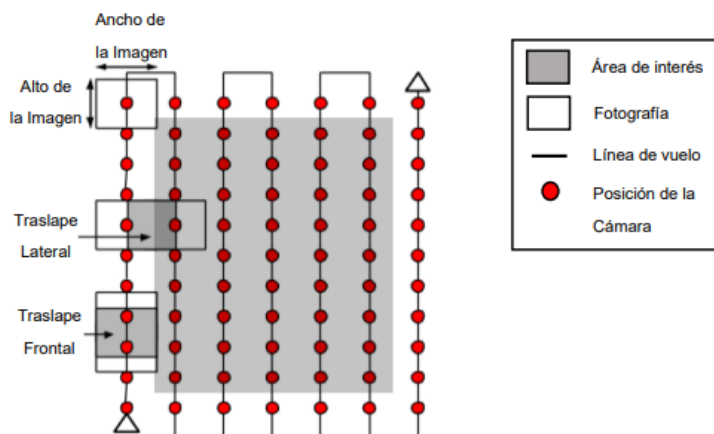
Con el cálculo de la escala y considerando que el sensor se encuentra montado en un dron, el siguiente paso es la elaboración del plan de vuelo.

2.5.2. Plan de Vuelo

El plan de vuelo es el conjunto de puntos con coordenadas que definen la ruta que seguirá el *drón*. Esta ruta se compone de líneas de vuelo sobrepuestas para asegurar traslape longitudinal/frontal y transversal entre las fotografías (Jiménez et al. 2019).

La planeación se realiza coordinando los parámetros de la huella de la fotografía con variables como velocidad de captura, extensión del área y requerimientos de cobertura (*ver Figura 14*) Un plan eficiente es aquel que cubre el área con el menor número de fotografías posible sin comprometer el traslape, reduciendo tiempos de procesamiento (Claros et al., 2016).

Figura 14.
Plan de vuelo fotogramétrico



Nota: Como se enlista en la simbología de la derecha, el cuadrado gris en el centro de imagen representa el área de interés a estudiar, los puntos rojos son la posición de la cámara. Se puede notar que tenemos una línea con fotografías extra en todos los lados del área de estudio ya que es necesario el par estereoscópico de todas las fotos que cubren el área. En la parte superior izquierda vemos una fotografía con sus correspondientes dimensiones, debajo de ella dos fotografías con sus traslape lateral marcado en gris y finalmente debajo de estas otro par de fotografías con su traslape frontal marcado en gris. Figura tomada de Claros et al., (2016)

Entre los factores que influyen en la planeación se consideran: 1) Orografía, 2) Vegetación y cuerpos de agua, 3) Estado del tiempo y 4) Extensión.

1) Orografía: Las variaciones del relieve modifican la altura efectiva de vuelo y, por tanto, el GSD. Para evitar discontinuidades en el modelo, la altura máxima no debe exceder el doble de la mínima; en terrenos abruptos puede optarse por vuelos escalonados o con altura constante respecto al terreno (Claros et al., 2016). Se recomiendan traslapes del 75% frontal y 50% lateral, aumentando en terrenos con pendientes pronunciadas (Ruiz, 2013).

2) Vegetación y cuerpos de agua: La altura máxima de vegetación densa para poder emplear el proceso fotogramétrico es de 0.10 m, si la altura de la vegetación es mayor el poder usar el proceso fotogramétrico, o no, dependerá de la relación entre la altura de árbol y el número de árboles por hectárea. La *Tabla 1* muestra esta relación, si el número de

árboles por hectárea es mayor al indicado, no es seguro lograr la reconstrucción estereoscópica de la mayoría de los puntos del terreno (DGST, 2014).

Tabla 1
Relación de Altura y Número de árboles

Altura promedio del árbol (m)	Número de árboles por hectárea
5	60
10	50
15	40
20	20
30	12

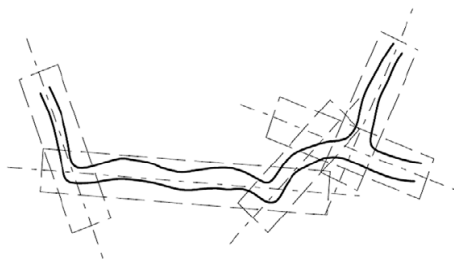
Nota: La tabla muestra para cada altura promedio de árbol, el máximo de número de árboles que puede haber para asegurar la reconstrucción estereoscópica. m - Metros. Tabla modificada con base en DGST, (2014)

En bosques y campos de agricultura para facilitar la detección de similitudes se recomienda 85% de traslape frontal y 70% lateral a una mayor altura devuelvo, un GSD mayor a 10 cm/píxel. En cuerpos de agua extensos o profundos la reconstrucción puede no ser viable debido a la reflexión de la luz (Claros et al., 2016).

3) El estado del tiempo: Factores como nubosidad, proyección de sombras y ángulo solar influyen en la calidad de las imágenes. DGST, (2014) recomienda que la cobertura nubosa no supere el 5% del área y que el ángulo solar se mantenga entre 45° y 75°. Además, el rendimiento del dron varía según temperatura y altitud (DJI, 2023).

4) Extensión: Cuando el área de estudio excede la autonomía de un solo vuelo, deben planearse múltiples vuelos con traslape entre ellos y geometría homogénea (ver Figura 15) (Quirós, 2014).

Figura 15.
Múltiples vuelos fotogramétricos



Nota: La imagen muestra rectángulos punteados, cada uno representa un plan de vuelo fotogramétrico. Se observa traslape entre los vuelos marcados como la sobreposición de los rectángulos. Figura tomada de Quirós (2014).

2.5.3. Control Terrestre

El proyecto de control terrestre abarca la planeación y ejecución de las actividades topográficas para la obtención de coordenadas de los PCT (Bernardo, 2017).

DGST (2014) establece 4 parámetros para la planeación: 1) El sistema de referencia, 2) Tolerancias planimétricas y altimétricas, 3) Técnica de medición, y 4) Número, distribución y señalización.

Kersten et al. (2022) recomiendan en áreas regulares al menos cinco PCT distribuidos en esquinas y centro. Aunque el uso de drones con corrección RTK puede reducir la necesidad de puntos, se recomienda incorporar al menos uno por confiabilidad.

INEGI (2015) agrega la importancia de la señalización adecuada, contraste visual, dimensiones congruentes con la escala y nomenclatura única. Los puntos deben ser identificables en las fotografías, estar libres de obstrucciones y documentarse adecuadamente mediante registros de campo

El resultado es un plan de vuelo complementado con un plan de control terrestre que permite estimar tiempos y costos.

2.5.4. Recolección y Tratamiento de Datos Fotogramétricos

Previo al trabajo de campo es necesario revisar condiciones del área, accesos, permisos y equipo. La recolección incluye localización, marcado y medición de PCT, ejecución del vuelo y respaldo de información (INEGI, 2015). El resultado es un conjunto de imágenes con continuidad estereoscópica y puntos georreferenciados listos para su tratamiento.

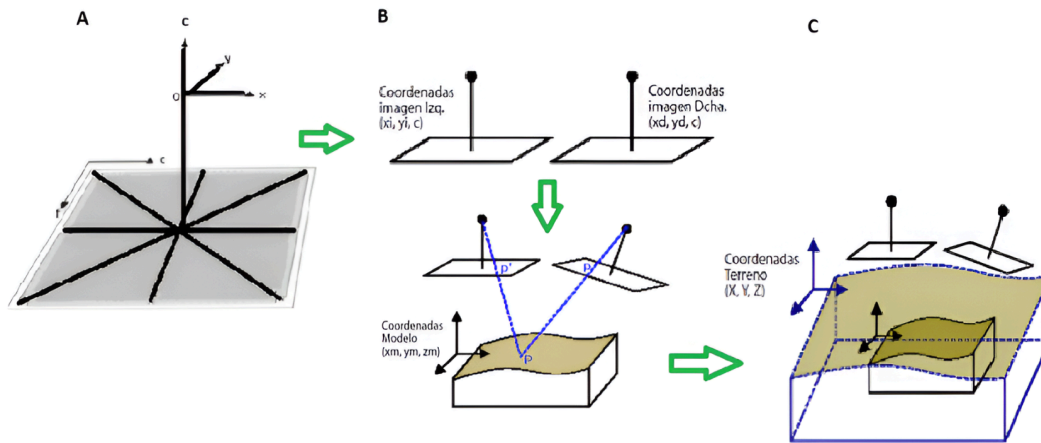
La restitución fotogramétrica, es decir, obtener un modelo geoméricamente semejante al terreno, requiere reproducir las condiciones de perspectiva mediante procesos de orientación interna y externa (Quirós, 2014):

Orientación interna: Reconstruye la geometría interna de la cámara y corrige distorsiones (*ver Figura 16-A*).

Orientación externa relativa: Relaciona pares estereoscópicos mediante identificación de píxeles homólogos (*ver Figura 16-B*).

Orientación externa absoluta: Escala y posiciona el modelo utilizando los PCTa (*ver Figura 16-C*), lo cual implica correcciones geométricas estadísticas.

Figura 16.
Orientación de las fotografías



Nota: A- Orientación interna, vemos un cuadro gris que representa una fotografía que está generando un sistema cartesiano (x,y,c) con origen en el centro de fotografía, B- Orientación externa relativa: cada fotografía está encontrando su par estereoscópico, C- Orientación externa absoluta: con ayuda de los PCT se está trasladando y escalando el modelo al sistema de referencia de salida. Figura tomada de Quiros, (2014)

Las imágenes digitales se componen de píxeles con un Nivel Digital (Nd) asociado a su intensidad luminosa (Claros et al., 2016); una imagen de color (RGB, por sus siglas en inglés) es la combinación de tres bandas monocromáticas (Alonso, 2009).

La automatización del proceso ha permitido el desarrollo de software especializado, tanto propietario como libre (Jiménez et al., 2019). La aerotriangulación optimiza la propagación de orientación entre imágenes y permite generar la nube de puntos tridimensionales (Claros et al., 2016).

2.5.5. Productos Fotogramétricos, Errores y Mitigación.

Según el objetivo del levantamiento pueden emplearse imágenes verticales u oblicuas (Bernardo, 2017) y elegir el tamaño del GSD, mayor detalle requiere una GSD más baja y viceversa (DJI Enterprise, 2021).

A partir de la nube de puntos, se pueden generar modelos de elevación y un producto exclusivo de la fotogrametría que es la ortofoto, un mosaico corregido de los errores geométricos, donde cada punto en el terreno sea observado desde una perspectiva perpendicular (*ver Figura 17*), lo que permite la medición de todo lo visible como superficie y áreas. Generalmente en formato de Archivo de Imágenes con Etiquetas (TIFF, por sus siglas en inglés) y el formato Wavelet de Compresión Mejorada (ECW, por sus siglas en inglés). La ortofoto facilita procesos de vectorización y restitución de elementos como linderos, edificaciones y vialidades (Quirós, 2014).

Figura 17.

Visualización de la perpendicularidad de la ortofoto



Nota: Se observa un mosaico de fotos donde del lado izquierdo sigue teniendo influencia la perspectiva, se nota al ser visibles las fachadas de los edificios, lo que no permite hacer mediciones de distancias reales. Del lado derecho se observa una ortofoto donde resalta el terreno de manera perpendicular y libre de perspectiva con escala homogénea. Figura tomada de Claros et al., (2016).

Al ser el proceso fotogramétrico una serie de procesos encadenados, el error del producto final es la acumulación de los errores en cada una de las fases. Para su mitigación se debe contar con controles de calidad durante todo el proceso, desde la planificación del vuelo, la ejecución del mismo y el tratamiento de los datos (Felipe-García, Hernández-López, & Lerma, 2012).

En síntesis, la fotogrametría digital es una técnica de medición tridimensional que integra percepción remota y control terrestre. Aunque los sistemas actuales automatizan gran parte del proceso, el conocimiento de sus fundamentos geométricos y operativos es esencial para garantizar resultados precisos y confiables.

2.6. LiDAR Aéreo

LiDAR es el acrónimo de Light Detection And Ranging que se traduce como Detección y alcance de la Luz, es un sensor remoto activo que mide la distancia a los objetos mediante la emisión de pulsos láser y el registro del tiempo que tarda la señal en regresar al sensor. La energía reflejada es captada por un fotodetector y transformada en impulsos eléctricos para su procesamiento, permitiendo la obtención directa de coordenadas tridimensionales (Salamanca & Pérez , 2008).

Su desarrollo fue posible gracias a la integración del láser, los sistemas GNSS y los Sistemas de Navegación Inercial (INS, por sus siglas en inglés) que permiten determinar posición y orientación precisos en tiempo real durante la medición (Wang et al, 2004).

Actualmente existen múltiples clasificaciones de LiDAR según plataforma, modo de medición, medio activo, uso, tamaño de huella, método de detección y objeto de estudio (*ver Tabla 2*). Para este trabajo se considera el LiDAR aerotransportado, por pulso, de huella pequeña, retorno discreto y aplicado a superficie terrestre.

Tabla 2

Resumen de las clasificaciones LiDAR

Clasificación primaria	Clasificación secundaria	Descripción
Por plataforma de montaje	LiDAR espacial	Cuando el sensor está montado en satélites o estaciones espaciales.
	LiDAR	El sensor va montado en aviones,

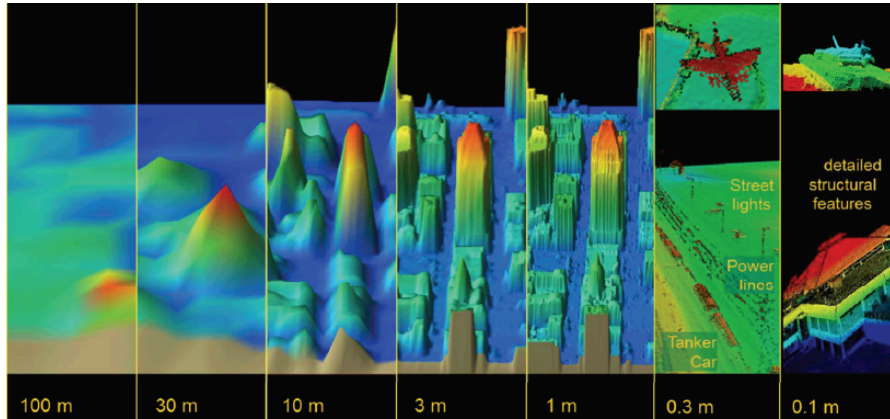
	aerotransportado	helicópteros, RPAS u otras aeronaves
	LiDAR terrestre	El sensor está a nivel terrestre ya sea fijo en trípodes, embarcado, sobre vehículos, en mochilas, etc.
Por modo de medir la distancia	LiDAR por pulso	Mide la diferencia de tiempo entre el pulso emitido y el pulso recibido. Recomendado para distancias largas.
	LiDAR por fase	Utiliza la radiofrecuencia para medir el retardo de fase producido en el proceso de ida y vuelta. Recomendado para distancias cortas y frecuencia de pulsos altas.
Por medio activo que emite el láser	LiDAR de gas	Usa gas o vapor como sustancia de trabajo para generar el láser.
	LiDAR de estado sólido	Aquí se encuentran dos tipos, el LiDAR de tipo semiconductor y el LiDAR de estado sólido bombeado por diodo.
Por uso	LiDAR de medición de distancia, LiDAR de seguimiento e identificación, LiDAR meteorológico, LiDAR de navegación, etc.	La lista se extiende más conforme se descubren sus beneficios en distintas áreas de conocimiento.
Por tamaño de la huella	LiDAR de huella grande	El diámetro de la huella de este LiDAR es mayor a 10 m, la densidad de puntos en la huella es baja y no obtiene imágenes del objetivo.
	LiDAR de huella pequeña	El diámetro de la huella de este LiDAR es de centímetros. Tiene pulsos de alta frecuencia, alta densidad de puntos y gran precisión.

Por método de detección y registro	LiDAR de retorno discreto	El más común y el más utilizado comercialmente. Genera nubes de puntos para reconstrucción 3D.
	LiDAR de forma de onda completa	Muestra continuamente la señal de vuelta, registra información más detallada y adquiere el perfil vertical completo del objetivo.
	LiDAR de recuento de fotones	Utiliza un láser de micropulsos con alta frecuencia de repetición y detectores mono fotónicos, útil para detectar objetos espaciales a grandes distancias con menor energía láser.
Por objetos de detección	LiDAR atmosférico	Interactúa con los componentes de la atmósfera para informar de los elementos físicos de la misma como nubes y aerosoles.
	LiDAR oceánico	En este LiDAR el haz de luz emitido penetra el mar y produce dispersión y fluorescencias, con lo que se registran parámetros de distribución de salinidad, indicadores de petróleo, gas e hidrocarburos en la capa límite marina.
	LiDAR de superficie terrestre	Interactúa con los objetos en la superficie terrestre como árboles, carreteras, puentes, edificios, etc.

Nota: La tabla muestra siete tipos de clasificaciones primarias de los sensores LiDAR, por plataforma en que se montan, el modo en que miden la distancia, por el medio activo, por el uso, por el tamaño de la huella, por método de detección y registro y por objetos de detección. m - Metros. Tabla adaptada de Wang et al, (2004).

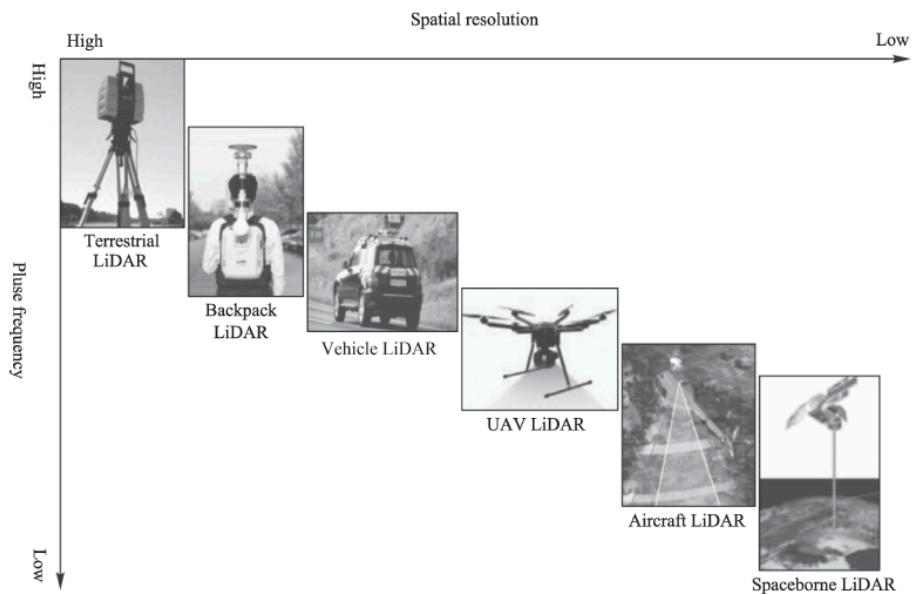
La resolución espacial del sistema depende de la plataforma y está relacionada con el tamaño de huella (*ver Figura 18*) y la frecuencia de pulso (*ver Figura 19*).

Figura 18.
Tamaño del píxel del sistema LiDAR en diferentes plataformas



Nota: Esta imagen muestra Modelos Digitales de Elevación con tamaño de píxel que va desde los 100m a los 0.1m, presentados en la conferencia ESRI de la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial en el 2010. Figura tomada de (MCManamon, 2019).

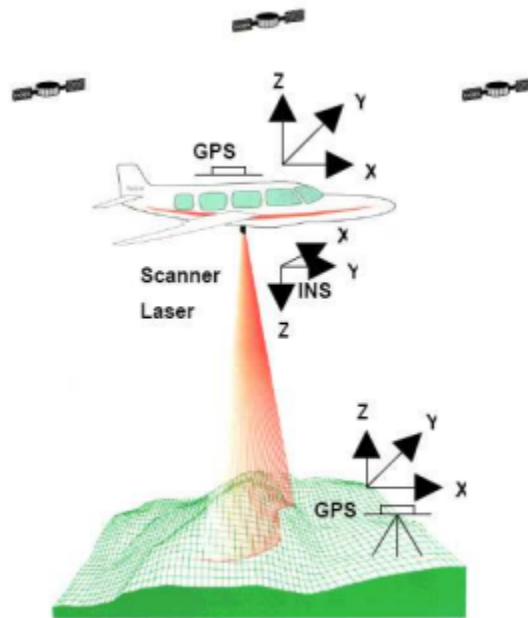
Figura 19.
Relación entre resolución espacial y frecuencia de pulso



Nota: Esta imagen muestra una gráfica que en el eje de las abscisas representa la resolución espacial y en el eje de las ordenadas la frecuencia de pulso. El origen del sistema es arriba a la izquierda, disminuyendo conforme se acerca a la derecha y hacia abajo. Figura tomada de Wang et al., (2004).

El LiDAR aerotransportado es un “sistema de sistemas”, compuesto por: 1) El sistema de escáner láser, 2) El GNSS, 3) El sistema INS que contiene el IMU y 4) El sistema de monitorización y control (ver Figura 20) (Ávila, 2018).

Figura 20.
Componentes de LiDAR Aerotransportado



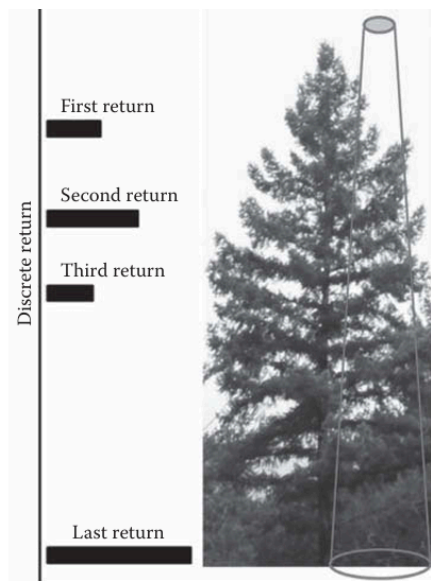
Nota: La imagen muestra una avioneta que emite un laser de color rojo, en la parte superior lleva un GPS que genera un sistema de coordenadas y en la parte inferior un sistema generado por el INS, finalmente en tierra hay un segundo GPS generando un sistemas e coordenadas base. Figura tomada de Aguilar & Aguilar, (s.f.)

2.6.1. Sistema de Escáner Láser

El escáner láser requiere de 4 elementos para emitir y recoger la radiación:

1. Generador de onda láser, generalmente en el rango óptico e infrarrojo cercano ($\sim 1.5 \mu\text{m}$), capaz de operar de día o noche al ser un sensor activo (MCManamon, 2019).
2. Una apertura óptica de transmisión y recepción, cuyo arreglo geométrico define el diámetro del rayo (huella). Huellas mayores permiten múltiples retornos cuando el pulso interactúa con la vegetación (ver Figura 21) (Salamanca & Pérez, 2008).

Figura 21.
Retorno de la señal LiDAR



Nota: La imagen muestra un pulso láser que tiene un diámetro inicial representado por el círculo gris en la parte superior del árbol, el pulso se propaga hasta el final del árbol, dibujando la huella del láser. Del lado izquierdo nos muestra un ejemplo de donde proviene cada retorno, en total son 4 retornos. Figura adaptada de Dong & Chen, (2018)

3. Sistema de medición de distancia

4. Procesador, encargado de digitalizar y almacenar la señal retornada (Salamanca & Pérez , 2008).

No toda la energía regresa al sensor; parte puede reflejarse, absorberse o dispersarse según el objeto y el medio atravesado. Factores atmosféricos como niebla o nubes pueden afectar la señal (MCManamon, 2019) (MCManamon, 2019).

2.6.2. Sistemas GNSS, INS y Control

El sistema GNSS sincroniza temporalmente el láser y el INS, además de proporcionar datos de navegación. El INS, mediante el IMU (acelerómetros y giroscopios), registra cambios de aceleración y orientación. La combinación GNSS–INS permite determinar posición y actitud en tiempo real, influyendo directamente en la precisión de la

nube de puntos. El sistema de control supervisa la operación conjunta de los componentes (Wang et al., 2004).

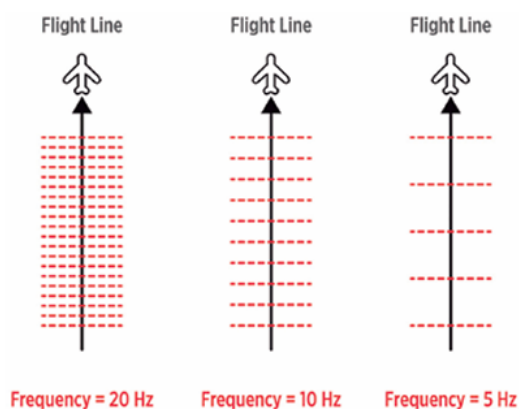
2.6.3. Recolección y Tratamiento de Datos LiDAR

Tenorio, (2015) redacta la recolección de datos LiDAR en 3 partes:

1) Planeación: Incluye delimitación del área, ubicación de estaciones base y definición de especificaciones de vuelo (aeronave, altura, ángulo de escaneo, velocidad, patrón de barrido, frecuencia de pulso, intervalo de grabación de datos GNSS/IMU) y del producto (sistema de referencia y densidad mínima de puntos). La frecuencia del pulso influye en la densidad de muestreo (*ver Figura 22*) (Ávila, 2018). Debido a la alta densidad de puntos, se requieren menos líneas de quiebre para modelar el terreno (Salamanca & Pérez, 2008).

Figura 22.

Frecuencia del muestreo



Nota: En la imagen vemos tres flechas que representan la trayectoria del vuelo que lleva el avión, y líneas punteadas rojas que representan un pulso disparado para escanear, el avión de la izquierda es el de frecuencia más alta por lo que las líneas punteadas están más pegadas y conforme nos movemos a la derecha, la frecuencia de las líneas punteadas va disminuyendo. Figura tomada de Ávila, (2018).

2) Captura de datos: Se miden previamente las estaciones de control con GNSS. Posteriormente se inicializa el sistema LiDAR y se ejecuta el vuelo conforme a las especificaciones establecidas.

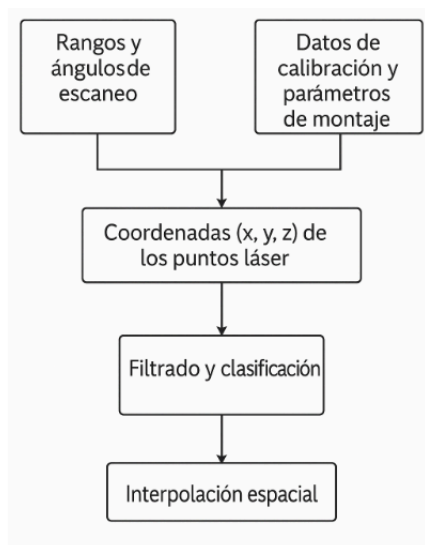
3) Control de calidad In-situ: Revisión de completitud de los datos y un reporte de control del vuelo.

Las salidas iniciales de un LiDAR aerotransportado son: (1) Distancia sensor-objetivo; (2) Datos del Sistema de Posicionamiento y Orientación (POS, por sus siglas en inglés); y (3) Datos auxiliares: Número de retorno, intensidad, ángulo de escaneo, etc. (Wang et al, 2004).

Estos datos se procesan para generar una nube de puntos, compuesta por puntos XYZ con atributos asociados como número de retorno, intensidad, etc. que permiten diferentes visualizaciones. Las nubes pueden alcanzar densidades elevadas de millares de puntos por km² y tasas de captura de hasta 100 km²/hr (Salamanca & Pérez , 2008).

El procesamiento básico de la nube incluye: 1) Filtrado y clasificación de puntos conforme el objeto con el que el láser tuvo contacto, las clases estándar incluyen: no clasificado, terreno, vegetación, construcción, agua, ruido, etc. 2) Interpolación para generar superficies continuas (*ver Figura 23*) (Dong & Chen, 2018).

Figura 23.
Procesamiento y análisis básico de LiDAR



Nota: Diagrama de flujo que muestra el proceso básico de los datos LiDAR. Figura modificada de Dong & Chen, (2018)

La clasificación puede realizarse manualmente o mediante algoritmos en software especializado (Salamanca & Pérez, 2008). Wang et al, (2004) compara softwares de código abierto y privado con base en las funciones que permiten realizar (ver Figura 24).

Figura 24.
Principales softwares de procesamiento lidar y sus funciones

Software	3D Display	Classification	Interactive Editing	Batch Processing	Topographic Application	Forest Application	Powerline Application	Building Application
ArcGIS	√	√	√	×	√	×	×	×
CloudCompare	√	×	√	×	×	×	×	×
ENVI LiDAR	√	√	√	×	×	×	√	×
FUSION	×	×	×	×	×	√	×	×
Global Mapper LiDAR Module	√	√	√	×	×	×	×	×
Quick Terrain Modeler	√	×	×	×	×	×	×	×
LiDAR360	√	√	√	√	√	√	√	×
LP360	√	√	√	√	√	×	×	×
PCC (Point Cloud Catalyst)	√	√	√	×	√	√	√	×
PCM (Point Cloud Magic)	√	√	√	√	√	√	√	√
RiALITY	√	×	×	×	×	×	×	×
TerraSolid	√	√	√	√	√	×	×	×
ALiDAR	√	√	√	√	√	×	√	×

Nota: La figura muestra una comparación de softwares especializados en el manejo de datos LiDAR, se presentan 13 softwares y se comparan las siguientes clasificaciones: Visualización 3D, clasificación, edición interactiva, procesamiento por lotes, aplicaciones topográficas, aplicaciones forestales, aplicaciones de líneas de transmisión, aplicaciones

para edificios. Para cada software se indica con \checkmark si sí tiene esa capacidad y \times si no la tiene. Figura modificada de Wang et al, (2004)

Para asegurar consistencia altimétrica y posicional se comparan puntos clasificados como terreno con puntos de control, ajustando la nube si es necesario, finalmente se genera metadato con información técnica del levantamiento. (Tenorio, 2015).

2.6.4. Productos LiDAR Errores y Mitigación

La clasificación de la nube permite generar modelos de elevación, subproductos de estos, cartografía de la vegetación y visualizaciones 3D (Salamanca & Pérez , 2008).

Algunos LiDARs aerotransportados han optado por integrar el método diferencial RTK, para georeferenciar la nube de puntos en tiempo real. Al hablar de dos sistemas GNSS operando en el LiDAR, uno fijo en tierra y otro en el RPAS es necesario diferenciar entre la precisión absoluta, que marca el desplazamiento respecto a estaciones de control y la precisión relativa que señala la consistencia interna de la nube (Ávila, 2018).

Peña & Buitrago, (2015) compara los errores en Z obtenidos en diferentes proyectos que van desde los 10 cm hasta 1 m, el origen de los errores están asociados a distintos factores como el instrumento que se usa, la calidad de los datos GNSS e IMU, ángulo de escaneo (donde encontró que la precisión disminuye mediante aumenta el ángulo de escaneo), procedimientos de postprocesamiento y el software utilizado. Es por eso que deberán ser incorporados en el proceso procedimientos de validación, para asegurar que los datos finales sean representativos del terreno (Salamanca & Pérez , 2008).

Entre los principales desafíos del LiDAR se encuentran el almacenamiento, administración de grandes volúmenes de datos y requerimientos de procesamiento (Salamanca & Pérez , 2008), y aunque ha proporcionado avances y mejoras significativas, LiDAR sigue siendo considerada una tecnología compleja Ávila, (2018).

2.7. LiDAR y Fotogrametría, Puntos de Encuentro y Discrepancias

Las técnicas LiDAR y Fotogrametría permiten la adquisición remota de datos geográficos tridimensionales. Aunque difieren en su principio físico, comparten procesos, requerimientos geodésicos y productos derivados. A continuación, se sintetizan sus principales puntos de encuentro, discrepancias y complementariedades.

2.7.1. Encuentro

Se identificaron seis coincidencias principales:

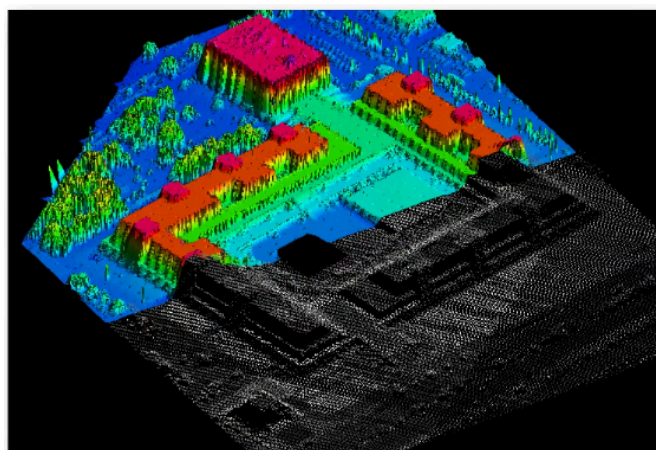
1. **Recolección de datos** - Ambas técnicas están sujetas a normativas de adquisición de datos geográficos y, al montarse en plataformas RPAS, comparten ventajas y limitaciones operativas. En ambos casos es necesario un plan de vuelo, cuya planificación y ejecución puede automatizarse mediante aplicaciones especializadas (Kersten, Wolf, & Lindstaedt, 2022).
2. **Sistema Geodésico de Referencia** - En ambos levantamientos es indispensable definir un sistema geodésico compatible. Usualmente las coordenadas iniciales se referencian a WGS84, por lo que la elevación obtenida es elipsoidal y debe transformarse a elevación ortométrica cuando el proyecto lo requiere (Dong & Chen, 2018).
3. **Control terrestre:** El uso de RTK o PPK no elimina la necesidad de puntos de control terrestre (PCT), especialmente en zonas con variaciones altimétricas significativas o cuando se realizan múltiples vuelos (Zapata, 2022). Sin PCT, las desviaciones estándar pueden alcanzar 1–2 cm en XY y 2–3 cm en Z; para referencia global se recomiendan al menos cinco puntos distribuidos en esquinas y centro (Kersten, Wolf, & Lindstaedt, 2022). La señalización debe presentar

contraste y dimensiones acordes al GSD, e incluye localización, marcado y medición (INEGI, 2015).

4. **Nube de puntos:** Ambas técnicas generan nubes de puntos, comúnmente en un formato de archivo binario secuencial LÁSer (LAS) (Dong & Chen, 2018). El avance tecnológico permite capturar más puntos en menor tiempo (Oriondo & Jurado, 2023). En ambos casos es necesario filtrar y clasificar los puntos para producir modelos derivados (Salamanca & Pérez, 2008), utilizan software especializado (Zapata, 2022) y requieren de alta capacidad de cómputo tanto para almacenamiento y procesamiento (Quirós, 2014)
5. **Modelos:** Para generar productos como MDS, MDT o modelos hidrográficos, es necesario interpolar la nube de puntos y convertirla en superficie raster continua (*ver Figura 25*). La elección del método depende del conocimiento técnico y los algoritmos disponibles (Salamanca & Pérez, 2008).

Figura 25.

Interpolación de una nube de puntos



Nota: La imagen muestra una nube de puntos monocromática que se está transformando a un raster continuo interpolando. Figura tomada de Tenorio, (2015).

6. **Precisión y Errores:** Ambas técnicas implican procesos encadenados donde el error final es acumulativo, requiriendo controles de calidad en todas las fases

(Felipe-García, Hernández-López, & Lerma, 2012). En ambos casos se distingue entre precisión relativa (consistencia interna) y exactitud absoluta (desplazamiento respecto a puntos de control) (Ávila, 2018).

2.7.2. Discrepancias

Las principales diferencias se presentan en la *Tabla 3*, donde se comparan características entre Fotogrametría y LiDAR

Tabla 3
Resumen de las diferencias entre Fotogrametría y LiDAR

Característica	Fotogrametría RGB	LiDAR
Tipo de sensor	Pasivo: Dependen de la energía de una fuente externa y mide la radiación reflejada (Veneros et al., 2020).	Activo: Generan su propia energía, son capaces de emitir y recibir la señal (Veneros et al., 2020).
Generación de la nube de puntos	Requiere reconstrucción estereoscópica (Cárdenas, Morales & Ussa, 2015)	Calcula directamente distancias mediante GNSS-INS y tiempo de retorno Dong & Chen, (2018). Nubes generalmente más densas, definidas y con menor ruido (Zapata, 2022)
Color RGB	Detección directa (Claros et al., 2016).	LiDAR no registra color de forma nativa, aunque puede integrarse con imágenes ópticas (Salamanca & Pérez, 2008).

Estado del tiempo	Está restringida a ciertas épocas del año y horas del día debido a la presencia de nubes y la proyección de sombras (DGST, 2014).	Los datos pueden ser adquiridos en condiciones climáticas adversas como días nublados y no se restringe a horas del día (Salamanca & Pérez , 2008).
Orografía	Cambios grandes en las elevaciones pueden provocar que el traslape no se cumpla y el modelo quede discontinuo. La nieve y la arena tienen áreas uniformes de gran tamaño. Por lo que pueden no ser reconstruidos (Claros et al., 2016).	Mantiene desempeño en superficies con baja variación de texturas como playas y dunas (Salamanca & Pérez , 2008).
Áreas con vegetación	La cobertura del MDT fotogramétrico disminuye al aumentar la densidad de vegetación (Štroner et al., 2023).	Permite la penetración en vegetación por donde pase la luz, por lo que el MDT generado ofrece una cobertura casi total (Štroner et al., 2023).

Nota: La tabla muestra diferentes características y sus cualidades en la fotogrametría y en LiDAR, cada una citada por el autor que lo especifica. Elaboración propia

2.7.3. Técnicas Complementarias

Finalmente resaltamos que cada técnica tiene sus puntos fuertes y débiles por lo que también pueden ser técnicas complementarias. La ortofoto es un producto característico de la fotogrametría que facilita la vectorización (Quirós, 2014); sin embargo, en imágenes ópticas no es posible visualizar el terreno bajo vegetación densa, generando vacíos en el

MDT (Dong & Chen, 2018). En áreas mixtas —zonas urbanas con vegetación densa— puede combinarse fotogrametría en áreas despejadas y LiDAR o métodos topográficos en zonas boscosas (Salamanca & Pérez , 2008).

LiDAR es recomendable en presencia de vegetación media densa y alta densa; en ausencia de esta, la fotogrametría RGB puede satisfacer los requerimientos con menor demanda de procesamiento (Zapata, 2022).

En general la información geográfica permite la generación de mapas temáticos aplicables a estudios físicos, sociales, económicos y de planeación territorial (INEGI, 2015).

A partir de los fundamentos técnicos descritos para la adquisición y procesamiento de información mediante fotogrametría y LiDAR, la presente investigación plantea una aplicación comparativa bajo condiciones controladas de levantamiento con RPAS. En el siguiente capítulo se describe la aproximación metodológica adoptada, detallando el área de estudio, el diseño de los levantamientos, los parámetros técnicos empleados y los criterios de evaluación utilizados para analizar el desempeño geométrico y altimétrico de ambas técnicas

Capítulo 3. Aproximación Metodológica

El presente estudio se desarrolló bajo un diseño metodológico comparativo orientado a evaluar, en condiciones controladas, el desempeño técnico de la fotogrametría digital y el LiDAR aerotransportado en la generación de productos cartográficos derivados de levantamientos con RPAS.

El diseño consistió en la ejecución de dos levantamientos aéreos independientes sobre la misma área de estudio, utilizando la misma plataforma aérea (Matrice 300 RTK) y variando únicamente el sensor empleado: cámara métrica para el levantamiento fotogramétrico y escáner láser para el levantamiento LiDAR. Ambos vuelos se planificaron bajo parámetros geométricos equivalentes en términos de cobertura espacial, altura relativa al terreno y superposición, con el fin de garantizar condiciones comparables de adquisición. De manera complementaria, se realizó el levantamiento de Puntos de Control Terrestre (PCT) mediante GNSS, los cuales fueron utilizados para el control geométrico y la evaluación de la precisión de los modelos generados.

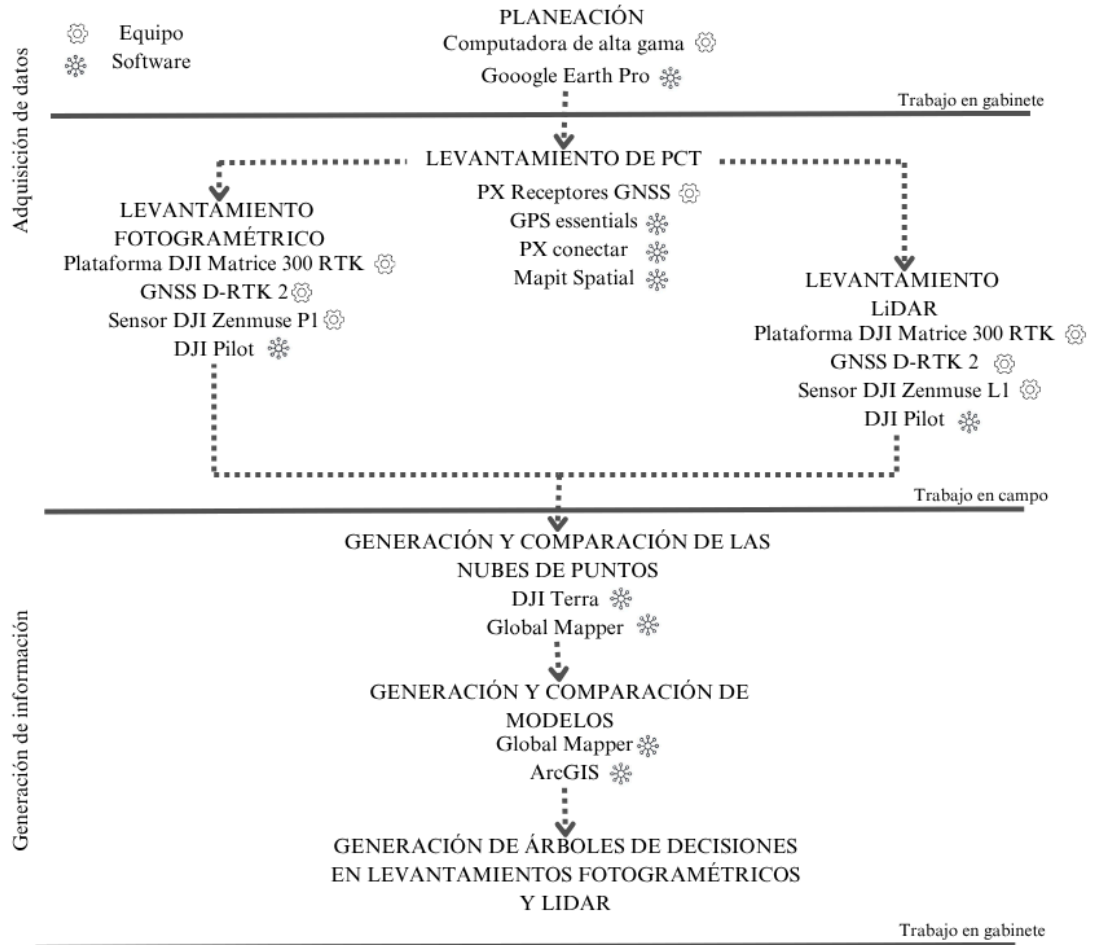
Posteriormente, cada conjunto de datos fue procesado siguiendo su flujo técnico correspondiente para generar productos cartográficos base (nube de puntos, Modelo Digital de Superficie y Modelo Digital de Terreno) y productos derivados (curvas de nivel, modelos de pendiente, sombreado, hidrografía y altura de vegetación).



El análisis comparativo se estructuró en tres niveles: 1) Evaluación geométrica y posicional de las nubes de puntos, 2) Comparación de la clasificación de terreno y generación de modelos digitales, 3) Evaluación operativa de los flujos de procesamiento.

Este diseño permitió mantener constantes las variables de entorno y plataforma,

concentrando la comparación en las diferencias inherentes a cada técnica de captura. A continuación se presenta el flujograma de las actividades que se llevaron a cabo para esta investigación (ver Figura 26)

Figura 26.
Flujograma de actividades

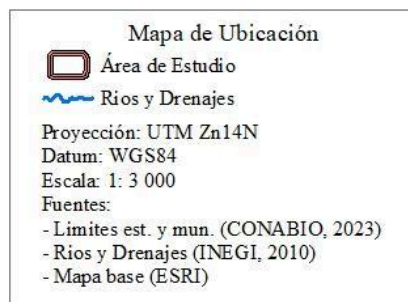
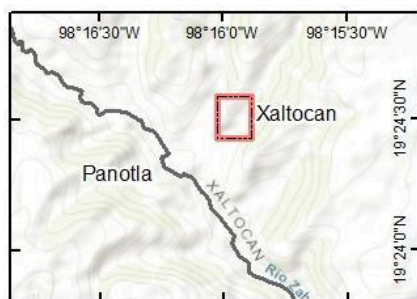
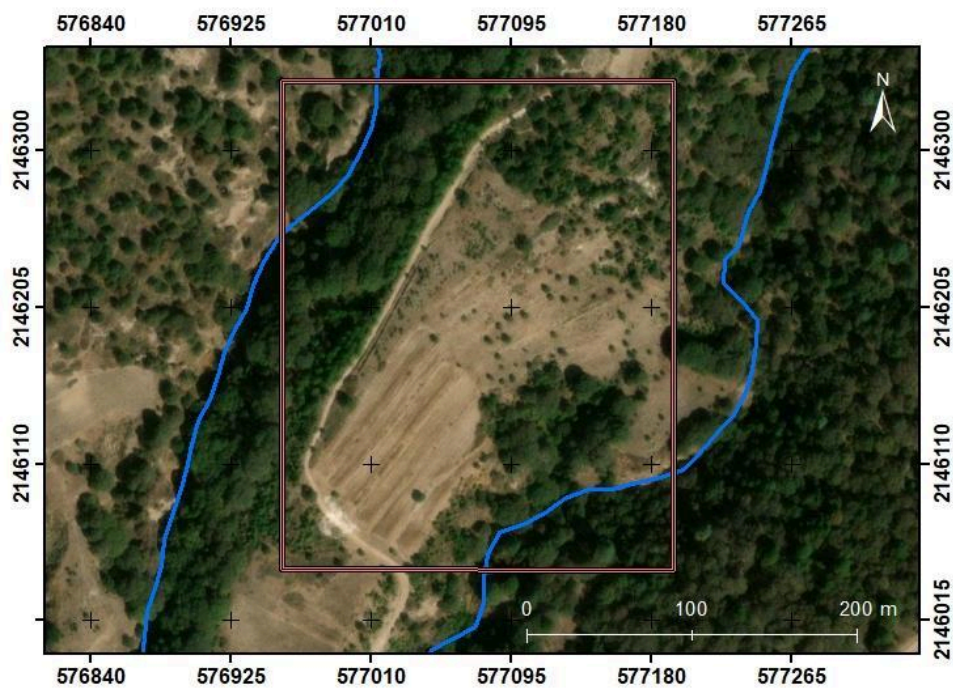


Nota: Flujo que va mostrando las actividades realizadas para obtener los resultados del presente trabajo. Se divide, en primer lugar, en dos etapas: la de adquisición de datos y la de generación de información. En segundo lugar se clasifican las actividades en aquellas que se realizan en trabajo de gabinete y las que se realizan con trabajos de campo. Debajo de cada actividad se enlistan el equipo, representado por una tuerca , y el software, representado por una red , que se requiere para su realización. Figura de elaboración del autor.

3.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Xaltocan en el estado de Tlaxcala, México, es parte del núcleo ejidal “San Tadeo Huiloapan”, con una extensión aproximada de 7 hectáreas (*ver Figura 27*) (Municipio de Xaltocan, 2023). En cuanto al relieve se ubica en el Altiplano Central de México, dentro del eje neovolcánico, con altitudes entre 2,300 y 2,500 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y clima templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, s.f.). El terreno presenta variaciones de pendiente, zonas de cultivo, áreas arboladas y pastizales. Cuenta con corrientes de agua intermitentes que conforman la cuenca del río Atoyac (CentroGeo, 2019). Una de las corrientes de agua se hizo presente durante la recolección de datos, condición relevante para el análisis del comportamiento de los modelos en superficies con variación altimétrica y cobertura mixta.

Figura 27.
Mapa de ubicación



Nota: El mapa muestra el área de estudio y su localización dentro de México. Figura de elaboración del autor.

3.2. Equipo y software

En esta investigación se empleó equipo especializado para la adquisición y procesamiento de datos geoespaciales, conforme al flujo metodológico definido.

3.2.1. Computadora

Se utilizó una computadora con procesador Intel Core i7-8700K (3.7–4.7 GHz), 16 GB de RAM y tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti, suficiente para el manejo de nubes de puntos densas y modelos digitales de elevación.

3.2.2. Receptores GNSS Para PCT y Su Software

Se emplearon receptores PX GNSS de doble frecuencia con capacidad de conexión a constelaciones GPS, GLONASS, BeiDou y Galileo, operando bajo modalidad RTK (PX Receptores GNSS, 2021).

Para la colecta en campo se utilizaron las aplicaciones Google Earth Pro, GPS Essential, PX Conectar y Mapit Spatial (versión 1.5.0), esta última como colectora de datos RTK.

3.2.3. Plataforma Aérea

Se utilizó la plataforma Matrice 300 RTK (M300), drone cuadricóptero de 6.3 kg, capaz de volar a altitudes de hasta 7000 m, con tiempo de vuelo de 45 minutos. Controlado mediante el DJI Smart Controller Enterprise, con transmisión de hasta 15 km y batería ampliable a 4.5 hs. La estación de carga inteligente BS60 para recargar las baterías del drone y del control. Con la estación móvil GNSS D-RTK 2 de DJI, el M300 RTK logra una precisión de posicionamiento de ± 0.1 m en horizontal y vertical. Permite instalar diferentes sensores DJI, (2023) . Su gama cartográfica tiene fijo el sistema geodésico WGS84 en coordenadas globales. Cuenta con la App DJI Pilot que permite la planificación y ejecución de vuelos (Kersten, Wolf, & Lindstaedt, 2022).

3.2.4. Sensor Fotogramétrico

El levantamiento fotogramétrico se realizó con el sensor DJI Zenmuse P1, cámara de 45 MP con sensor CMOS full-frame y objetivo de 35 mm (Kersten et al., 2022)

3.2.5. Sensor LiDAR

El levantamiento LiDAR se realizó con el sensor DJI Zenmuse L1, equipado con módulo Livox, alcance máximo de 450 m y capacidad de hasta tres retornos por pulso, con una tasa de hasta 480,000 puntos por segundo (Kersten et al., 2022)

3.2.6. Software

- DJI Terra (v4.2.5), reconstrucción fotogramétrica y LiDAR
- Global Mapper (v22.1), análisis y clasificación de nubes de puntos.
- ArcGIS Pro (v3.4), generación de modelos derivados y representación cartográfica.

3.3. Adquisición de Datos

La adquisición de datos se realizó en dos etapas: Planeación en gabinete y trabajo en campo. Esta organización permitió definir previamente los parámetros técnicos del levantamiento, así como establecer un esquema de control terrestre que garantizara la consistencia geométrica de ambos métodos.

3.3.1. Planeación en gabinete

Esta primera etapa tuvo como propósito establecer el diseño técnico del levantamiento y definir los parámetros necesarios para garantizar la comparabilidad entre la técnica fotogramétrica y la técnica LiDAR.

La planeación inició con la delimitación del área de estudio mediante la generación de un polígono en formato KML utilizando Google Earth Pro, el cual definió una superficie

aproximada de 7 hectáreas. El archivo KML fue importado en la aplicación DJI Pilot para la configuración de dos planes de vuelo independientes: uno fotogramétrico y otro LiDAR. En ambos casos se establecieron los parámetros de altura de vuelo, velocidad, traslape longitudinal y traslape lateral conforme a las especificaciones técnicas de cada sensor (*ver Tabla 4*). Una de las decisiones importantes a resaltar es que se activó la altura constante del *dron* respecto al terreno, por lo que el *dron* cambiará su altitud para mantener la elevación constante respecto a un raster de elevaciones que DJI baja de internet (*ver Figura 28*).

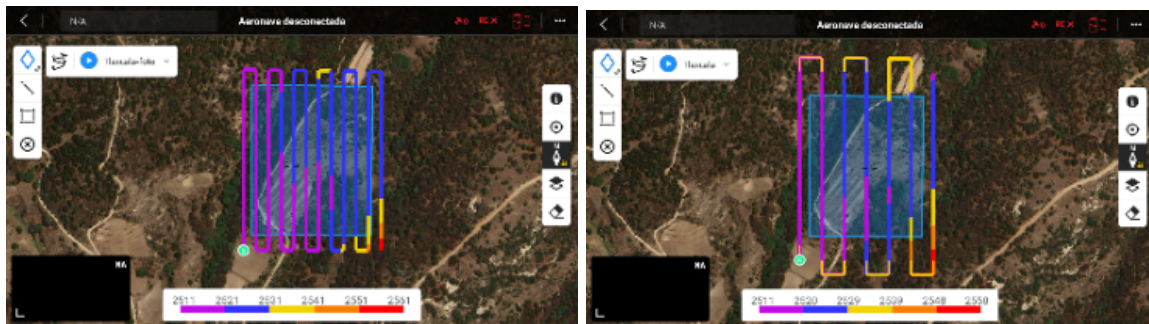
Tabla 4
Parámetros de Vuelo Fotogramétrico y LiDAR

Parámetro	Fotogrametría	LiDAR
Plataforma	DJI Matrice 300 RTK	DJI Matrice 300 RTK
Sensor	Cámara métrica DJI P1 (35 mm)	DJI Zenmuse L1
Altura de vuelo	80 m (seguimiento del terreno activado)	80 m (seguimiento del terreno activado)
Velocidad	8 m/s	6 m/s
Superposición longitudinal	80 %	—

Superposición lateral	70 %	50 % (visible) / 50 % (LiDAR)
Modo de captura	Intervalo por distancia	Intervalo por distancia
GSD	1 cm/píxel	2.18 cm/píxel
Modo de retorno	—	Triple
Tasa de muestreo	—	160 kHz
Modo de exploración	—	No repetitivo
Adición de color RGB	—	Activo
Tiempo estimado	10 min 24 s	12 min 30 s

Nota: La tabla muestra los parámetros que se ocuparon para los levantamientos con RPAS. Elaboración propia

Figura 28.
Planes de Vuelo



Nota: Podemos ver una captura del plan de vuelo para cada levantamiento, imagen superior fotogrametría, imagen inferior LiDAR. Las líneas de colores muestran la trayectoria del drone y su color simboliza su altura adaptándose al terreno. Elaboración propia.

Paralelamente, se diseñó el esquema de control terrestre. A partir del análisis del relieve y condiciones de visibilidad satelital, se definieron cinco Puntos de Control Terrestre (PCT): cuatro ubicados en las esquinas del polígono delimitado y uno en la zona central. Su ubicación fue planificada considerando criterios de distribución espacial y variabilidad altimétrica. El tipo de levantamiento se definió como local, con determinación de coordenadas mediante base promediada y método diferencial RTK. El sistema geodésico adoptado fue WGS84 con proyección UTM Zona 14, asegurando coherencia entre el levantamiento de campo y el procesamiento posterior. Para la señalización se optó por usar lonas con target. Las coordenadas preliminares de los puntos fueron exportadas y cargadas en la aplicación GPS essentials para facilitar su localización durante el trabajo en campo. La configuración general del control terrestre se resume en la *Tabla 5*.

Tabla 5.
Parámetros del Control Terrestre

Elemento	Especificación
Sistema de coordenadas	WGS84 / UTM Zona 14
Técnica de recolección	GNSS diferencial RTK
Base	Coordenadas promediadas
Número total de puntos	5
Distribución	4 en esquinas y 1 central

Señalización	Lona con cruz
Fecha prevista	20 de agosto de 2023
Condiciones meteorológicas previstas	Despejado, sin lluvia
Factores de riesgo identificados	Barrancas y presencia de fauna

Nota: La tabla muestra los parámetros que se ocuparon para el levantamiento del control terrestre. Elaboración propia

Finalmente previo a la ejecución del levantamiento se realizó una revisión operativa del equipo con base en una lista de verificación (*ver Anexo 1*).

3.3.2. Trabajo en Campo

El trabajo en campo se llevó a cabo el 20 de agosto de 2023 (*ver Anexo 2*) y se estructuró en cuatro etapas: Establecimiento del control terrestre, ejecución del vuelo fotogramétrico, ejecución del vuelo LiDAR y respaldo de la información generada. Las actividades se desarrollaron de forma secuencial en el área previamente delimitada durante la planeación en gabinete.

3.3.2.1. Levantamiento de Puntos de Control Terrestre (PCT)

Al llegar al sitio, la jornada inició con el replanteo de los cinco PCT siguiendo la ruta programada en la aplicación GPS essentials. Se inició con la localización y señalización del punto base. Sobre la lona se niveló y centró el tripie, al cual se acopló el receptor PX “base” con su antena GNSS y su antena de radio.

A través de la aplicación PX conectar, el receptor se configuró como estación base y con la aplicación Mapit Spatial se promediaron sus coordenadas por 2 min en el sistema geodésico WGS84 y la proyección UTM Zona 14. Una vez definidas las coordenadas se ingresaron como conocidas en PX conectar, dejando la base en operación.

Posteriormente se localizaron los cuatro PCT restantes, cada que se localizaba uno se marcaba con la lona y se realizó la medición con el receptor GNSS en modo rover bajo modalidad RTK. Durante el procedimiento se verificó la correcta recepción de señales de las constelaciones disponibles, se tomaron fotos del punto y se tomaron notas técnicas para el informe de campo (*ver Anexo 3*). En casos donde no fue posible acceder al punto planificado debido a condiciones adversas para la observación satelital se colocaron los puntos en ubicaciones alternas, cercanas y con visibilidad adecuada.

3.3.2.2. Vuelo Fotogramétrico

Con el control terrestre establecido se instaló la estación móvil D-RTK 2 sobre el punto base. Se desplegó el *drone* Matic 300 RTK, se le instaló la cámara Zenmuse P1, verificando la correcta inserción de la tarjeta SD, se cargó el plan de vuelo previamente configurado en la aplicación DJI Pilot. El vuelo se ejecutó de manera automatizada siguiendo la trayectoria y parámetros definidos en gabinete.

3.3.2.3. Vuelo LiDAR

Posteriormente se instaló el sensor LiDAR DJI Zenmuse L1 en la misma plataforma aérea, conservando la configuración de la estación móvil D-RTK 2. Se cargó el plan de vuelo LiDAR previamente definido y se ejecutó bajo modalidad automatizada.

3.3.2.4. Cierre de Actividades

Finalizadas ambas misiones, se procedió a retirar las lonas de los PCT, guardar el equipo de campo y respaldar los datos capturados por cada sensor en una computadora portátil. Los archivos fueron organizados en carpetas independientes para fotogrametría y LiDAR, conservando la estructura nativa de cada sistema para su posterior procesamiento.

Se verificó la integridad de los archivos mediante revisión de tamaños y formatos, asegurando su integridad para las etapas de procesamiento y análisis.

3.4. Procesamiento

El procesamiento de la información se realizó de manera independiente para cada técnica, siguiendo los flujos específicos de fotogrametría digital y LiDAR aerotransportado en el software DJI Terra. Posteriormente, se aplicaron procedimientos de ajuste y clasificación en global mapper y finalmente la generación de productos cartográficos equivalentes en Arcgis, con el fin de garantizar condiciones comparables para el análisis.

3.4.1. Control de Calidad de PCT

Posterior al levantamiento en campo, las coordenadas de los Puntos de Control Terrestre fueron exportadas en formato CSV y revisadas en entorno SIG con el fin de verificar su correcta captura y coherencia espacial respecto al área de estudio.

Durante esta revisión se detectó que uno de los puntos medidos (PCT 4) presentaba una localización inconsistente respecto a su posición planificada, lo que indicaba un error en su captura o registro. En consecuencia, dicho punto fue descartado del procesamiento, quedando disponibles cuatro PCT válidos (1, 2, 3 y 5) para las etapas posteriores.

3.4.2. Procesamiento Fotogramétrico

La reconstrucción estereoscópica de las fotografías se desarrolló en el software DJI Terra. El procesamiento conllevó primero la orientación interna de las fotografías, donde se revisó el sistema geodésico y los datos de orientación. Secuencialmente se completa con la unión de los pares estereoscópicos y la integración de los PCT. Los cuatro PCT validados fueron incorporados durante la etapa de aerotriangulación con el objetivo de ajustar la orientación absoluta del bloque de imágenes al sistema de referencia definido

Una vez finalizada la alineación, se generó la nube de puntos, el nivel de densidad y los parámetros de clasificación automática fue configurado conforme a los predeterminados del software para proyectos de alta resolución y pendiente suave, estas y otras condiciones de salida se presentan en el *Anexo 4*.

A partir de la nube de puntos se generó el Modelo Digital de Superficie mediante la interpolación raster de los puntos y la ortofoto georreferenciada.

3.4.3. Procesamiento LiDAR

El procesamiento LiDAR se realizó inicialmente en DJI Terra para la generación de la nube de puntos georreferenciada, integrando los datos del escáner láser, GNSS e IMU que viene en los archivos nativos que genera el sensor L1. El PCT 3 fue utilizado como referencia para la configuración de la estación base. Se generó la nube de puntos, el nivel de densidad y los parámetros de clasificación automática fue configurado conforme a los predeterminados del software para proyectos de alta resolución y pendiente suave, estas y otras condiciones de salida se presentan en el *Anexo 5*.

3.4.4. Ajuste y Alineación de Nubes

Con el fin de asegurar comparabilidad geométrica entre ambos modelos, se realizó un proceso de alineación espacial mediante herramientas de ajuste disponibles en Global Mapper. El procedimiento consistió en:

1. Delimitación de la nube al área de estudio.
2. Validación de consistencia altimétrica a través de la superposición de nubes de puntos y los PTC.
3. Aplicación de algoritmo de alineación iterativa entre nubes de puntos.

En el caso fotogramétrico debido al número limitado de PCT disponibles tras la depuración, se emplearon los mismos puntos para ajuste y evaluación de la consistencia altimétrica, lo que permitió estimar la consistencia interna del modelo. En LiDAR se ajustó el modelo con el punto 3 y los cuatro PCT validados (1, 2, 3 y 5) fueron utilizados como puntos de verificación externa. La comparación cuantitativa entre los modelos generados por ambas técnicas, basada en estos puntos de control, se presenta en el Capítulo 4.

3.4.5. Generación de Productos Cartográficos Derivados

A partir de la nube de puntos y mediante la interpolación se generaron en primer lugar, el Modelo Digital de Superficie (MDS) de la nube de puntos completa, representando la elevación de todos los elementos presentes en la superficie, incluyendo la vegetación.

Posteriormente, se obtuvo el Modelo Digital de Terreno (MDT) interpolando los puntos clasificados como terreno en cada nube de puntos. Debido a que la clasificación automática puede presentar inconsistencias en zonas con vegetación o variación topográfica, se realizó una revisión supervisada de la clasificación para mejorar la representación del relieve natural. Con el objetivo de evaluar el efecto de la resolución

espacial en la representación del relieve, se generaron dos versiones del MDT para cada técnica: una con tamaño de píxel de 0.2 m, cercana a la densidad promedio de las nubes de puntos, y otra con tamaño de píxel de 2 m, que permite observar la generalización del terreno al aumentar la dimensión del píxel.

A partir de los MDT generados se derivaron diversos productos cartográficos utilizados para el análisis comparativo:

- Curvas de nivel, generadas con una equidistancia de 1 m.
- Modelo de pendientes, expresado en grados (0° – 90°).
- Modelo de sombreado, calculado con un azimut de iluminación de 315° y una altura solar de 45° .
- Red hidrográfica, obtenida mediante el análisis de dirección y acumulación de flujo a partir del MDT.
- Modelo de altura de vegetación, calculado mediante la diferencia entre el Modelo Digital de Superficie y el Modelo Digital de Terreno.

Todos los productos derivados fueron generados bajo el mismo sistema de referencia espacial y utilizando parámetros equivalentes para ambas técnicas, con el propósito de garantizar condiciones comparables para el análisis posterior.

3.4.6. Criterios de Evaluación Comparativa

Con el objetivo de analizar el desempeño técnico de ambas metodologías, se definieron los siguientes criterios de evaluación:

1. Evaluación operativa.

2. Exactitud posicional horizontal y vertical.
3. Calidad en la clasificación de terreno y su continuidad en zonas con cobertura vegetal.
4. Relación entre densidad de la nube y la resolución de los modelos
5. Comparación de productos derivados

La evaluación de estos criterios se presenta en el Capítulo 4.

Capítulo 4. Resultados, Análisis Comparativo y Criterios

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los levantamientos fotogramétrico y LiDAR realizados en el área de estudio. En primer lugar se exponen los resultados de cada técnica de manera independiente, describiendo las características de las nubes de puntos generadas, su precisión geométrica y los productos cartográficos derivados. Posteriormente se desarrolla un análisis comparativo basado en los criterios definidos en el capítulo metodológico, con el objetivo de evaluar el desempeño relativo de ambas técnicas en términos geométricos, estructurales y operativos.

4.1. Resultados del Levantamiento Fotogramétrico

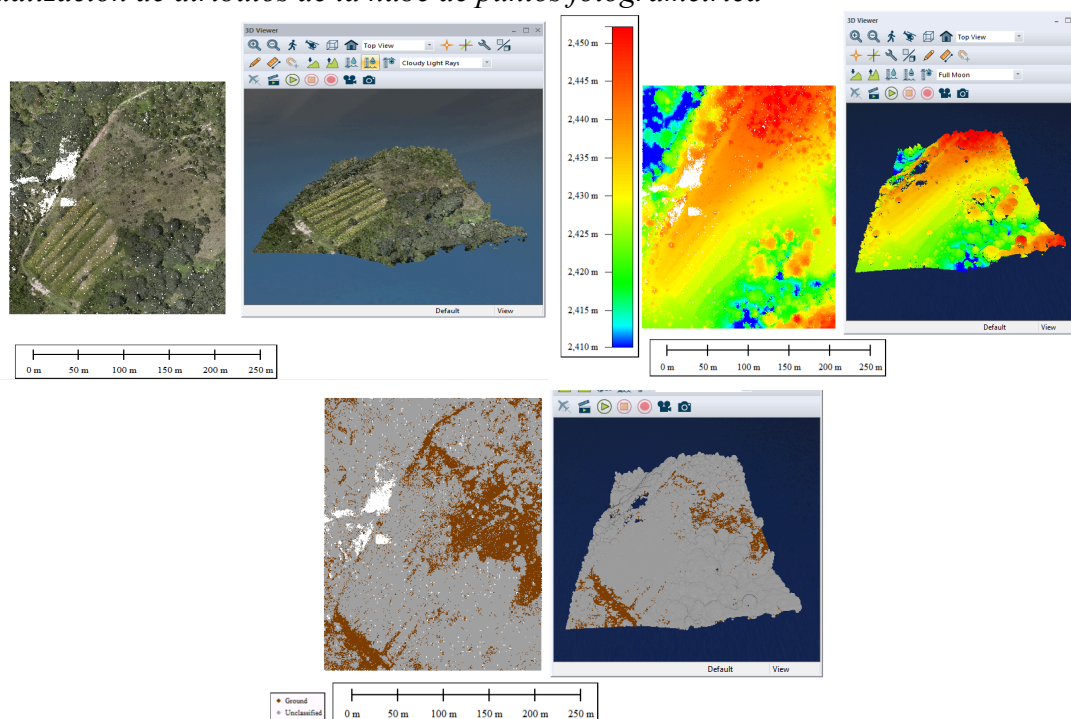
El procesamiento del conjunto de imágenes capturadas durante el vuelo fotogramétrico permitió reconstruir una nube de puntos tridimensional georreferenciada. A partir de esta nube se generaron modelos digitales de superficie, modelos digitales del terreno y diversos productos cartográficos derivados que se presentan en este apartado.

4.1.1. Nube de Puntos Generada y Ortofoto

La reconstrucción fotogramétrica produjo una nube de puntos compuesta por 41,993,843 puntos, el archivo original tuvo un peso de 1.01 GB. El archivo recortado al área de estudio contiene 26,748,625 puntos con una densidad aproximada de 529.26 pts/m² y un espaciamiento medio de 4.34 cm y en su formato comprimido tiene un peso de 0.134 GB.

Cada punto de la nube guarda en sus atributos sus coordenadas tridimensionales, valores de color RGB, su elevación y su clase, estos datos permiten diferentes formas de visualizar y clasificar la nube (*ver Figura 29*).

Figura 29.
Visualización de atributos de la nube de puntos fotogramétrica



Nota: Visualizaciones de la nube de puntos fotogramétrica según distintos atributos (RGB, elevación elipsoidal y clases de puntos), obtenidas en el software Global Mapper. Elaboración propia.

En la nube de puntos fotogramétrica se observan vacíos en la zona norte del área de estudio, particularmente en los sectores con vegetación densa. En la visualización por elevación, las zonas más bajas, representadas en color azul, se presentan de forma dispersa y con menor continuidad espacial. En la visualización por clases se identifican extensas áreas clasificadas como “no asignado” (color gris). Por su parte, la clase de terreno natural, representada en color café, se observa principalmente en las áreas con vegetación dispersa.

La *Figura 30* presenta la ortofoto generada a partir del procesamiento fotogramétrico de las imágenes aéreas del área de estudio. La ortofoto tiene un tamaño de píxel de 0.015 m (1.5 cm) con píxeles cuadrados, lo que permite observar con alto nivel de detalle los elementos superficiales.

Figura 30.
Ortofoto



Nota: Ortofoto generada a partir del procesamiento fotogramétrico en DJI Terra.
Elaboración propia.

4.1.2. Precisión Geométrica

El reporte de precisión del procesamiento fotogramétrico (*ver Anexo 4*) desglosa que el 100% de las imágenes fueron georreferenciadas mediante solución GNSS RTK fija (RTK Fix), lo que confirma una correcta recepción de las correcciones diferenciales entre la estación base y el dron durante el levantamiento. Asimismo, el reporte muestra errores muy bajos en la trayectoria del sistema GNSS-IMU, lo que indica una solución de navegación estable durante la adquisición de los datos.

La evaluación de los Puntos de Control Terrestre (PCT) reportada por DJI Terra arrojó un RMSE tridimensional de 0.507 m, con un error horizontal de 0.506 m y un error vertical de 0.03 m. Estos valores corresponden al error interno del ajuste fotogramétrico durante la aerotriangulación. El análisis individual de los puntos de control muestra que los puntos 1 y 5 presentan errores tridimensionales superiores a 0.6 m, mientras que los puntos 2 y 3 presentan errores menores a 0.2 m.

Posteriormente, la nube de puntos final fue evaluada en Global Mapper mediante la comparación directa entre la elevación de la nube y las coordenadas de los Puntos de Control Terrestre, obteniendo un RMSE vertical de 0.1 m. Este valor corresponde a la exactitud vertical del producto final, al evaluar directamente la nube de puntos generada.

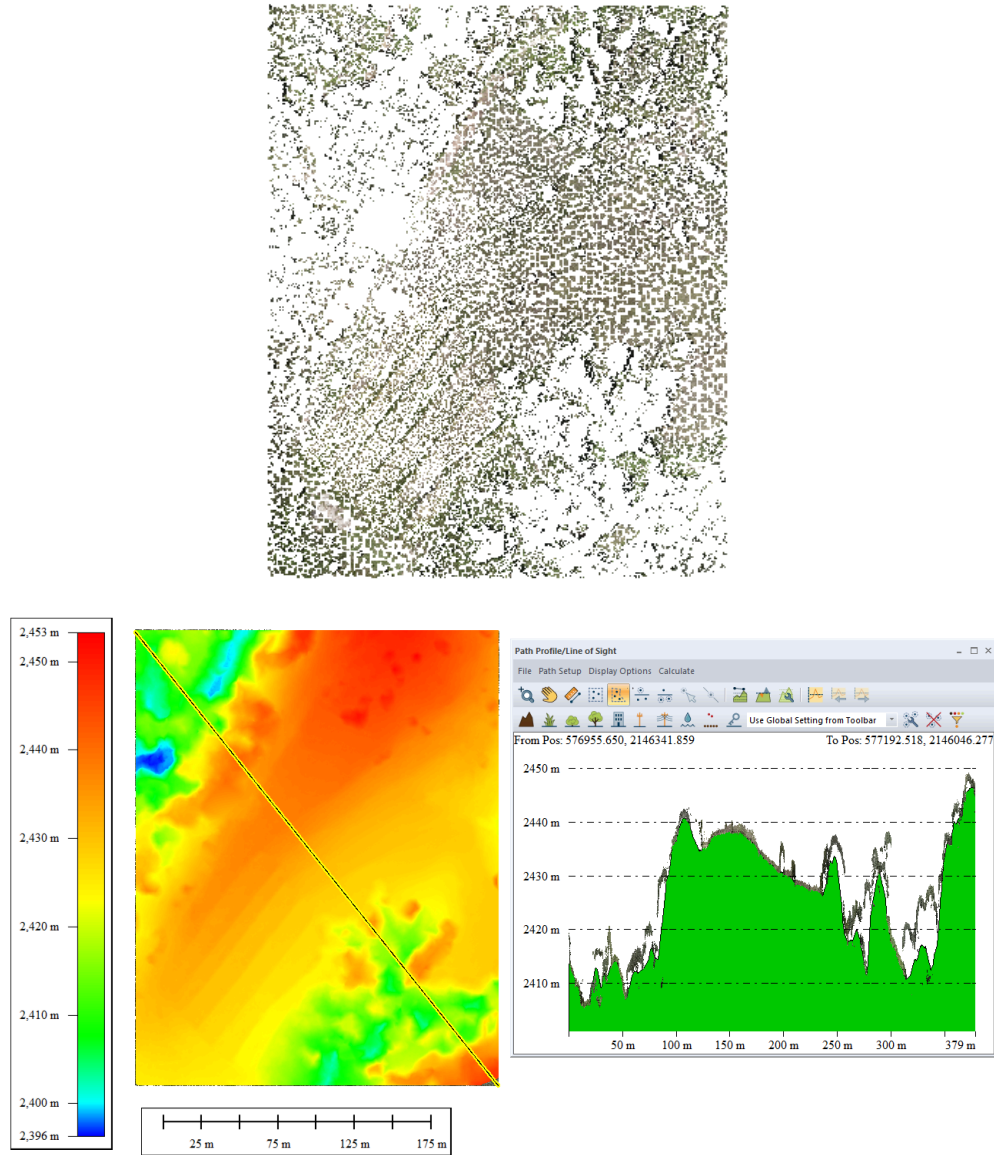
4.1.3. Clasificación de Terreno

En la clasificación automática se asignaron 3,919,933 puntos de terreno, que representan el 14.65% de la nube. Se observa que la distribución de puntos es homogénea

en zonas con vegetación poco densa, mientras que en áreas con vegetación densa se presenta menor continuidad de puntos (*ver Figura 31*).

Figura 31.

Puntos fotogramétricos asignados a terreno natural, su raster correspondiente y un perfil



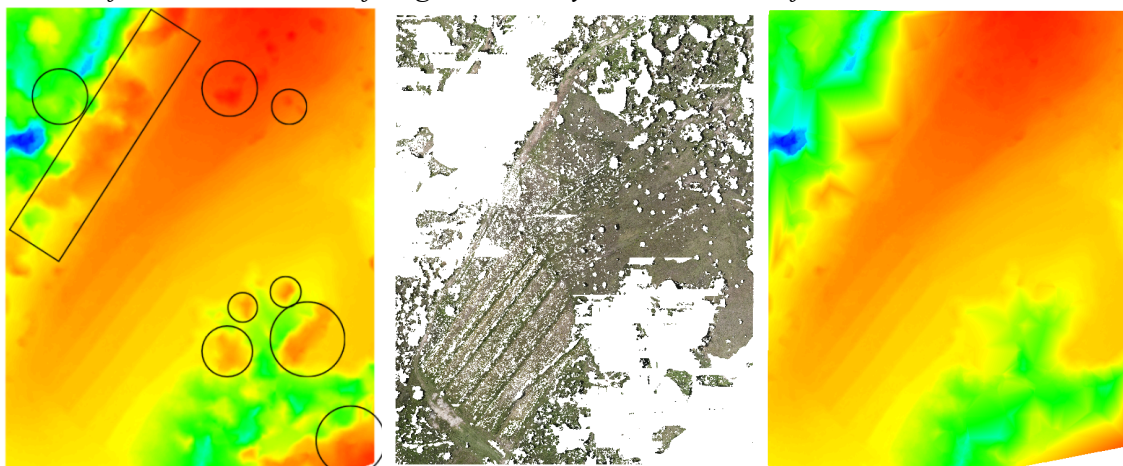
Nota: En la parte superior se muestran los puntos clasificados como terreno y abajo el modelo continuo generado a partir de dicha clasificación y su perfil. Elaboración propia.

El perfil ayudó a identificar píxeles en el raster que no pertenecen al terreno sino a copas de árboles (*ver Figura 32*), lo que llevó a una reclasificación de los puntos donde los

asignados a terreno terminaron siendo 3,604,304.0, que representa el 13.50% de la nube total.

Figura 32.

Zonas conflictivas en el MDT fotogramétrico y su MDT reclasificado



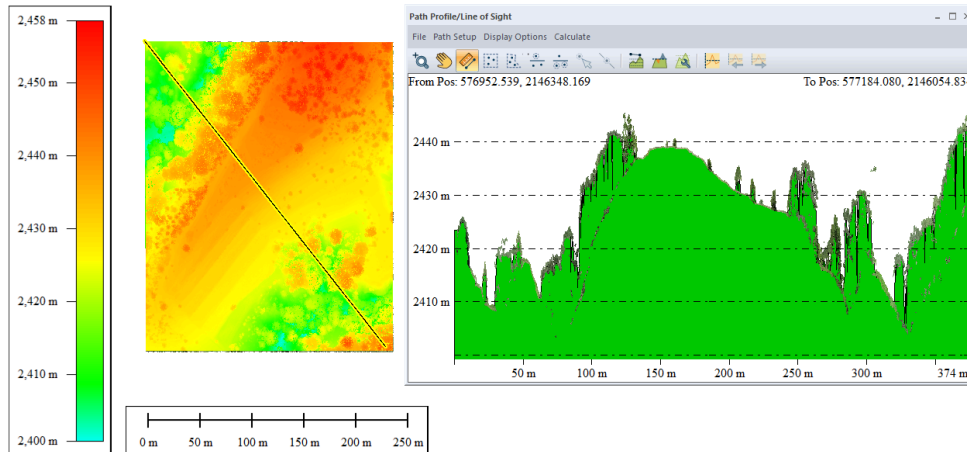
Nota: Identificación de zonas donde la clasificación automática asigna incorrectamente puntos de vegetación como terreno, apoyada en el análisis de perfil. Elaboración propia.

4.1.4. Productos Derivados

El Modelo Digital de Superficie (MDS) debido al espaciado medio de 4.34 cm generó un tamaño de pixel automático de 0.010 m y se exportó en 20 cm y en 2 m. si vemos el perfil del raster observamos que el modelo sigue a los puntos más altos de la nube, dejando abajo los puntos de terreno (*ver Figura 33*).

Figura 33

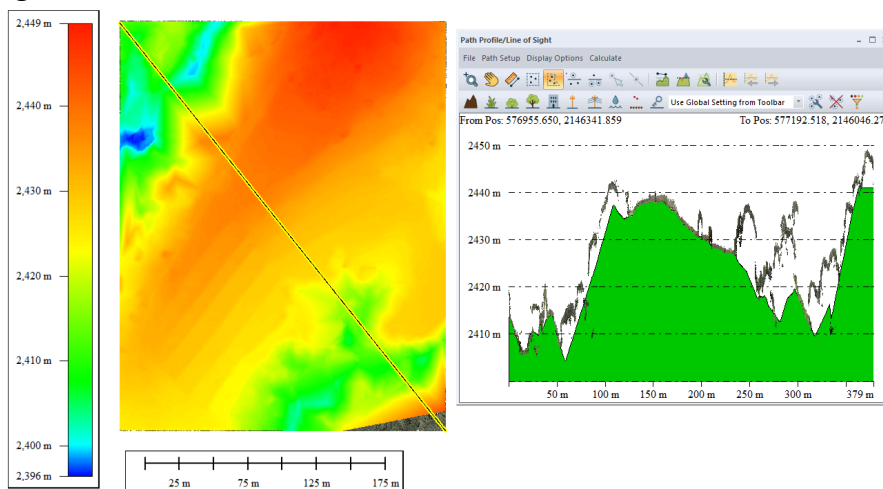
Modelo fotogramétrico de elevaciones de la superficie



Nota: Modelo digital de superficie generado con fotogrametría y perfil asociado. Elaboración propia.

Por otro lado el Modelo Digital de Terreno debido a que el espaciado medio de los puntos clasificados como terreno fue de 9.3 cm (115.57 pts/m²) se generó un raster con tamaño de píxel de de 0.017m. y lo exportamos en 20 cm y en 2 m, si vemos el perfil del raster observamos que el modelo sigue a los puntos inferiores de la nube que interpretamos como terreno (*ver Figura 34*).

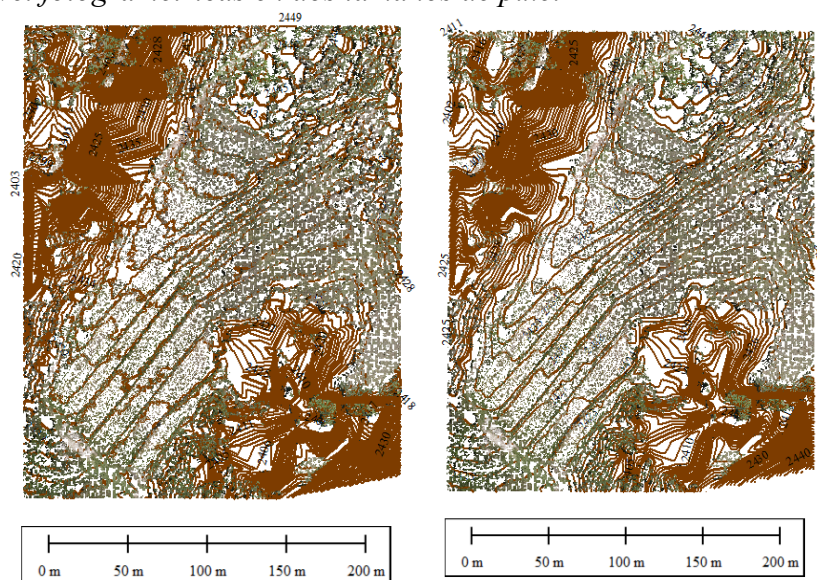
Figura 34
Modelo fotogramétrico de elevaciones del terreno



Nota: Modelo digital de terreno generado a partir de puntos clasificados como terreno y perfil asociado. Elaboración propia.

Las curvas de nivel con equidistancia de 1m generadas a partir del MDT presentan formas más angulosas en las zonas de mayor interpolación de datos, que corresponden a las zonas con huecos en la nube, como diferencia entre las nubes resultados de tamaño de píxel de 0.2 m y de 2 m, es que en la de 2m se vuelve más suavizada (ver Figura 35).

Figura 35
Curvas de Nivel fotogramétricas en dos tamaños de píxel

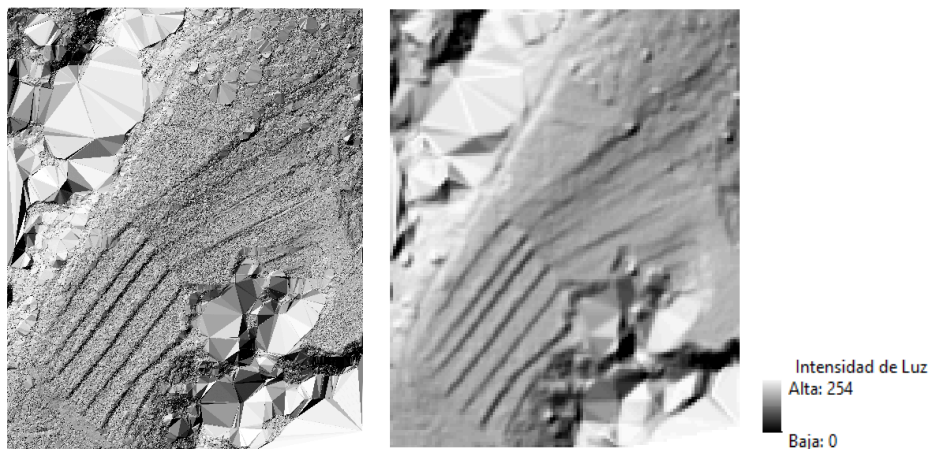


Nota: Curvas de nivel generadas a partir de MDT con resoluciones de 0.2 m y 2 m. Elaboración propia.

El resultado del sombreado es un raster con valores de 0 a 254 que simulan la intensidad de iluminación, donde 0 es sombra total y 254 iluminación total. El detalle que genera el tamaño de píxel 0.2 m favorece a entender la configuración del terreno (ver Figura 36)

Figura 36

Modelo de sombras en el terreno generados con fotogrametría

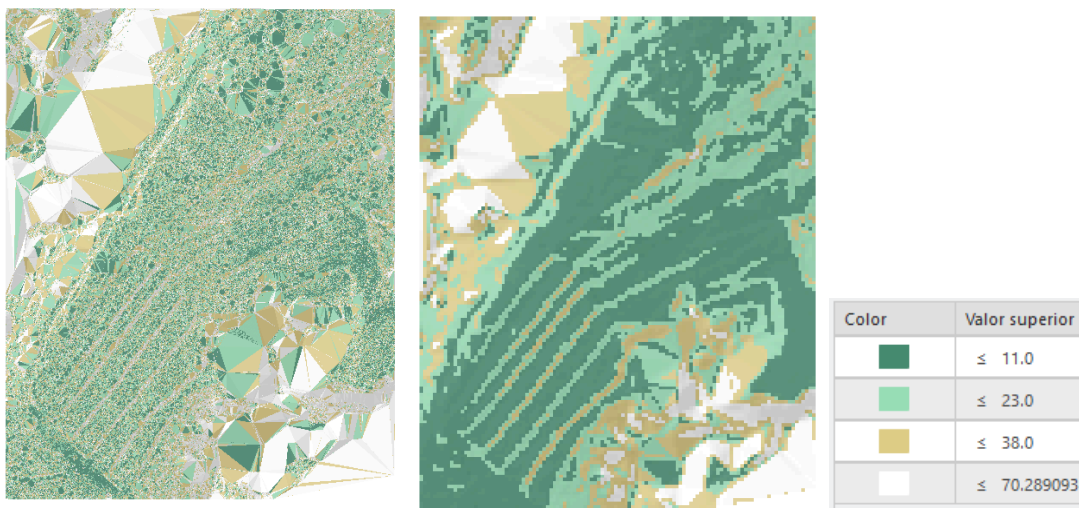


Nota: Modelo de sombreado derivado del MDT con diferentes resoluciones espaciales. A la izquierda el generado a partir del MDT de 0.2 m y a la derecha el generado a partir del MDT de píxel de 2 m. Elaboración propia.

El raster de pendientes generado a partir del MDT de 0.2 m presenta un mayor nivel de detalle, mientras que el de 2 m muestra una superficie más generalizada, facilitando la identificación de zonas con distinta inclinación (*ver Figura 37*).

Figura 37

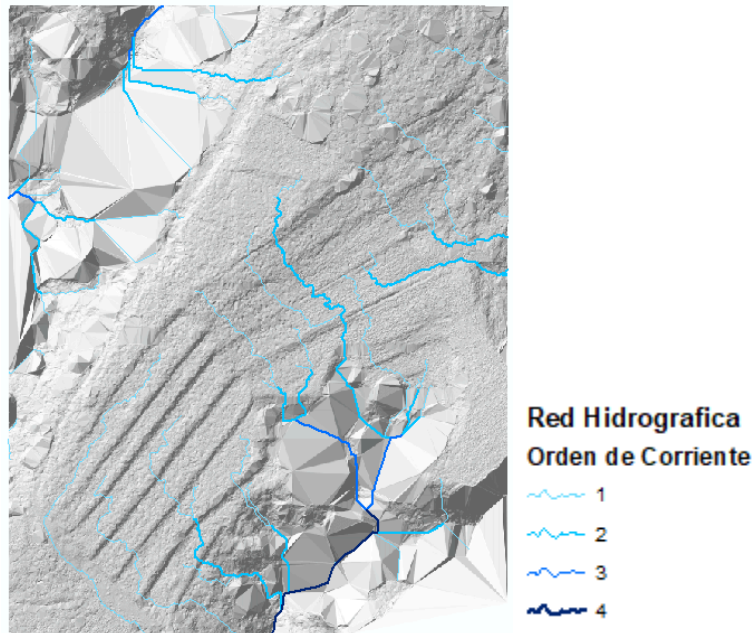
Modelo de pendientes generados con fotogrametría



Nota: Modelo de pendientes derivado del MDT con diferentes resoluciones espaciales. A la izquierda el generado a partir del MDT de 0.2 m y a la derecha el generado a partir del MDT de píxel de 2 m. Elaboración propia.

El archivo vectorial de polilíneas que representa la red hidrográfica fotogramétrica muestra una acumulación de flujo que va desde las zonas más elevadas del terreno a las zonas con menor elevación, llegando a corrientes hasta de orden 4, en la zona noroeste parece haber dos corrientes independientes y en la zona sur este se forma una corriente continua (ver Figura 38).

Figura 38
Modelo hidrográfico generado con fotogrametría

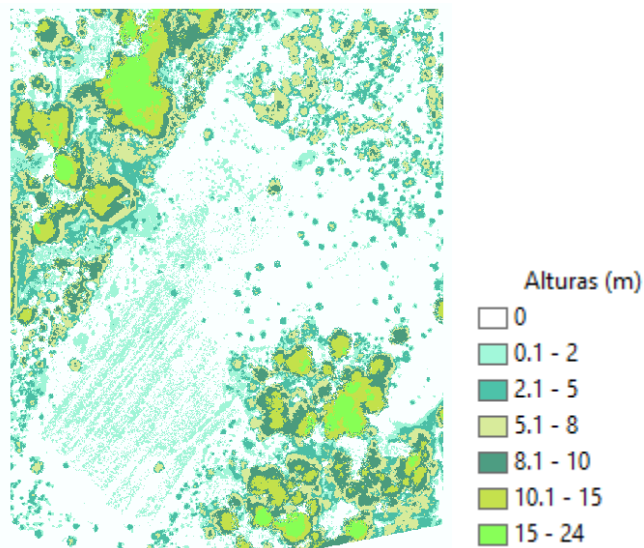


Nota: Red hidrográfica derivada del MDT y su simbología. Elaboración propia.

El modelo de alturas de dosel identifica con éxito las áreas de cultivo y las elevaciones son consistentes a lo visto en campo y en la ortofoto, identificando las zonas con vegetación más alta (ver Figura 39).

Figura 39

Modelo de alturas de dosel generado con fotogrametría



Nota: Modelo de altura de dosel derivado de la diferencia entre MDS y MDT y su simbología. Elaboración propia.

4.2. Resultados del Levantamiento LiDAR

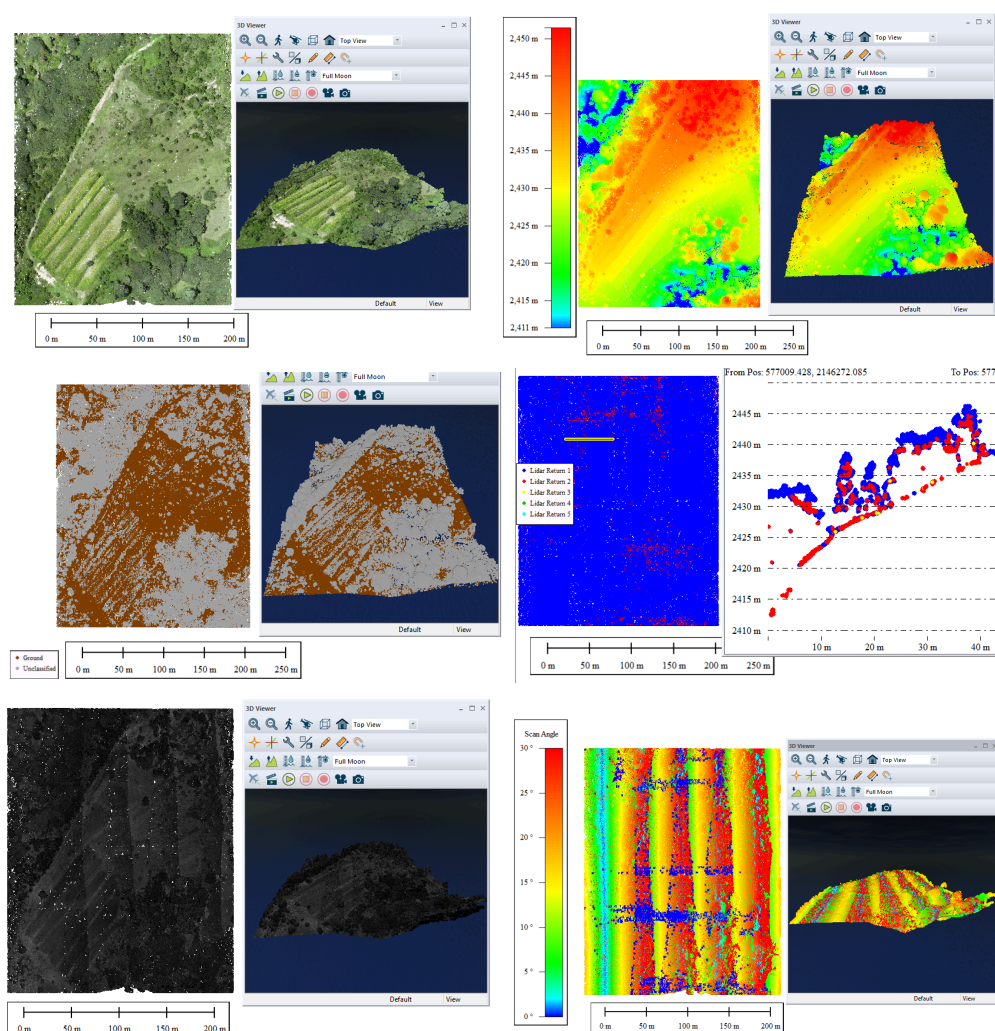
El levantamiento LiDAR permitió obtener una nube de puntos tridimensional del área de estudio a partir de los pulsos láser emitidos por el sensor aerotransportado. El procesamiento de estos datos generó información espacial detallada sobre la superficie del terreno, permitiendo la clasificación de los puntos y la generación de productos cartográficos.

4.2.1. Nube de Puntos Generada

El procesamiento de los datos LiDAR produjo una nube de puntos compuesta por 62,734,923 puntos, el archivo original tuvo un peso de 1.98 GB, mientras que el archivo recortado al área de estudio contiene 35,009,929 puntos con una densidad aproximada de 735.9 pts/m² y un espaciamiento medio de 3.68 cm y en su formato comprimido tiene un peso de 0.304 GB.

Cada punto de la nube almacena en sus atributos sus coordenadas tridimensionales, valores de color RGB, elevación, clase asignada, intensidad del retorno láser, la información del retorno del pulso y su ángulo de escaneo. Estos datos permiten diferentes formas de visualización y análisis de la nube de puntos, así como la identificación de diferentes elementos (ver Figura 40).

Figura 40.
Visualización de atributos de la nube de puntos LiDAR



Nota: Visualizaciones de la nube de puntos LiDAR según distintos atributos, en orden de lectura: color RGB, elevación, clases de puntos, número de retorno, intensidad del retorno y ángulo de escaneo, obtenidas en el software Global Mapper. Elaboración propia.

En la nube de puntos LiDAR no se observan vacíos significativos dentro del área de estudio, en la visualización se aprecia una cobertura continua de puntos, incluso en sectores con vegetación. El color RGB de los puntos proviene de la imagen capturada por la cámara integrada en el sensor Zenmuse L1. En la visualización por elevación se observa una mayor continuidad en las zonas de menor altitud, lo que sugiere una representación más consistente del terreno natural. Asimismo, en la clasificación automática se asignó la clase terreno a puntos distribuidos a lo largo de toda el área de estudio, incluyendo zonas con cobertura vegetal.

Por otra parte, la visualización por número de retornos permite distinguir los diferentes rebotes del pulso láser. En este caso, el software asigna un color específico a cada retorno: azul para el primer retorno, rojo para el segundo y amarillo para el tercer retorno. En el perfil de la nube se observa que los primeros retornos se concentraron en las copas de los árboles, mientras que los retornos posteriores logran penetrar la vegetación y alcanzar el terreno natural.

Continuando, en la visualización por intensidad del retorno vemos valores en escala de grises, mostrando variaciones en la energía reflejada por las diferentes superficies. Finalmente, la visualización por ángulo de escaneo asigna un color a cada punto según el ángulo del láser al momento de la detección, lo que permite identificar claramente las líneas de vuelo generadas durante el levantamiento.

4.2.2. Precisión Geométrica

El reporte de precisión del procesamiento LiDAR (*ver Anexo 5*) indica que el 100 % de las observaciones de posición fueron registradas con solución GNSS RTK fija (RTK Fix), lo que confirma una correcta recepción de las correcciones diferenciales entre la estación base y el dron durante el levantamiento. Asimismo, el reporte muestra errores muy bajos en la trayectoria del sistema GNSS–IMU, del orden de 10^{-4} m en posición y 10^{-5} rad en orientación, lo que indica una solución de navegación estable durante la adquisición de los datos. A diferencia del procesamiento fotogramétrico, la georreferenciación de la nube de puntos LiDAR depende principalmente de la trayectoria calculada mediante el sistema GNSS–IMU, por lo que el software DJI Terra no reporta directamente un error de ajuste basado en Puntos de Control Terrestre.

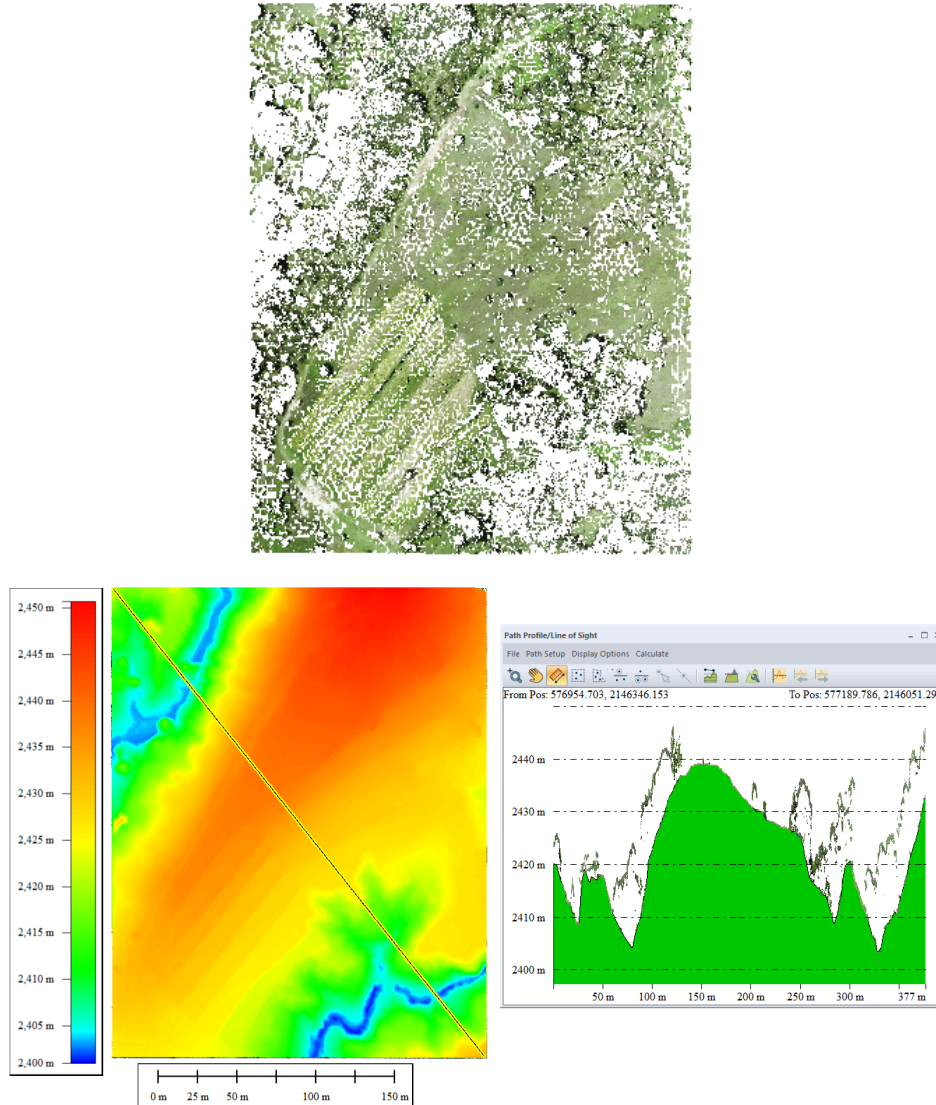
Por esta razón, la precisión del modelo LiDAR fue evaluada posteriormente en Global Mapper mediante la comparación directa entre la elevación de la nube de puntos y las coordenadas de los Puntos de Control Terrestre. Este análisis arrojó un RMSE vertical de 2.7 m, valor que representa la exactitud vertical inicial del producto LiDAR antes de aplicar cualquier procedimiento de alineación.

4.2.3. Clasificación de Terreno

En la clasificación automática de puntos LiDAR se asignaron 16,091,292 a puntos de terreno, que representan el 46% de la nube. Se observa que la distribución de puntos es homogénea en zonas con vegetación poco densa, mientras que en áreas con vegetación densa, se presenta menor continuidad de puntos (*ver Figura 41*).

Figura 41.

Puntos LiDAR asignados a terreno natural, su raster correspondiente y un perfil

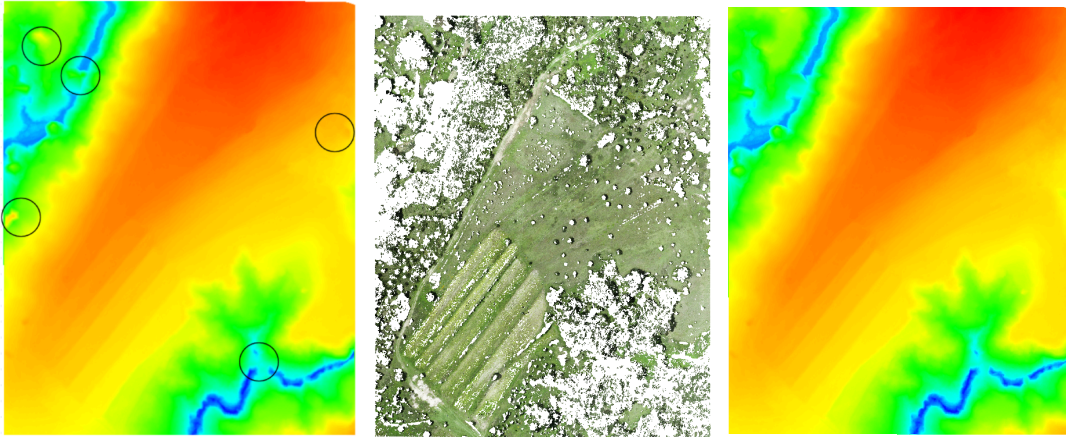


Nota: En la parte superior se muestran los puntos clasificados como terreno y en la parte inferior el modelo continuo generado a partir de dicha clasificación, junto con su perfil. Elaboración propia.

El resultado de la vista de perfil revela que el modelo tiende a tomar los puntos inferiores a las copas, aunque aún resaltan píxeles en el raster que no pertenecen al terreno sino a copas de árboles (*ver Figura 42*), lo que derivó en una reclasificación de los puntos donde los asignados a terreno terminaron siendo 16,089,038 puntos de terreno, que continúa representando el 46% de la nube.

Figura 42.

Zonas conflictivas en el MDT LiDAR y su MDT reclasificado



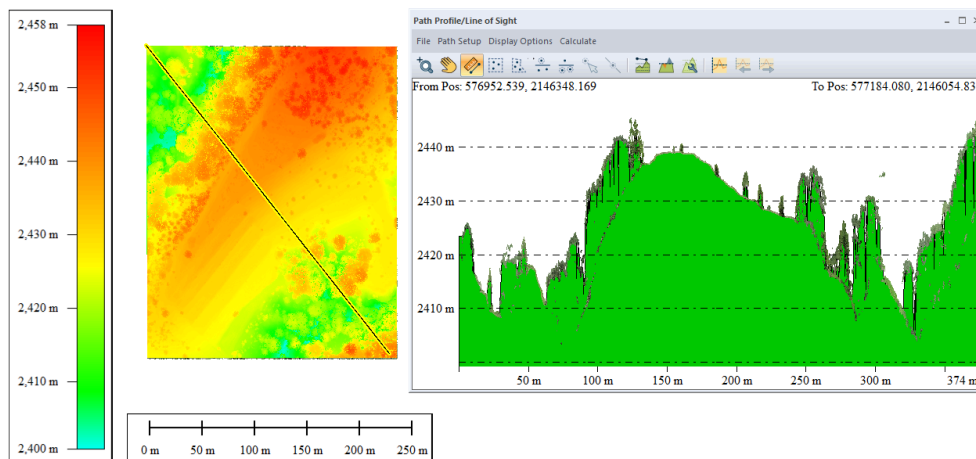
Nota: Identificación de zonas donde la clasificación automática asigna incorrectamente puntos de vegetación como terreno, apoyada en el análisis de perfil. Elaboración propia.

4.2.4. Productos Derivados

El Modelo Digital de Superficie (MDS) debido al espaciado medio de 3.98 cm generó un tamaño de pixel automático de 0.008m y se exportó en 20 cm y en 2 m. En el perfil del raster (*ver Figura 43*) se observa que el modelo sigue a los puntos más altos de la nube, con excepción de puntos asignados a la clase de ruido.

Figura 43

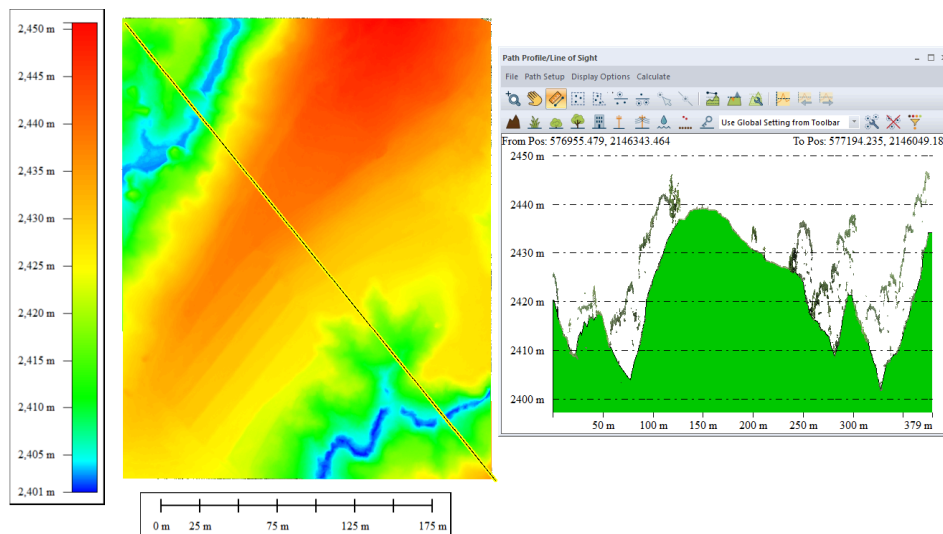
Modelo LiDAR de elevaciones de la superficie



Nota: Modelo digital de superficie generado con LiDAR y su perfil asociado. Elaboración propia.

Debido a que el espaciado medio de los puntos clasificados como terreno fue de 4.6 cm (456.75 pts/m^2) se generó un MDT con tamaño de píxel de de 0.010m. y se exportó en 20 cm y en 2 m, si vemos el perfil del raster (*ver Figura 44*) observamos que el modelo sigue a los puntos que interpretamos como terreno.

Figura 44
Modelo LiDAR de elevaciones del terreno

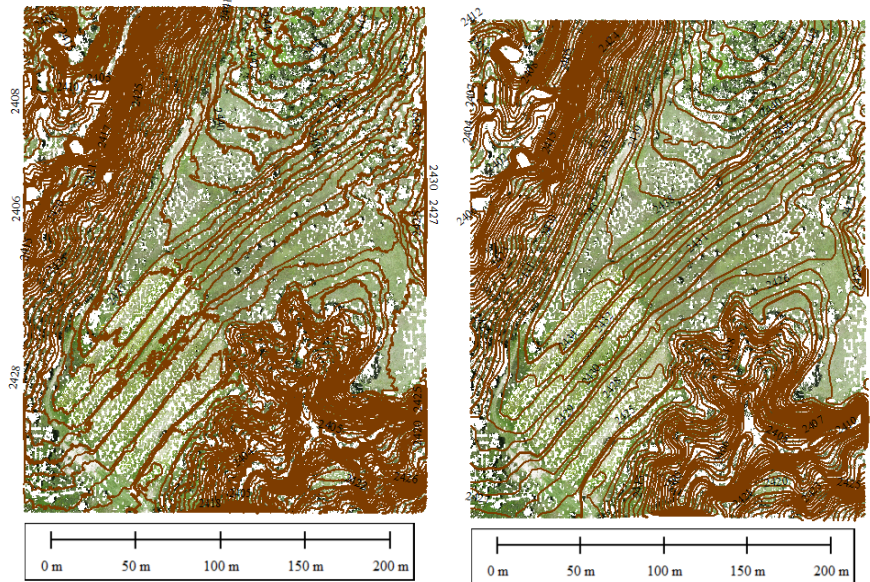


Nota: Modelo digital de terreno generado a partir de puntos clasificados como terreno y perfil asociado. Elaboración propia.

Las curvas de nivel interpolan menos datos y generan líneas más suaves, las nubes creadas a partir del MDT de 0.2 m presentan mayor irregularidad geométrica y las generadas sobre el píxel más grande (2 m) presentan mayor generalización (*ver Figura 45*).

Figura 45

Curvas de Nivel LiDAR en dos tamaños de píxel

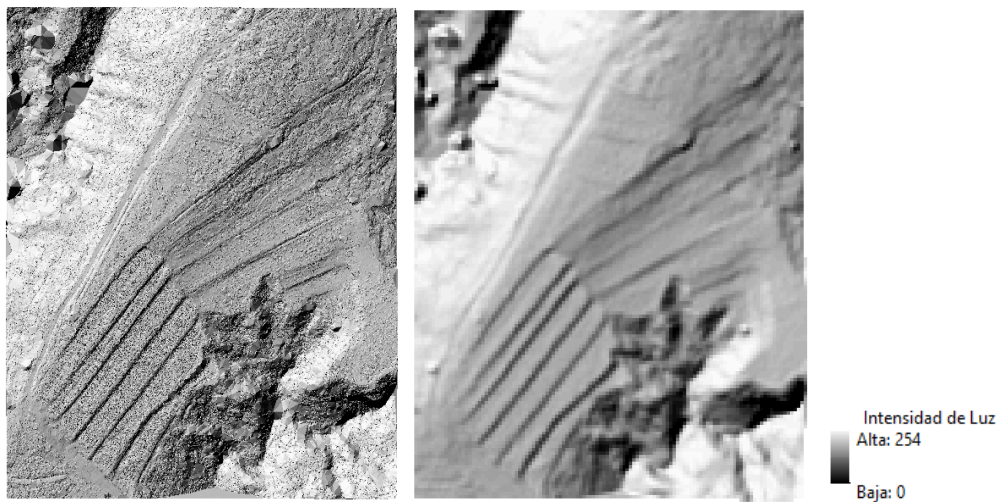


Nota: Curvas de nivel generadas a partir de MDT con resoluciones de 0.2 m y 2 m. Elaboración propia.

El resultado del sombreado de LiDAR resalta las variaciones del relieve, el tamaño de píxel 0.2 m favorece a entender la configuración del terreno (ver Figura 46)

Figura 46

Modelo de sombras en el terreno generados con LiDAR

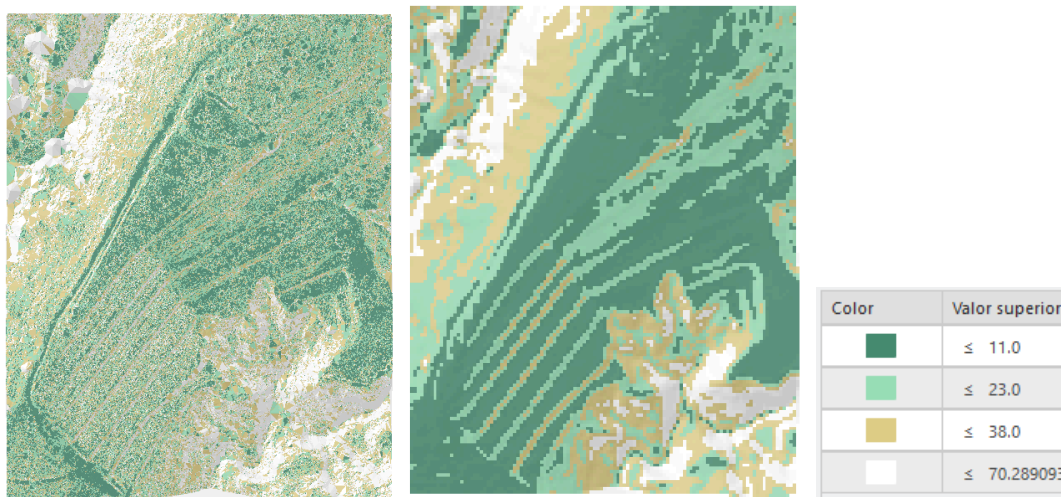


Nota: Modelo de sombreado derivado del MDT con diferentes resoluciones espaciales. A la izquierda el generado a partir del MDT de 0.2 m y a la derecha el generado a partir del MDT de píxel de 2 m. Elaboración propia.

Para las pendientes el raster generado a partir del MDT de 2 m facilita la identificación de zonas planas y zonas con pendientes pronunciadas (ver Figura 47).

Figura 47

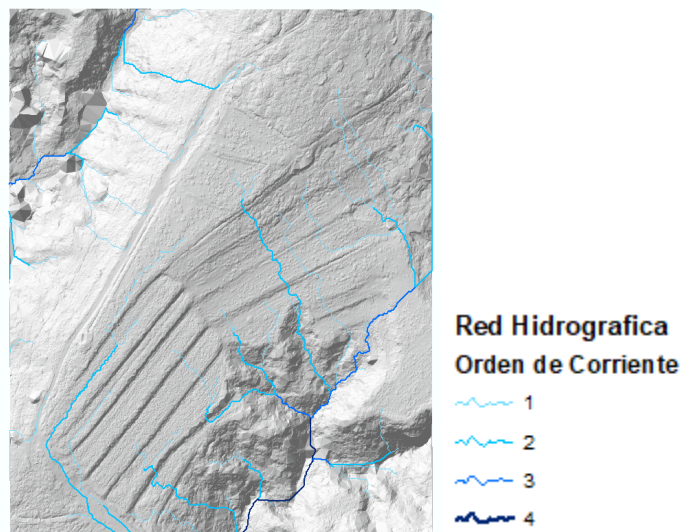
Modelo de pendientes generados con LiDAR



Nota: Modelo de pendientes derivado del MDT con diferentes resoluciones espaciales. A la izquierda el generado a partir del MDT de 0.2 m y a la derecha el generado a partir del MDT de píxel de 2 m. Elaboración propia.

El archivo vectorial de polilíneas que representa la red hidrográfica LiDAR muestra una acumulación de flujo que va desde las zonas más elevadas del terreno a las zonas con menor elevación, llegando a corrientes hasta de orden 4, en la zona noroeste siguen apareciendo dos corrientes independientes y en la zona sureste se ve una salida clara del flujo (ver Figura 48).

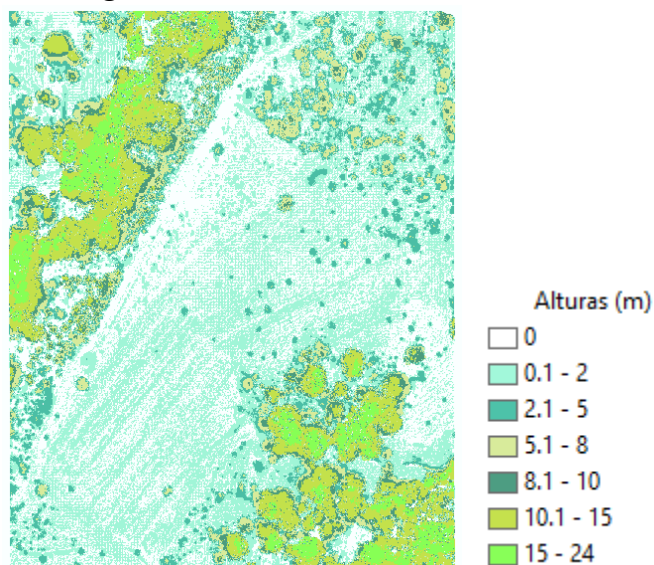
Figura 48
Modelo hidrográfico generado con LiDAR



Nota: Red hidrográfica derivada del MDT y su simbología. Elaboración propia.

El modelo de alturas de dosel identifica con éxito las áreas de cultivo, el hecho de que en toda el área de estudio tiene vegetación es evidente en este modelo LiDAR y las zonas con vegetación más elevada son consistentes a lo visto en campo y en la ortofoto (*ver Figura 49*).

Figura 49
Modelo de alturas de dosel generado con LiDAR



Nota: Modelo de altura de dosel derivado de la diferencia entre MDS y MDT y su simbología. Elaboración propia.

4.3. Análisis Comparativo

A partir de los resultados obtenidos en los levantamientos fotogramétrico y LiDAR, se realiza un análisis comparativo con el objetivo de evaluar el desempeño de ambas técnicas en la generación de información cartográfica del área de estudio. Este análisis se estructura con base en los criterios definidos en el capítulo metodológico, considerando aspectos operativos, precisión geométrica, clasificación de terreno, densidad de la nube de puntos y calidad de los productos derivados, permitiendo establecer las ventajas y limitaciones de cada técnica en función de su aplicación geomática.

4.3.1. Evaluación Operativa

Considerando aspectos como tiempos de adquisición, volumen de datos generados, tiempo de procesamiento, tipo de flujo de trabajo y dependencia con otras condiciones (*ver Tabla 6*).

Tabla 6.
Comparación de la operatividad

Parámetro	Fotogrametría	LiDAR
Tiempo de vuelo	10 min 24 s	8 min 41 s
Peso de la carpeta de datos capturados	8.34 GB	2.17 GB
Tiempo de procesamiento para obtener la nube con clasificación automática de terreno	8 min 4 seg	10 min 13 seg

Flujo de trabajo	Reconstrucción fotogramétrica	Integración directa GNSS + IMU
Dependencia de condiciones externas: Clima, iluminación, vegetación, relieve	Alta	Baja

Nota: La tabla muestra diferentes condiciones operativas y sus valores para cada técnica, fotogrametría y LiDAR Elaboración propia.

Los resultados muestran que la técnica LiDAR presenta mayor eficiencia, al requerir menos traslape el tiempo de vuelo LiDAR fue menor, al igual que el volumen de los datos. La fotogrametría muestra una alta dependencia de las condiciones del entorno, particularmente de la iluminación y la cobertura vegetal, lo que se refleja en la presencia de vacíos en la nube de puntos en zonas densamente vegetadas. Por su parte, la técnica LiDAR presenta menor dependencia de estas condiciones, al no requerir iluminación externa y permitir la penetración parcial de la vegetación.

4.3.2. Comparación de Exactitud Posicional

La comparación de exactitud posicional entre los modelos fotogramétrico y LiDAR se realizó utilizando los Puntos de Control Terrestre medidos en campo, así como mediante el análisis de correspondencia espacial entre ambas nubes de puntos. El modelo fotogramétrico presentó un RMSE vertical de 0.10 m, mientras que el modelo LiDAR presentó un RMSE vertical de 2.7 m. Estos resultados reflejan diferencias en los métodos de georreferenciación utilizados por cada técnica, ya que el modelo fotogramétrico fue ajustado mediante aerotriangulación utilizando PCT, lo que puede hacer el error

ligeramente optimista, mientras que la georreferenciación del modelo LiDAR depende principalmente de la trayectoria calculada a partir del sistema GNSS–IMU.

Con el fin de analizar la correspondencia espacial entre ambos conjuntos de datos, se realizó un proceso de alineación de nubes de puntos en el software Global Mapper utilizando como nube de referencia la nube fotogramétrica, debido a su menor diferencia respecto a los Puntos de Control Terrestre.

El proceso de registro indicó que la nube LiDAR requirió un desplazamiento aproximado de 1.46 m hacia el oeste, 3.89 m hacia el norte y 1.40 m en dirección vertical descendente para lograr la mejor correspondencia geométrica con el modelo fotogramétrico. Tras este ajuste, el RMSE vertical de LiDAR fue de 0.29 m.

La *Tabla 7* presenta una síntesis de los indicadores de exactitud posicional obtenidos para ambos modelos.

Tabla 7.
Comparación de exactitud posicional entre modelos

Métrica	Fotogrametría	LiDAR
Método de georreferenciación	Aerotriangulación con PCT	GNSS–IMU
RMSE vertical (evaluación externa)	0.10 m	2.7 m
Puntos utilizados para evaluación	4 PCT	4 PCT
Desplazamiento detectado entre modelos	—	1.46 m W / 3.89 m N / 1.40 m Z
RMSE vertical (evaluación externa) tras alineación	—	0.29 m

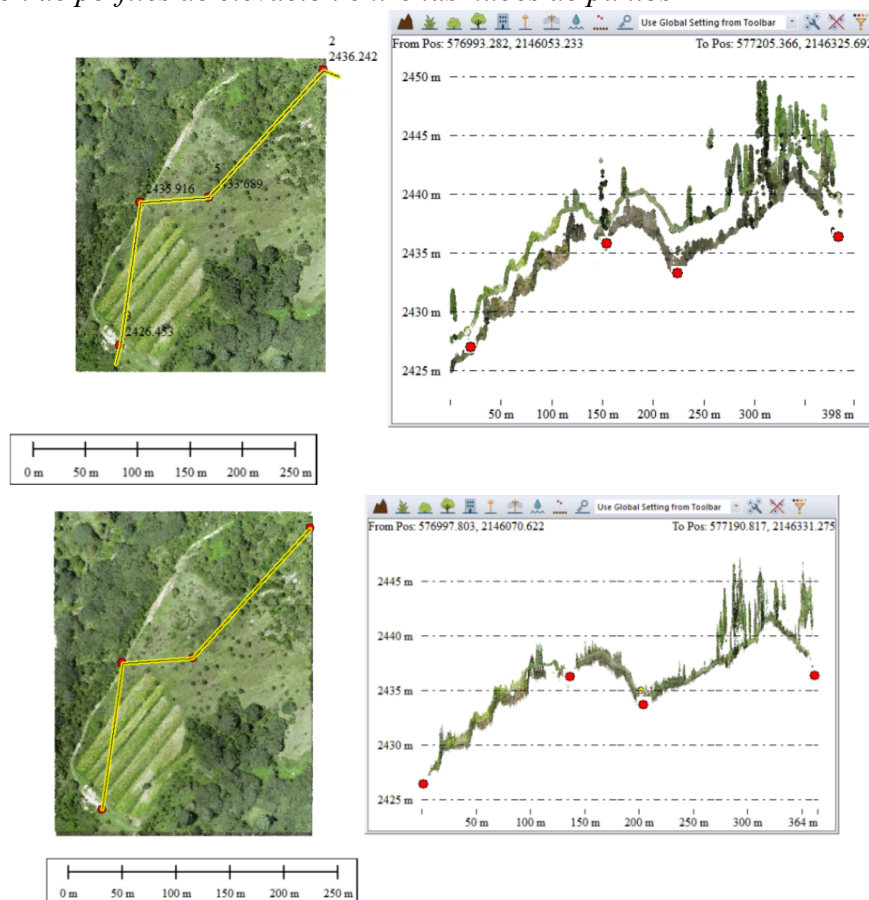
Nota: El RMSE vertical fue calculado mediante la comparación entre la elevación de las nubes de puntos y las coordenadas de los Puntos de Control Terrestre utilizando el software Global Mapper. El desplazamiento reportado corresponde al registro geométrico aplicado

durante el proceso de alineación entre la nube LiDAR y la nube fotogramétrica.
Elaboración propia.

La Figura 50 muestra dos perfiles de elevación obtenidos a partir de ambas nubes de puntos antes y después del proceso de alineación, donde puede observarse el desplazamiento inicial entre los modelos y la mejora en su correspondencia geométrica tras el ajuste.

Figura 50.

Comparación de perfiles de elevación entre las nubes de puntos



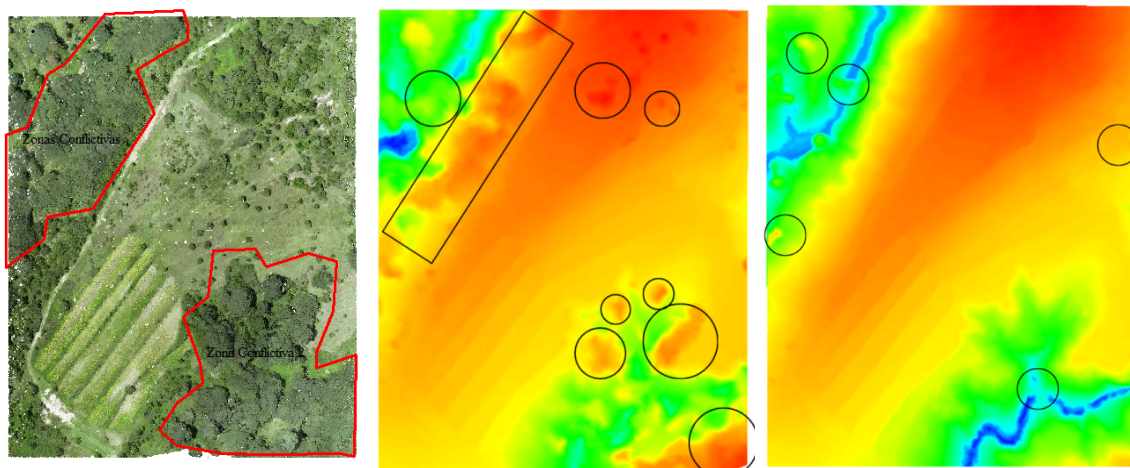
Nota: Perfiles de elevación obtenidos a partir de las nubes de puntos fotogramétrica y LiDAR en Global Mapper. Los puntos rojos corresponden a los Puntos de Control Terrestre y la línea amarilla indica la trayectoria del perfil. La imagen superior muestra el perfil antes del proceso de alineación y la inferior el perfil después del ajuste. Elaboración propia.

4.3.3. Comparación en la Clasificación de Terreno

Se comparan los resultados de la clasificación de terreno en ambas nubes de puntos, considerando las condiciones de entrada, cantidad de puntos clasificados, su distribución espacial y la capacidad de cada técnica para representar el terreno en zonas con diferente cobertura vegetal. Este análisis permite evaluar la efectividad de cada metodología en la generación de Modelos Digitales del Terreno.

En ambos métodos la alta densidad de árboles impide observar el terreno natural, a estas zonas las llamamos zonas conflictivas (*ver Figura 51*).

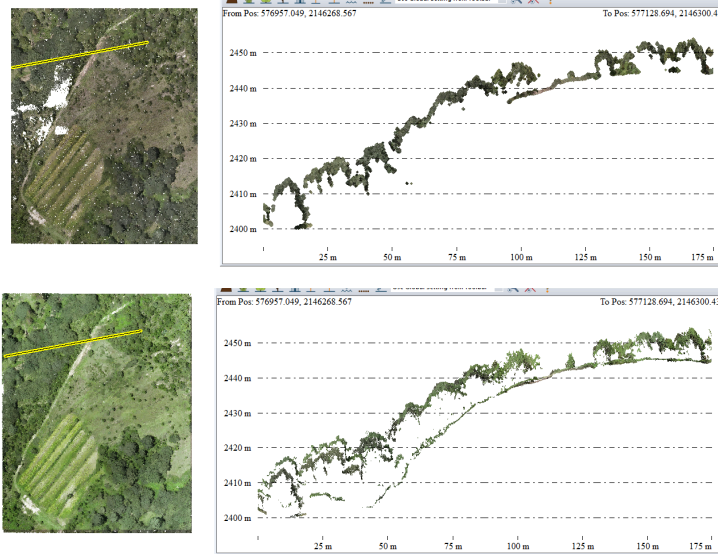
Figura 51.
Zonas Conflictivas



Nota: Los polígonos rojos de la primera imagen delimitan las zonas conflictivas, la segunda imagen muestra como las zonas que tuvieron error de clasificación de terreno en fotogrametría y la tercera imagen las zonas que tuvieron error de clasificación de terreno en LiDAR, ambas coinciden con las zonas de alta densidad de vegetación. Elaboración propia.

Se analiza un perfil que abarca la zona conflictiva norte (*ver Figura 52*).

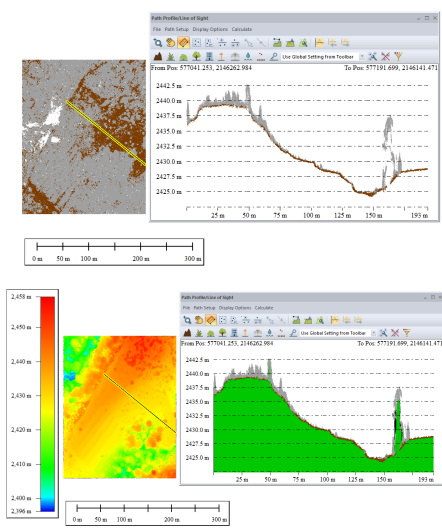
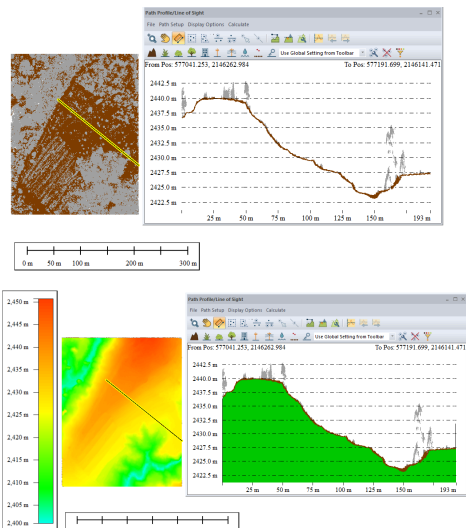
Figura 52.
Perfil de las Zonas Conflictivas

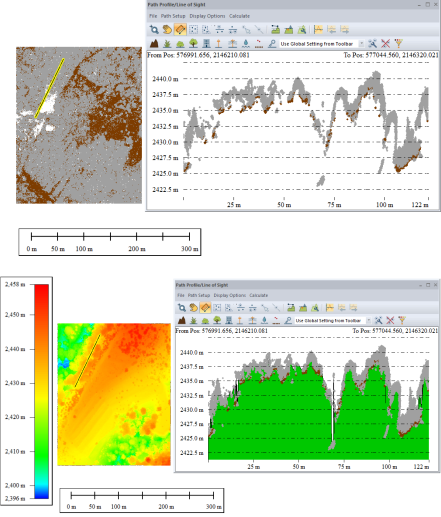
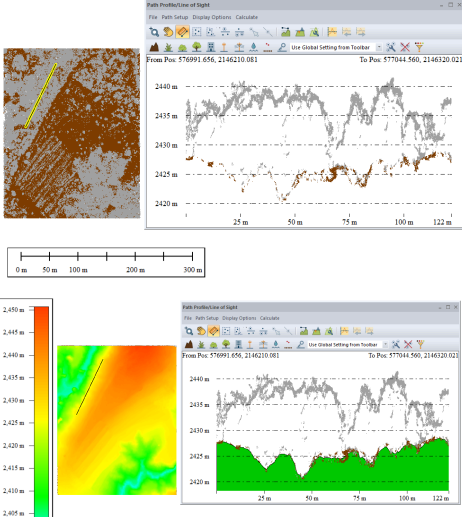
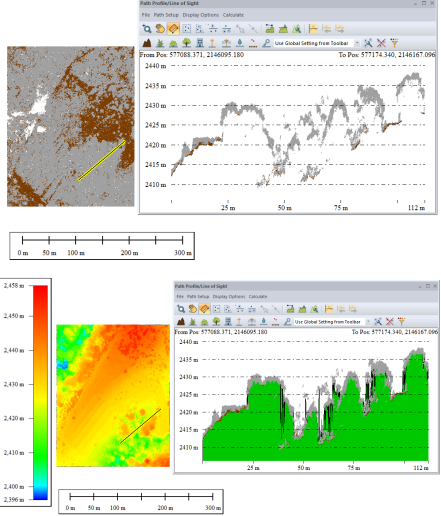
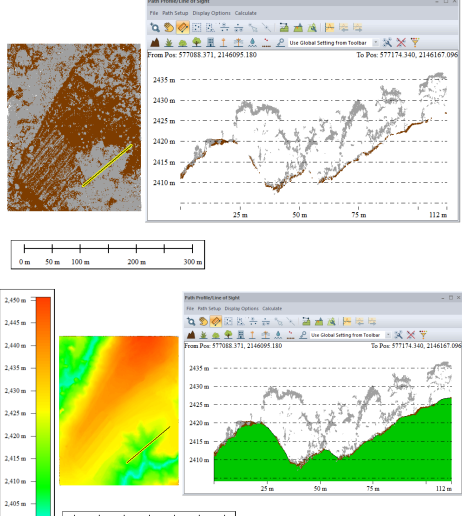
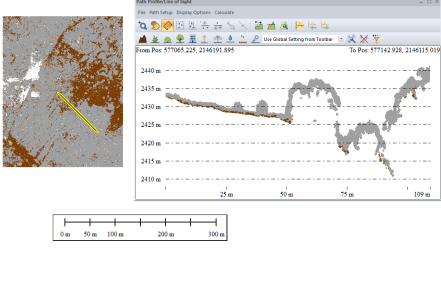
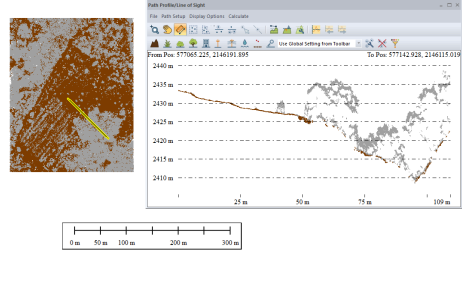


Nota: El perfil de arriba corresponde a la nube fotogramétrica, en la zona de vegetación densa la nube reconstruye solo las copas de los árboles. El perfil de abajo es de la nube LiDAR que permite ver el terreno debajo de los árboles. Elaboración propia.

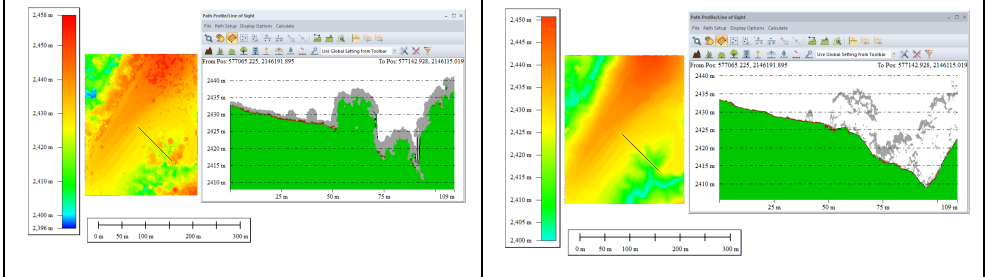
Con el fin de conocer la calidad de la clasificación en diferentes niveles de cobertura vegetal, se presenta la *Tabla 8*.

Tabla 8.
Comparación de nubes de puntos y perfiles

Descripción	Fotogrametría	LiDAR
<p>Zona no conflictiva</p> <p>En las zonas libres de vegetación densa ambas nubes discriminan bien el suelo, en su mayoría el modelo se apega al terreno natural</p>		 <p>Ningún punto de vegetación se ve</p>

	<p>Vemos puntos mal clasificados en el árbol de la derecha que elevan el modelo</p>	<p>que modifique el modelo del terreno</p>
<p>Zona conflictiva noroeste</p> <p>En las zonas de vegetación densa los modelos de terreno resultan ampliamente diferentes. ya que la fotogrametría puso la mayoría de los puntos de "terreno" en vegetación</p>		
<p>Zona conflictiva sureste</p> <p>De nuevo la clasificación de terreno en la nube LiDAR tuvo mayor acierto y congruencia al clasificar el terreno</p>		
<p>Zona no conflictiva y zona conflictiva</p> <p>Vemos que la fotogrametría aunque no tiene problemas en zonas despejadas para discernir lo que es vegetación de lo que es</p>		

terreno, en las zonas de vegetación no logra este discernimiento de manera que se presentan mayor cantidad de errores



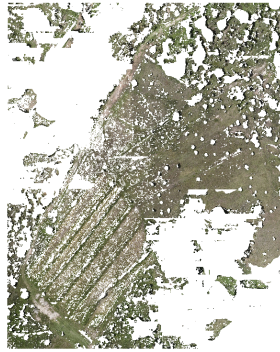
Nota: Cada comparación presenta dos perfiles, el primero es una visualización de únicamente la nube de puntos con los puntos clasificados por clase: color café los puntos clasificados como terreno y gris el resto. El segundo perfil es la nube y el MDT, la visualización del MDT hace más evidentes los puntos que es necesario reclasificar. Elaboración propia.

Para cerrar este capítulo se presenta la *Tabla 9* con el fin de reunir los criterios comparables de ambas técnicas al momento de clasificar el terreno natural. Los criterios se definieron a partir de la observación directa de la nube de puntos, perfiles y productos derivados, evaluando continuidad espacial, comportamiento en zonas con vegetación y ajustes requeridos en la clasificación.

Tabla 9.
Comparación de los resultados de la clasificación de terreno

Criterio	Fotogrametría	LiDAR
Condiciones de entrada	Pendiente suave Diagonal máx. de edificio 2m Ángulo de iteración 6° Distancia de iteración 0.5m	Pendiente suave Diagonal máx. de edificio 2m Ángulo de iteración 6° Distancia de iteración 0.5m
% puntos terreno	13.50 %	46 %

Continuidad del terreno



Media - Baja



Media - Alta

Desempeño en vegetación

Limitado

Robusto

Necesidad de reclasificación

Requiere ajuste significativo

Requiere ajuste moderado

Nota: Las condiciones de entrada se establecieron en el software DJI Terra, la posterior evaluación se realizó en el software Global Mapper. Elaboración propia.

La continuidad del terreno es mayor en la nube LiDAR, donde se observa la presencia de puntos incluso en zonas con vegetación densa, mientras que la fotogrametría presenta discontinuidades asociadas a la ausencia de puntos en dichas áreas. El desempeño en zonas con vegetación es limitado en la fotogrametría, debido a que la reconstrucción estereoscópica solo se realiza en lo visible para la cámara, para los casos de vegetación densa, lo visible son las copas de los árboles, mientras que el LiDAR presenta un labor más robusto al registrar múltiples retornos que permiten representar tanto la vegetación como el terreno subyacente. La fotogrametría requirió un mayor grado de reclasificación debido a errores en la identificación del terreno en zonas con vegetación, mientras que en LiDAR la necesidad de ajuste fue menor, aunque persistieron algunos puntos incorrectamente clasificados.

4.3.4. Comparación de Densidad

Se analiza la densidad de puntos generada por cada técnica y su relación con la continuidad de la información espacial, prestando especial atención a zonas con vegetación. Este criterio permite evaluar la capacidad de cada metodología para representar la estructura del terreno y la cobertura superficial.

Para la cobertura superficial, la *Tabla 10* compara las estadísticas de las nubes de puntos considerando todas las clases de puntos.

Tabla 10.
Comparación de la densidad en la cobertura superficial


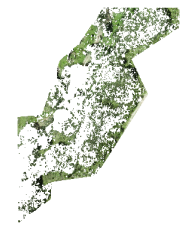
Criterio	Fotogrametría	LiDAR	Relación
Densidad de la nube (pts/m ²)	530	736	LiDAR recolecta 1.39 veces más puntos que la fotogrametría
Espaciamiento medio de la nube (cm)	4.34	3.98	-
Tamaño de píxel base en el MDS (cm)	1.0	0.8	-

Nota: Los datos presentados son los que se leen en los metadatos del producto indicado. Elaboración propia.

En cuanto a la estructura del terreno la *Tabla 11* reúne los datos de densidad de las nubes de puntos considerando solo los puntos asignados a la clase “terreno”, analizando las estadísticas del área de estudio completa y las estadísticas en las zonas conflictivas.

Tabla 11.

Comparación de la densidad en la cobertura de terreno natural

Criterio	Fotogrametría	LiDAR	Relación
Densidad de la nube (pts/m ²)	116	454	LiDAR recolecta 3.9 veces más puntos de terreno que la fotogrametría
Espaciamiento medio de la nube (cm)	9.3	4.6	-
Tamaño de píxel base en el MDT (cm)	1.7	1.0	-
Densidad de la zona conflictiva norte (pts/m ²)	 20	 310	LiDAR recolecta 15.5 veces más puntos en zona con vegetación densa

Densidad de la zona conflictiva sur (pts/m²)



83



240

LiDAR recolecta 2.9 veces más puntos en esta zona

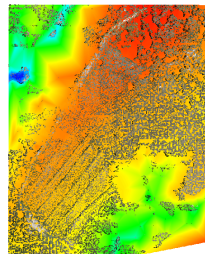
Vacíos en vegetación

Alto

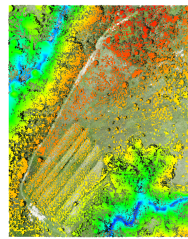
Medio

-

Grado de interpolación



Alto



Medio

-

Nota: Los datos presentados son los que se leen en los metadatos del producto indicado. Elaboración propia.

En términos de densidad de puntos, el levantamiento LiDAR presenta valores superiores en todos los escenarios analizados. A nivel de cobertura superficial, la densidad LiDAR es aproximadamente 1.4 veces mayor que la fotogramétrica. Sin embargo, esta diferencia se incrementa al analizar únicamente los puntos clasificados como terreno, donde LiDAR registra hasta 3.9 veces más puntos.

Es importante destacar que la diferencia en densidad entre ambas técnicas no es constante, sino que aumenta en función de las condiciones del terreno. Este comportamiento es evidente en zonas con cobertura vegetal, donde la fotogrametría presenta una disminución considerable en la cantidad de puntos. En la zona conflictiva

norte, la densidad LiDAR es aproximadamente 15.5 veces mayor que la fotogramétrica, mientras que en la zona sur la diferencia es de 2.9 veces. Estos resultados evidencian que la capacidad del LiDAR para penetrar la vegetación permite una representación mucho más densa y continua del terreno en condiciones complejas.

Finalmente, el análisis del espaciamiento medio de la nube de puntos y su relación con el tamaño de píxel base refuerza estas diferencias. Mientras que en la cobertura superficial ambas técnicas presentan valores similares, en el caso del terreno la fotogrametría muestra un incremento significativo en el espaciamiento entre puntos, alcanzando valores aproximadamente dos veces mayores que los del LiDAR. Esta diferencia se traduce en tamaños de píxel base más grandes y en una mayor dependencia de interpolación en los modelos derivados. En contraste, el LiDAR mantiene una mayor consistencia en la distribución de puntos, permitiendo generar modelos con mayor resolución y coherencia geométrica.

Por lo tanto, la densidad de la nube de puntos y su distribución espacial se posicionan como factores determinantes en la calidad de los productos cartográficos, evidenciando una ventaja significativa del LiDAR en la representación del terreno, particularmente en contextos con cobertura vegetal.

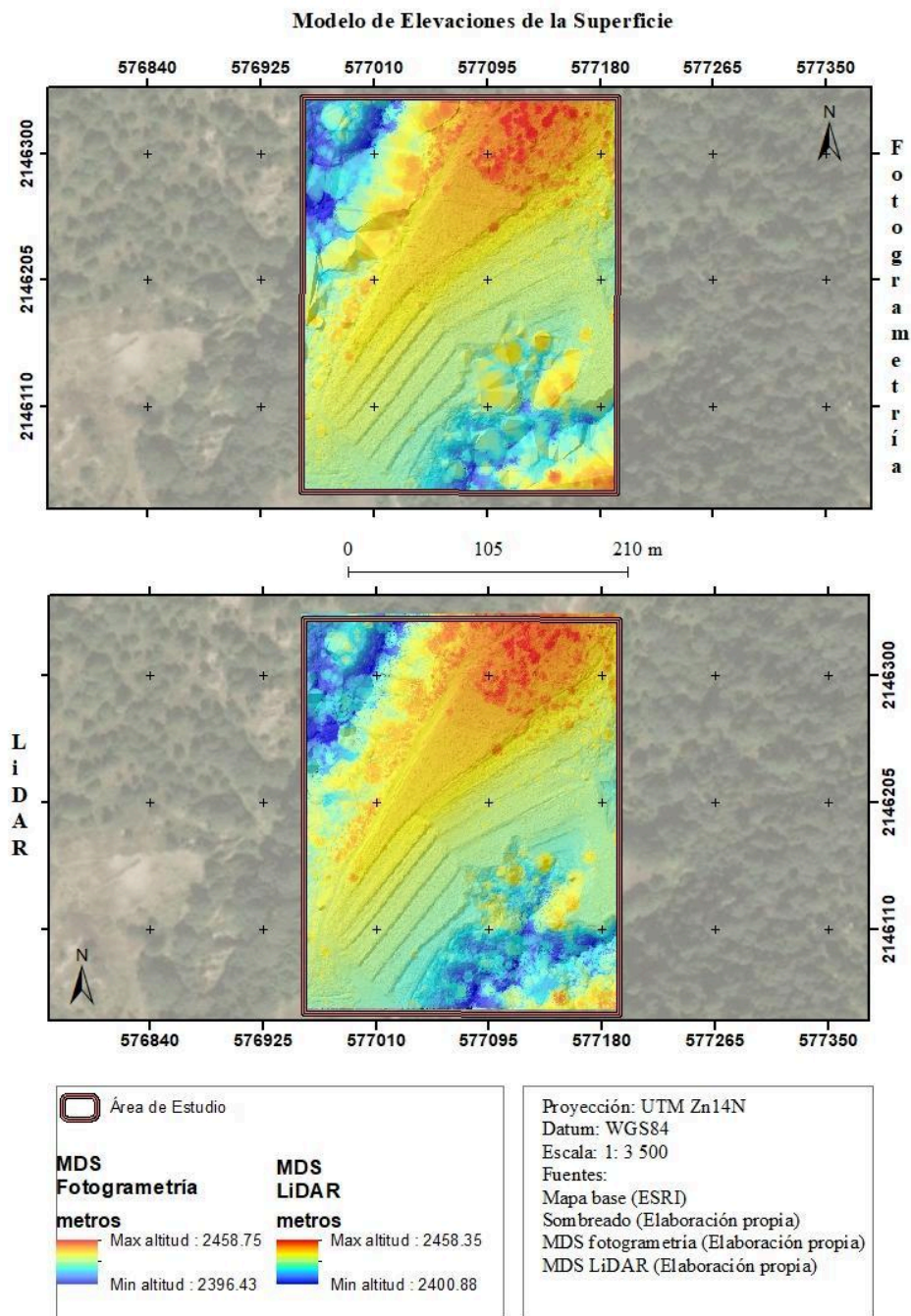
4.3.5. Comparación de Productos Derivados

Se comparan los productos cartográficos, se evalúan las diferencias en la representación del terreno, el nivel de detalle y la coherencia geométrica de los productos. Para esta comparación se seleccionaron las resoluciones que permiten una mejor interpretación de cada variable. En el caso del sombreado se utilizó una resolución de 0.2 m

para preservar el detalle del relieve, mientras que para pendientes y curvas de nivel se empleó una resolución de 2 m, debido a que la generalización facilita la lectura del mapa.

El MDS generado a partir de ambas técnicas presenta una distribución espacial similar en términos generales; sin embargo, se identifican diferencias en los valores extremos. La altura máxima entre modelos presenta una diferencia de 0.45 m, siendo mayor en fotogrametría, mientras que en las elevaciones mínimas la diferencia alcanza hasta 4.45 m, siendo mayores en el modelo LiDAR, es decir, la representación de alturas mínimas genera más discrepancias entre las técnicas, esto puede ser debido a se las áreas más alejadas del sensor. Como se observa en la *Figura 53*, las mayores discrepancias se concentran en zonas con alta densidad de vegetación, donde la fotogrametría puede presentar limitaciones para reconstruir adecuadamente la superficie de los árboles y LiDAR presenta una ventaja operativa con el retorno múltiple.

Figura 53.
Mapa del Modelo Digital de Superficie con Sombreado

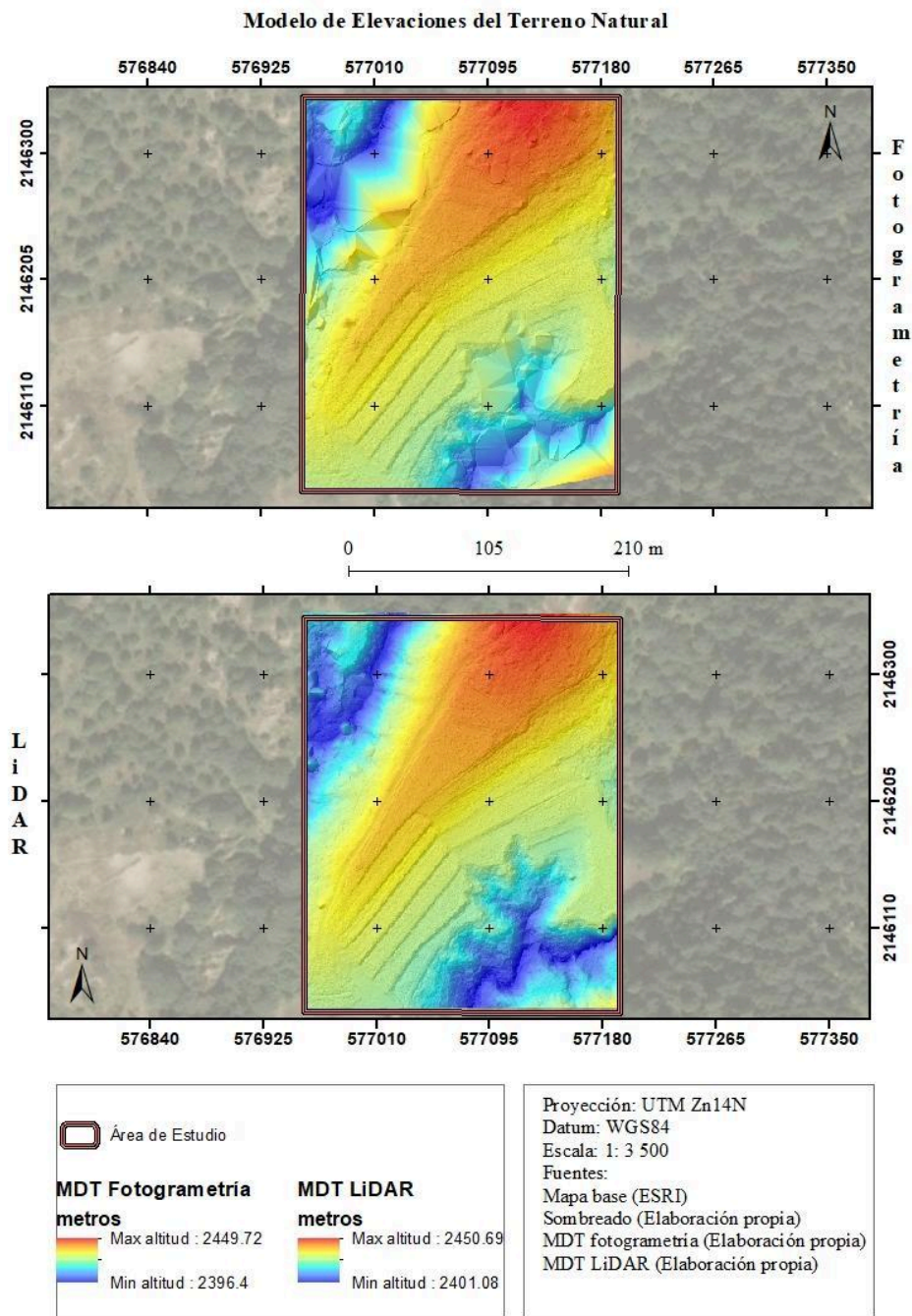


Nota: Modelos Digitales de Superficie (MDS) generados mediante fotogrametría (superior) y LiDAR (inferior), visualizados con sombreado y escala de elevación. Los tonos cálidos representan mayores altitudes y los fríos menores elevaciones. El recuadro delimita el área de análisis. Esta visualización permite comparar la continuidad y variabilidad de la superficie representada por cada técnica. Elaboración propia.

Las diferencias entre técnicas se acentúan en el MDT, donde el modelo LiDAR presenta una representación más continua y consistente del terreno. En este modelo las elevaciones mínimas y máximas son mayores en LiDAR, en elevaciones máximas los modelos difieren 0.97 m, mientras, mientras que las mínimas 4.44 m y como se muestra en la *Figura 54*, una vez más las elevaciones mínimas se localizan principalmente en zonas con cobertura vegetal, donde la fotogrametría depende de procesos de interpolación para estimar el terreno, mientras que el LiDAR logra capturar puntos del suelo. Esto se traduce en una mejor definición del relieve en el modelo LiDAR, particularmente en áreas con vegetación densa. Otra manera de representar las elevaciones del terreno es con las curvas de nivel, la *Figura 55* muestra un MDT clasificado y por encima las curvas, aquí vemos que las derivadas de LiDAR presentan trazos más suaves y consistentes, mientras que las de fotogrametría tienden a mostrar mayor irregularidad en zonas con menor densidad de puntos. Esta diferencia está directamente relacionada con la calidad del MDT base, ya que en nuestro estudio las curvas son una representación derivada de este modelo.

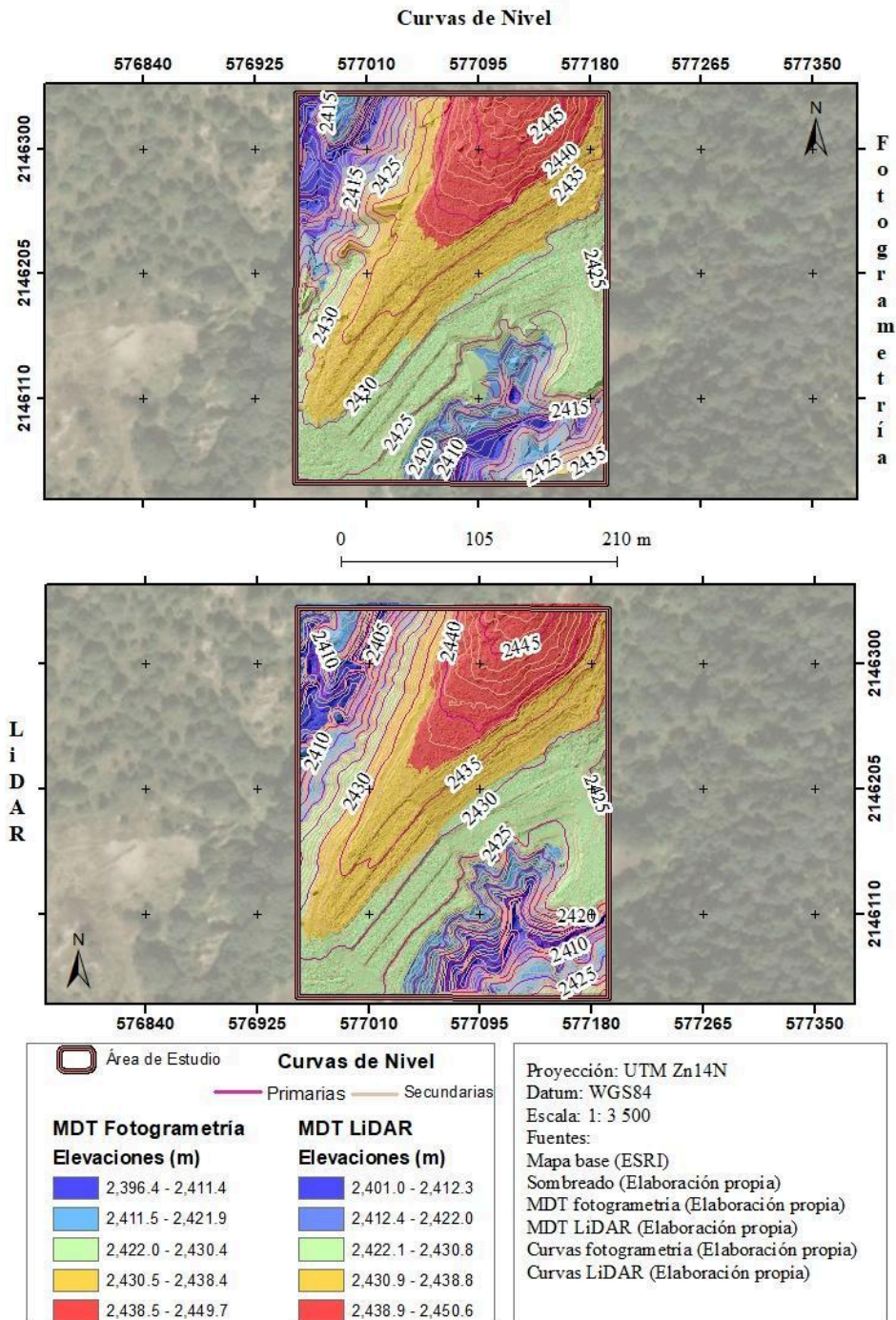
En cuanto al cálculo de pendientes la utilización de una resolución de 2 m permite reducir el ruido en ambos modelos y facilita la interpretación orográfica. A partir de la simbología empleada (*ver Figura 56*), se observa que el modelo LiDAR alcanza valores de pendiente de hasta 73.57° , mientras que la fotogrametría presenta un rango menor. Esta diferencia puede explicarse por la mayor capacidad del LiDAR para representar cambios abruptos del terreno, en contraste con la fotogrametría que depende de la interpolación en áreas con baja densidad de puntos de terreno, lo que tiende a suavizar las pendientes y limitar la representación de valores extremos.

Figura 54.
Mapa del Modelo Digital de Terreno con Sombreado



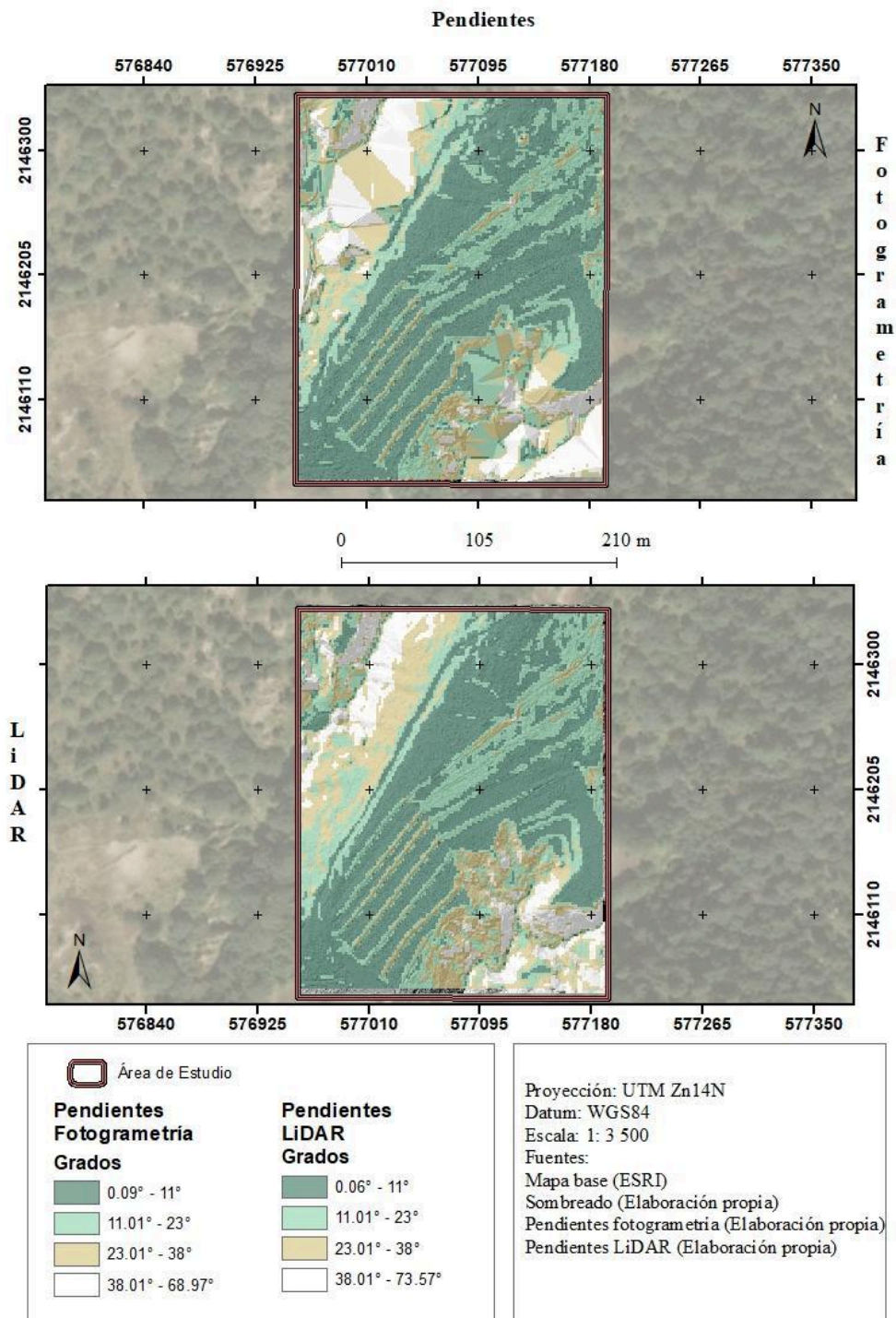
Nota: Modelos Digitales de Terreno (MDT) generados a partir de fotogrametría (superior) y LiDAR (inferior), representados mediante sombreado y escala de elevación. Los tonos cálidos indican mayores altitudes y los tonos fríos menores elevaciones. El recuadro delimita el área de estudio. Esta visualización permite comparar la continuidad del terreno natural entre ambas técnicas. Elaboración propia.

Figura 55.
Mapa de Altimetría con sombras y curvas de nivel



Nota: Representación altimétrica mediante curvas de nivel derivadas de los MDT fotogramétrico (superior) y LiDAR (inferior), con apoyo de sombreado. Las curvas primarias y secundarias permiten identificar la variación del relieve y la continuidad de las formas del terreno. El recuadro delimita el área de estudio. Elaboración propia.

Figura 56.
Mapa de Pendientes con sombras

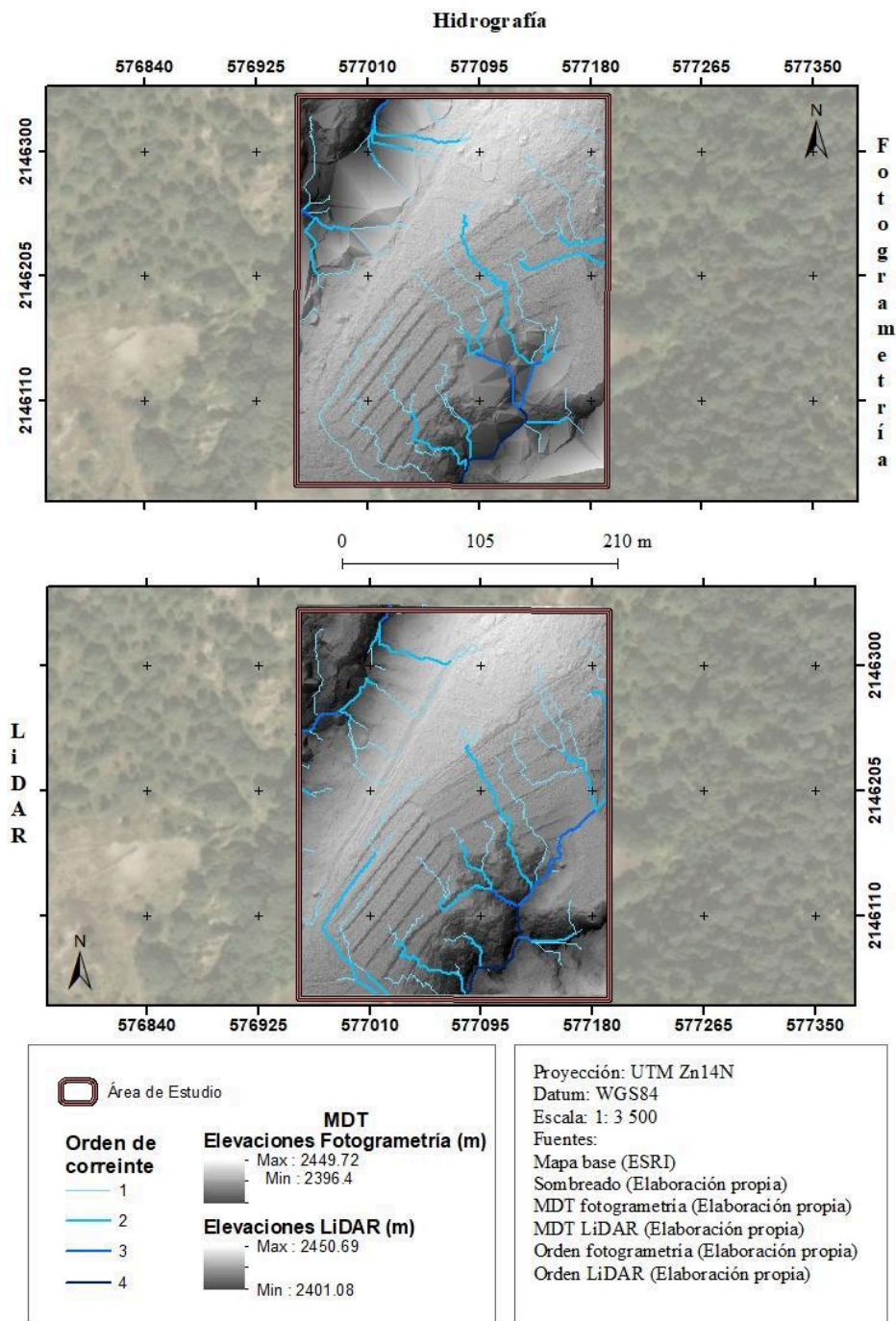


Nota: Mapas de pendientes generados a partir de los MDT fotogramétrico (superior) y LiDAR (inferior), clasificados en rangos de grados. La simbología permite identificar la distribución espacial de las inclinaciones del terreno, donde los valores más altos en blanco representan zonas de mayor pendiente. Elaboración propia.

Los resultados de la red hidrográfica en ambas técnicas representan patrones de escurrimiento similares, en ambos modelos se observa una representación consistente de la dirección general del flujo, desde las zonas de mayor elevación hacia las de menor altitud, con una jerarquización de corrientes que alcanza hasta el orden 4. Asimismo ambas técnicas presentan una interrupción en la red en la zona noroeste, lo que sugiere posibles inconsistencias en el modelo de terreno en dicha área (*ver Figura 57*). Que ambas técnicas alcancen una resolución de drenaje comparable indica que, en condiciones generales del área de estudio, la fotogrametría es capaz de representar adecuadamente la red hidrográfica, aunque LiDAR tiende a mejorar su continuidad y definición en zonas más complejas.

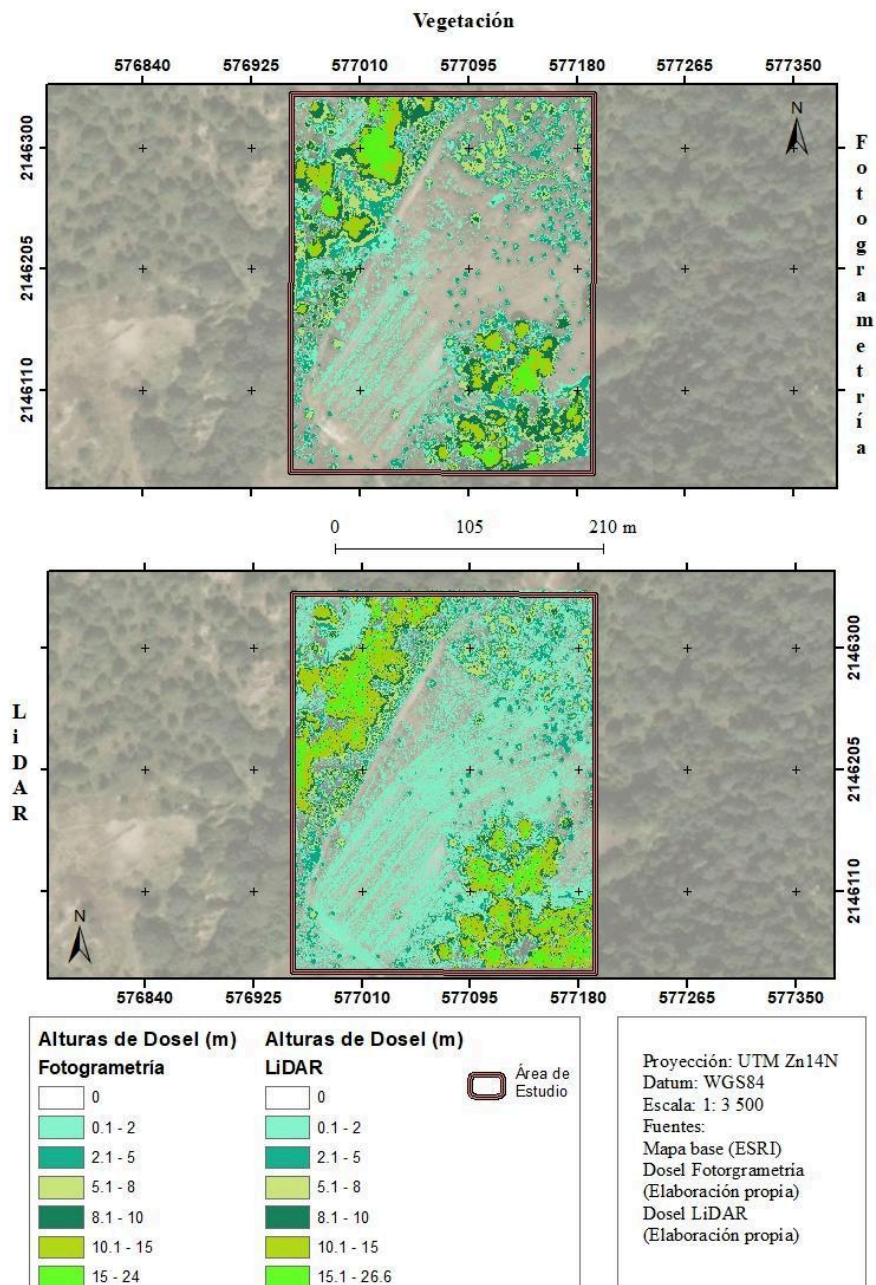
Por último los modelos de altura de dosel presentan similitudes en la localización de las zonas con mayor y menor cobertura vegetal; no obstante, el LiDAR muestra una mejor diferenciación entre el terreno y la vegetación baja. Como se observa en la *Figura 58*, el LiDAR presenta menor presencia de vacíos. La diferencia entre modelos del dosel más alto es de aproximadamente 2.6 m, lo cual es consistente con las diferencias acumuladas en los modelos de superficie y terreno utilizados para su cálculo.

Figura 57.
Mapa de Hidrografía con elevaciones



Nota: Red hidrográfica derivada de los MDT fotogramétrico (superior) y LiDAR (inferior), sobrepuesta al MDT. Las líneas representan el orden de corriente, permitiendo identificar la estructura de drenaje y su continuidad espacial. Elaboración propia.

Figura 58.
Mapa de Vegetación



Nota: Modelo de altura de dosel generado a partir de fotogrametría (superior) y LiDAR (inferior), clasificado en rangos de altura. La simbología permite identificar la distribución y densidad de la vegetación en el área de estudio. Elaboración propia.

En conjunto, los productos derivados reflejan directamente las diferencias en la densidad, distribución y clasificación de las nubes de puntos. El LiDAR presenta una representación más continua y consistente del terreno y la vegetación, especialmente en zonas con cobertura vegetal, mientras que la fotogrametría muestra limitaciones asociadas a la ausencia de puntos en niveles inferiores y a la dependencia de interpolación.

Adicionalmente, se observa que el tamaño de píxel influye directamente en la representación de los productos derivados. Las resoluciones más finas preservan un mayor nivel de detalle, pero pueden amplificar el ruido asociado a la variabilidad de la nube de puntos, mientras que las resoluciones más gruesas generan superficies más generalizadas, facilitando la interpretación del terreno.

Por lo tanto, la calidad y confiabilidad de los productos derivados dependen no solo de la técnica empleada, sino también de la densidad de la nube de puntos y de las decisiones de procesamiento, evidenciando que el LiDAR ofrece ventajas significativas en la representación del terreno en condiciones complejas, particularmente en presencia de vegetación.

4.3.6. Comparación Sintética de Técnicas

A partir del análisis comparativo realizado en los apartados anteriores, se presenta una síntesis de las principales diferencias entre las metodologías fotogramétrica y LiDAR, considerando los criterios más relevantes para la generación de información cartográfica del área de estudio (*ver Tabla 12*).

Tabla 12.
Comparación sintética entre fotogramétrica y LiDAR

Criterio	Fotogrametría	LiDAR
Precisión absoluta	Alta (con PCT)	Dependiente de georreferenciación
Precisión relativa	Alta	Alta
Desempeño en vegetación	Bajo a medio	Alto
Continuidad del terreno	Variable	Alta
Densidad de puntos de terreno	Baja a media	Alta
Tiempo de procesamiento	Alto	Bajo
Volumen de datos	Alto	Medio
Clasificación automática	Limitada	Más eficiente
Requerimiento de control terrestre	Alto	Medio
Costo de implementación	Medio	Alto

Nota: La comparación se elaboró a partir de los resultados obtenidos en el análisis de precisión geométrica, clasificación de terreno, densidad de la nube de puntos, evaluación operativa y productos derivados. Los valores cualitativos (alto, medio, bajo) representan una síntesis interpretativa basada en el desempeño observado de cada técnica. Elaboración propia.

Los resultados evidencian que ninguna técnica es superior en todos los escenarios; su desempeño depende de las condiciones del entorno y de los requerimientos del proyecto. Mientras que la fotogrametría destaca en precisión absoluta cuando se emplean puntos de control terrestre, el LiDAR presenta ventajas en la representación del terreno, especialmente en zonas con vegetación, así como en la eficiencia del procesamiento y la clasificación automática. Por lo tanto, la selección de la técnica más adecuada debe basarse en un equilibrio entre precisión requerida, condiciones del área de estudio y recursos disponibles.

4.4. Criterios Para la Selección de Metodologías Geomáticas

A partir de los resultados obtenidos y del análisis comparativo entre fotogrametría y LiDAR, se identificaron los factores técnicos, ambientales y operativos que influyen en la calidad de los productos cartográficos derivados. Este subcapítulo tiene como objetivo proponer criterios que orienten la selección de la metodología más adecuada en función de las condiciones del proyecto geomático.

A diferencia del análisis presentado en el subcapítulo anterior, donde se comparan los resultados obtenidos, en este apartado se integran dichas observaciones en un enfoque aplicado, orientado a la toma de decisiones.

La selección entre técnicas no depende únicamente de la precisión alcanzada, sino de la relación entre el objetivo del proyecto, las características del entorno y los recursos disponibles.

4.4.1. Factores Técnicos

La selección de la metodología comienza con la definición de los requerimientos técnicos del proyecto, particularmente en términos de precisión, control terrestre, sistema de referencia y resolución espacial.

La precisión posicional requerida es uno de los criterios fundamentales, esta primera decisión condiciona el tipo de datos que vamos a adquirir y requiere decidir entre un levantamiento local o global (Ferreccio, 2006). Aquí es donde los PCT resaltan como una herramienta indispensable, su uso y validación se reconoce como un elemento fundamental ya que la calidad geométrica de los productos está sujeta a su correcta distribución, visibilidad y verificación, además, permiten detectar errores en etapas tempranas y mejorar la confiabilidad de los resultados (INEGI, 2015). Como se observó en el análisis comparativo, la fotogrametría, al estar ajustada mediante PCT, puede alcanzar mayor exactitud cuando el control es adecuado. Por su parte, el LiDAR presenta alta consistencia interna, pero puede verse afectado por desplazamientos globales si la georreferenciación inicial no es correcta (Ávila, 2018).

El sistema de referencia también influye directamente en la compatibilidad de los productos. El uso de sistemas como WGS84 facilita la interoperabilidad entre herramientas, pero puede generar inconsistencias si no se mantiene un control adecuado del datum a lo largo del flujo de trabajo (Moya-Zamora, et al., 2017).

4.4.2. Factores del Entorno

Las características del entorno condicionan directamente el desempeño de las técnicas de adquisición de datos.

La presencia de vegetación es uno de los factores más relevantes. En zonas con cobertura vegetal densa, la fotogrametría presenta limitaciones debido a la imposibilidad de observar el terreno bajo la vegetación, lo que genera vacíos y dependencia de interpolación. En contraste, el LiDAR permite la penetración parcial del dosel, obteniendo múltiples retornos que mejoran la representación del terreno (Salamanca & Pérez, 2008).

El relieve y la complejidad topográfica también influyen en la calidad de los resultados. Terrenos con cambios abruptos pueden ser representados por ambas técnicas; sin embargo, la continuidad del modelo depende de la densidad y distribución de puntos (Oriondo & Jurado, 2023).

La accesibilidad del área es otro factor importante. El uso de RPAS permite levantar información en zonas de difícil acceso, reduciendo riesgos y tiempos de trabajo en campo, lo cual beneficia a ambas metodologías (Jiménez, et al., 2019).

En cuanto a la resolución de los datos es necesario tener claro la extensión del área a representar, ya que en áreas más chicas se pueden manejar mejor los detalles que en áreas grandes y tener presente el producto cartográfico que se pretende generar.

4.4.3. Factores Operativos

Además de los aspectos técnicos, la selección de la metodología está condicionada a cómo se implementa la técnica en la práctica, es decir, a factores operativos relacionados con el tiempo, los recursos y el procesamiento de la información.

En términos de adquisición y procesamiento, el LiDAR demostró mayor eficiencia, con tiempos de procesamiento significativamente menores y una menor generación de datos en comparación con la fotogrametría. Esto lo convierte en una opción favorable en proyectos donde el tiempo es un factor crítico. Por otro lado, la fotogrametría requiere mayores tiempos de procesamiento debido a la reconstrucción de la nube de puntos a partir de imágenes, lo que implica mayores demandas computacionales y de almacenamiento (Quirós, 2014).

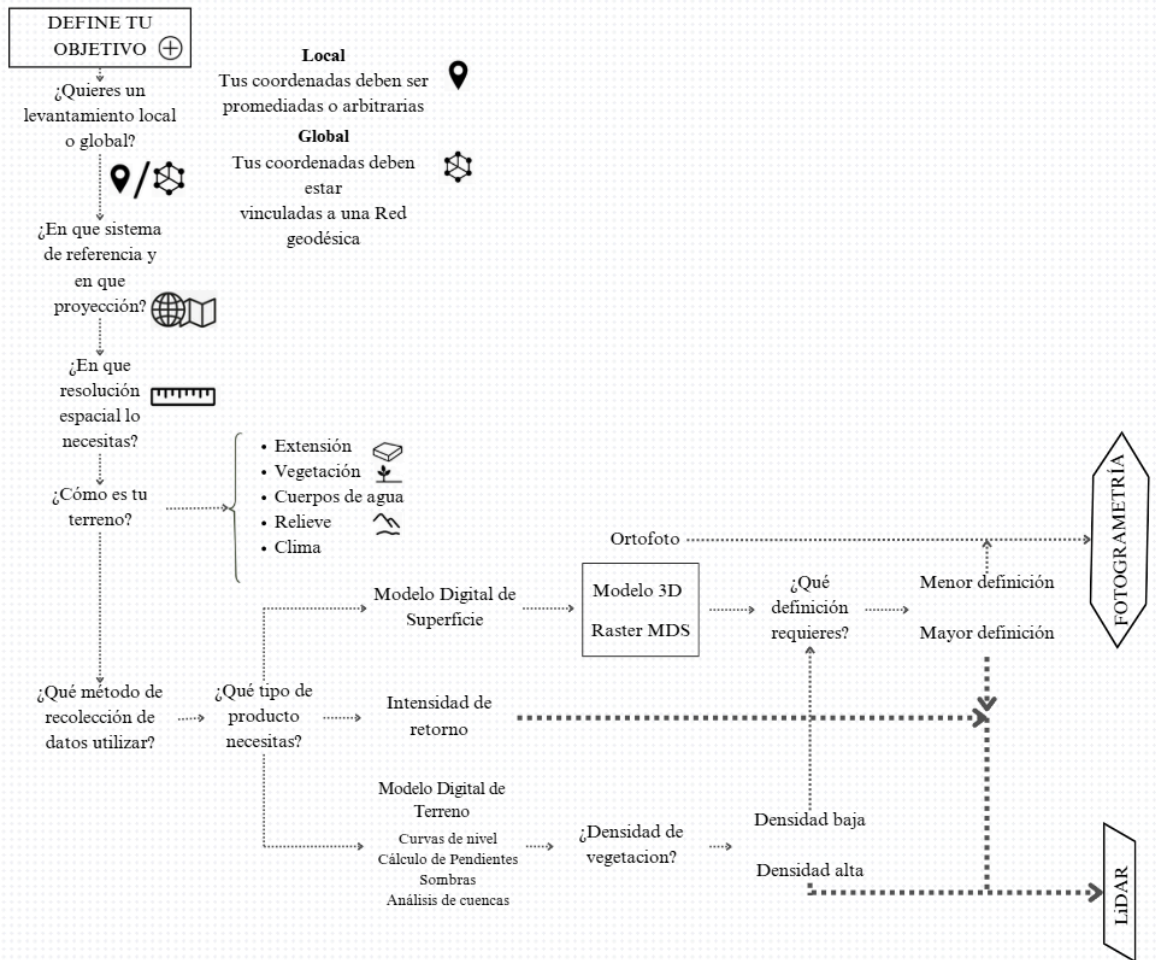
El uso de software especializado y la experiencia del usuario también influyen en los resultados. Procesos como la clasificación de la nube de puntos requieren supervisión, especialmente en zonas con vegetación, independientemente de la técnica empleada. El contar o no con licencias de softwares privados o el alcance a algoritmos libres eficientes para la limpieza de las nubes, generación de modelos y salidas cartográficas es un factor que interfiere en la decisión de la técnica a implementar (Jiménez et al. 2019).

4.4.4. Propuesta de Flujo de Decisión

Con base en los resultados obtenidos, se propone un flujo de decisión que permite seleccionar la técnica más adecuada en función de las características del proyecto.

El proceso inicia con la definición del objetivo del levantamiento, seguido de la evaluación de factores clave como la presencia de vegetación, la precisión requerida y el tipo de producto a generar. A partir de estas variables, se orienta la selección entre fotogrametría y LiDAR. La *Figura 59* presenta el diagrama de flujo propuesto, el cual integra los principales criterios identificados en esta investigación y permite estructurar la toma de decisiones de manera sistemática.

Figura 59.
Delimitación de objetivo



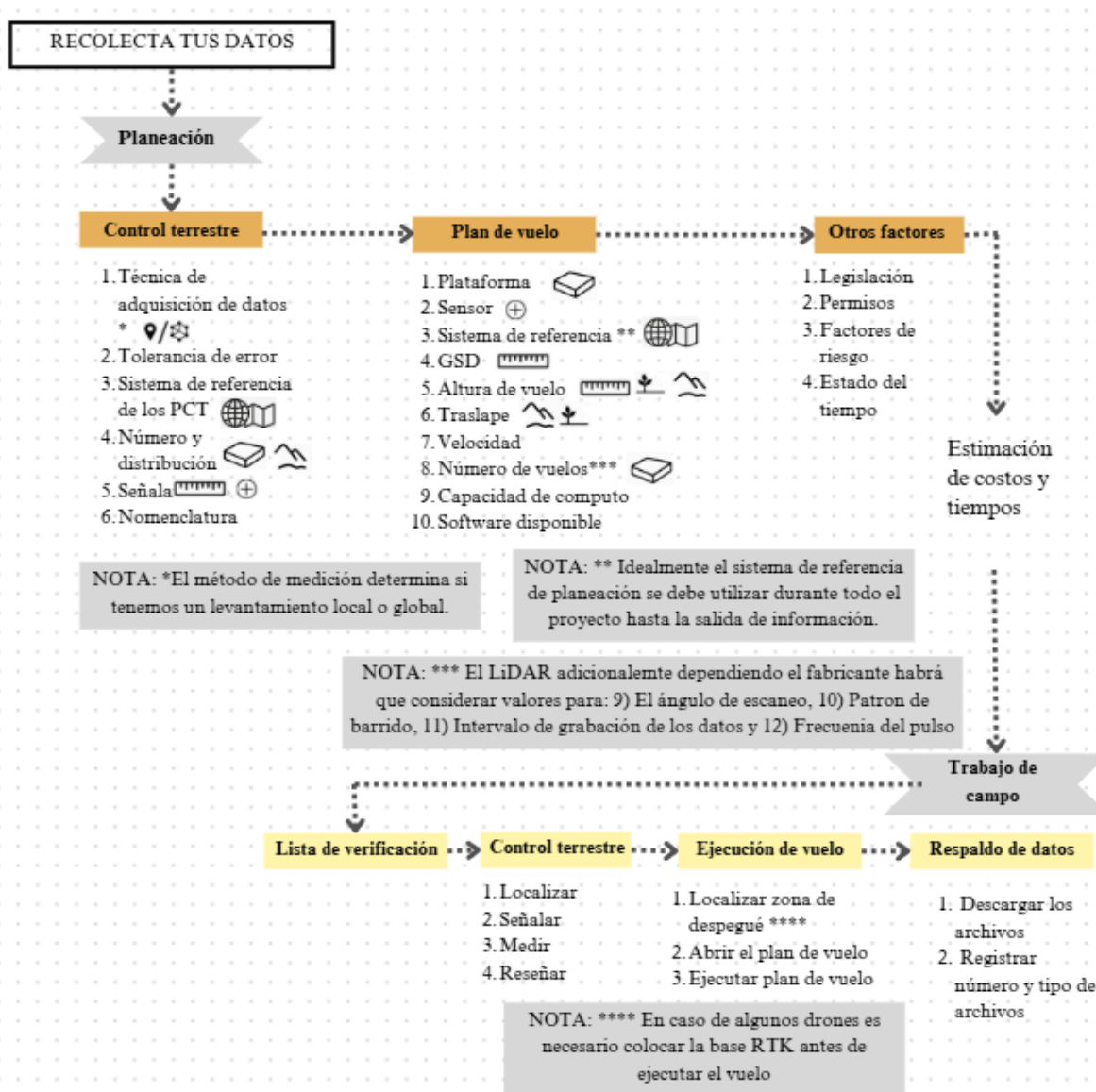
Nota: Se muestra un diagrama de flujo que va realizando preguntas que permitan delimitar el objetivo del levantamiento y decidir la técnica óptima de adquisición de datos espaciales. Hay características a las que se les asignó un icono ya que su respuesta será importante tenerla presente durante la fase de recolección de datos. Elaboración propia.

Con el fin de complementar la propuesta de flujo de decisión, se incorpora el esquema general del proceso de recolección de datos (ver Figura 69), el cual, aunque fue descrito en el capítulo metodológico, se retoma en este apartado para evidenciar la relación entre la selección de la técnica y su implementación en campo.

La correspondencia visual entre ambas figuras, mediante el uso de iconografía común, permite establecer una continuidad conceptual entre la definición del objetivo del

proyecto y las etapas de adquisición de datos, integrando así el proceso de toma de decisión con su ejecución operativa. Para registrar las decisiones de la planeación y ejecución se sugiere el uso de una bitácora (ver Anexo 6).

Figura 60.
Flujo de la Recolección de Datos



Nota: Se muestra un diagrama de flujo que ordena los pasos a seguir, para la recolección de datos, cada ícono recuerda una decisión tomada al momento de definir el objetivo que será relevante para establecer los parámetros de la planeación de vuelo. Levantamiento Local/Global; - Sistema de referencia y de proyección; Resolución espacial; Extensión; Vegetación; Relieve. Elaboración propia.

De esta manera, la Figura 59 y la Figura 69 no deben interpretarse como elementos independientes, sino como componentes complementarios de un mismo sistema: la primera orienta la selección de la técnica, mientras que la segunda muestra las implicaciones prácticas de dicha elección en el proceso de levantamiento.

4.4.4. Recomendaciones según tipo de proyecto

Con base en el análisis realizado, se proponen las siguientes recomendaciones para la selección de la metodología:

- Proyectos topográficos en áreas con vegetación densa: Se recomienda el uso de LiDAR, debido a su capacidad para obtener puntos de terreno bajo cobertura vegetal y generar modelos más precisos.
- Proyectos cartográficos en zonas abiertas o con vegetación dispersa: La fotogrametría resulta adecuada, especialmente cuando se requiere información visual detallada y ortofotos de alta resolución.
- Proyectos donde la precisión absoluta es crítica: La fotogrametría con un adecuado control terrestre puede ofrecer mejores resultados, siempre que se garantice la correcta medición de los PCT.
- Proyectos con limitaciones de tiempo o procesamiento: El LiDAR representa una opción más eficiente en términos operativos.
- Proyectos que requieren análisis de vegetación o estructura vertical: El LiDAR ofrece ventajas significativas debido a la información asociada a los retornos del pulso láser

Capítulo 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron analizar de manera integral el desempeño de las técnicas fotogramétrica y LiDAR en la generación de información cartográfica, evidenciando la importancia de la planeación, el control de calidad y la adecuada selección metodológica en levantamientos geomáticos.

En relación con el objetivo principal, se logró comparar ambas técnicas considerando criterios técnicos y operativos, tales como precisión geométrica, densidad de la nube de puntos, clasificación de terreno, continuidad espacial y calidad de productos derivados. Los resultados muestran que cada técnica presenta ventajas y limitaciones que dependen directamente de las condiciones del entorno y de los requerimientos del proyecto.

En términos de precisión, la fotogrametría presentó mejor desempeño en exactitud absoluta al ser ajustada mediante Puntos de Control Terrestre, alcanzando un RMSE vertical de 0.10 m, mientras que el LiDAR, dependiente de la solución GNSS-IMU, presentó un RMSE de 2.7 m antes de su ajuste. Sin embargo, tras el proceso de alineación entre nubes, el LiDAR alcanzó una mejor correspondencia geométrica, evidenciando que su precisión puede mejorar significativamente mediante procesos de ajuste externo.

En cuanto a la densidad de la nube de puntos, el LiDAR demostró una ventaja consistente en todos los escenarios analizados. A nivel de cobertura superficial, registró aproximadamente 1.4 veces más puntos que la fotogrametría, mientras que en la representación del terreno esta diferencia aumentó hasta 3.9 veces. Esta diferencia se acentúa en zonas con vegetación, donde el LiDAR alcanzó hasta 15.5 veces mayor

densidad, lo que confirma su capacidad para penetrar la cobertura vegetal y representar el terreno subyacente.

Respecto a la clasificación de terreno, el LiDAR mostró un desempeño más robusto, con mayor continuidad y menor necesidad de reclasificación, especialmente en zonas con vegetación densa. En contraste, la fotogrametría presentó limitaciones al depender de la visibilidad de la superficie, generando errores en la clasificación en áreas donde únicamente se reconstruyen las copas de los árboles.

En los productos derivados, ambas técnicas lograron representar adecuadamente la estructura general del terreno; sin embargo, el LiDAR presentó una mayor continuidad y coherencia geométrica en modelos como el MDT, curvas de nivel y pendientes. En particular, permitió representar valores extremos de pendiente y definir con mayor claridad la red hidrográfica en zonas complejas. No obstante, la fotogrametría demostró ser suficiente en condiciones de baja vegetación y resultó especialmente útil para la generación de ortofotos y análisis visual de la superficie.

Desde el punto de vista operativo, el LiDAR mostró mayor eficiencia en tiempos de adquisición y menor volumen de datos, así como menor dependencia de condiciones externas como iluminación o cobertura vegetal. Por su parte, la fotogrametría presentó mayor accesibilidad en términos de costos y disponibilidad de software, aunque con mayor dependencia de condiciones ambientales y mayor tiempo de procesamiento.

A partir de estos resultados, se concluye que el factor más determinante en la selección de la técnica es la cobertura vegetal. En entornos con vegetación densa, el LiDAR es la opción más adecuada para representar el terreno natural y generar productos derivados

confiables. En contraste, en áreas con baja cobertura vegetal o cuando se requiere información visual detallada, la fotogrametría representa una alternativa eficiente y económicamente viable.

Asimismo, se confirma que la calidad de los productos derivados no depende únicamente de la técnica empleada, sino también de la densidad de la nube de puntos, la correcta clasificación y las decisiones de procesamiento, como el tamaño de píxel utilizado en los modelos.

Finalmente, esta investigación no sólo permitió comparar ambas técnicas, sino también proponer un flujo de decisión que integra la definición de objetivos del proyecto con las condiciones del entorno y los requerimientos técnicos, contribuyendo a la selección informada de metodologías en proyectos geomáticos.

Referencias

- Acosta, A. (2024). *Google Earth en el aprendizaje de los volcanes de la Región Sierra del Ecuador con los estudiantes de Educación General Básica Media de la Unidad Educativa "Emanuel" de la ciudad de Ambato*. Universidad Técnica de Ambato.
- Aguilar, F. & Aguilar, M. (s.f.) *Integración y análisis exploratorio de datos geoespaciales como base para la gestión integral del litoral*. Universidad de Almería.
- Alonso, M. (2009). *Espacios de Color RGB, HSI y sus Generalizaciones a n-Dimensiones*. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- Altamimi, Z., P. Sillard y C. Boucher. (2002). *ITRF2000: A New release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications*. Journal of Geophysical Research, 107(B10), 214. 1-19.
- Álvarez, J. (2021). *Planeación topográfica para rectificación de linderos a través de levantamientos RTK, NTRIP y vuelos RPAS*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ávila, A. (2018). *Sistemas LiDAR embarcados en RPAS*. REVISTA INTERNACIONAL MAPPING, 27(192), 38-43.
- Bernardo, I. (2017). *Aerofoto*. Fundación ICA A.C.
- Berné, J., Anquela, A. & Garrido N. (2014). *GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Colección Académica. Editorial UPV.
- Cárdenas, E., Morales, L. & Ussa, A. (2015). *La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento*. Rev. Cient. Gen. José María Córdova 13(16), 201-219
- Cartaya, S., Araque, F., Flores, F., De Sá, J., Entrena, M. & Rebolledo, R. (2014). *Manual de capacitación básica en Geomática para las comunidades organizadas*. Centro de Procesamiento Digital de Imágenes - Fundación Instituto de Ingeniería.
- Claros, R., Guevara, A., & Pacas, N. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados*. Universidad de El Salvador.

- CentroGeo, (2019). *Situación actual de la Cuenca Balsas en México*. CentroGeo. Recuperado el 25 de julio de 2024. Link: <https://idegeo.centrogeo.org.mx/mviewer/hidrobalsas#>
- Dirección General de Servicios Técnicos [DGST]. (2014). *Manual de proyecto geométrico de carreteras - SCT-NIS-0487*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. Recuperado de: https://ts.sct.gob.mx/normatecaNew/wp-content/uploads/2014/11/SCT_NIS_0487.pdf
- DJI Enterprise, (2021). *Distancia de muestreo del suelo: Qué es, cómo se calcula y cómo afecta a los datos de tu dron?* DJI Enterprise. Recuperado de: <https://enterprise-insights.dji.com/es/blog/distancia-muestreo-del-suelo-gsd>
- DJI. (2021). *Zenmuse L1*. DJI. Recuperado de: https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse_L1/20220119UM/Zenmuse_L1%20User%20Manual_ES_v1.2.pdf
- DJI. (2023). *Matrice 300 RTK*. DJI. Recuperado de: https://dl.djicdn.com/downloads/matrice-300/20230518UM/M300_RTK_User_Manual_EN_v4.0.pdf
- DJI. (2024). *DJI TERRA*. Recuperado de: https://dl.djicdn.com/downloads/dji-terra/20241024/DJI_Terra_User_Manual_v4.3_EN.pdf
- Domínguez, J. (2000). *Breve introducción a la cartografía ya los sistemas de información geográfica (SIG)*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
- Dong, P. & Chen, Q. (2018). *LiDAR Remote Sensing and Applications*. Taylor & Francis Group.
- Felipe-García, B., Hernández-López, D., & Lerma, J. L. (2012). *Analysis of the ground sample distance on large photogrammetric surveys*. *Applied Geomatics*, 4, 231-244.
- Fernández, L. (2023). *Astrometría moderna: el desafío del trabajo interdisciplinario*. Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, 64.
- Ferreccio, N. (2006). *Análisis de la técnica RTK*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP)

- Flores, J. & Rivadeneira, C. (2013). *Diseño e implementación del sistema de instrumentación de un vehículo aéreo no tripulado (UAV)*. Quito / Escuela Politécnica Nacional).
- Foucault, M. (2006). *Seguridad, territorio y población, trad. H. Pons*.
- García, D. (2008). *Sistema GNSS (global navigation satellite system)*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid
- García, F. (2017). *Curso básico de topografía: planimetría, agrimensura, altimetría*. Editorial Pax México.
- Goossens, R., Stal, C., Tack, F., De Maeyer, P., De Wulf, A. (2013). *Airborne photogrammetry and lidar for DSM extraction and 3D change detection over an urban area—a comparative study*. International Journal of Remote Sensing, 34(4), 1087-1110. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.717183>.
- Gualotuña, M. & Tituaña, J. (2023). *Guía práctica para generar y mejorar topografías satelitales con el software “Global Mapper” enfocado al diseño vial*. Universidad Politécnica Salesiana Ecuador.
- Gura, D., Berkova, E., Panyutischeva, A., Zaidi, M., & Turk, G. (2023). Overview of the DJI ZENMUSE L1 Laser Scanner for Spatial Planning Purposes. In International Scientific and Practical Conference Digital and Information Technologies in Economics and Management (pp. 32-41). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Helmert, R., (1880). *Die mathematischen und physikalischen Theorien der hoheren*.
- Hill, C., Limp, F., Casana, J., Laugier, E., & Williamson, M. (2019). *Una nueva era en el registro de datos espaciales: GNSS de bajo costo*. Avances en la práctica arqueológica , 7 (2), 169-177.
- Hirt, C. (2015), *Digital Terrain Models*. In: Encyclopedia of Geodesy (Ed. E.W. Grafarend), doi 10.1007/978-3-319-02370-0_31-1, Springer, Berlin, Heidelberg.

Hoffmann-Weelenhof, B., Lichtenegger, H. y Wasle, E. (2008). *GNSS Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo & more*. Springer Wein, New York. SpringerWienNewYork.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], (s.f.). *Cuéntame de México*. INEGI. Recuperado el 25 de julio de 2024. Link:

<https://www.inegi.org.mx/app/mapa/mapoteca/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2015). *Guía metodológica de la Red Geodésica Horizontal*. INEGI. Recuperado de:

https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825078805.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2019). *Marco de referencia ITRF en México y su relación con WGS84 y NAD27*. INEGI. Recuperado de:

<https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/temas/gnss/doc/702825109226.pdf>

Jekeli, C. (2006). *Geometric Reference System in Geodesy. Division of Geodesy and Geospatial Science. School of Earth Sciences*. Ohio State University. 202 pp.

Jimenez, N., Magaña, A., & Soriano, E. (2019). *Análisis comparativo entre levantamientos topográficos con estación total como método directo y el uso de Drones y GPS como métodos indirectos*. Universidad de El Salvador.

Kersten, T., Wolf, J., & Lindstaedt, M. (2022). *Investigations into the accuracy of the UAV system DJI Matrice 300 RTK with the sensors Zenmuse P1 and L1 in the hamburg test field*. In XXIV ISPRS Congress “Imaging today, foreseeing tomorrow”, 6–11 June 2022, Nice, France (pp. 339-346). Copernicus.

Leica Geosystems, (2000). *Guía para mediciones en modo Estático y Estático Rápido*.

Leica Geosystems. Recuperado de:

<https://geodesical.com/es/pdfs/manuales/leica-guia-rapida-gps-centimetrico-modo-e-statico.pdf>

Lu, Z., Qu, Y. & Quiao, S. (2014). *Geodesy Introduction to Geodetic Datum and Reference Systems*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London. DOI 10.1007/978-3-642-41245-5_5.

Luque, R. (2011). *El uso de la cartografía y la imagen digital como recurso didáctico en la enseñanza secundaria. Algunas precisiones en torno a Google Earth*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles N.º 55 - 2011.

Maass, S. & Valdez, E. (2003). *Principios básicos de cartografía y cartografía automatizada*. UAEM.

Maureira, M., Seebach, S., & Torrejón, P. (2019). *Drones y epidemiología: la tecnologización de la vigilancia*. Estudios atacameños, (62), 203-211.

McManamon, P. 2019. *LiDAR Technologies and Systems*. SPIE

Milanese, M., Errotabere, L., Torrens, C., & Cappelletti, V. (2022). *Evaluación de aplicaciones de navegación GPS para salidas de campo*. Boletín Geográfico, 44(2), 79-94.

Mircea, E., Petre, I., Chiorean, S., Deak, J., Luput, I. & Ficior, D. (2021). *The Impact of Modern Topo-Geodetic Technologies on Positioning Techniques*. "Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca.Horticulture".

Moya-Zamora, J. & Cedeño-Montoya, B. (2017). *Conceptos básicos en geodesia como insumo para un tratamiento adecuado de la información geoespacial*. Revista Geográfica de América Central, 1(58), 71-100.

Municipio de Xaltocan (2023). *Tu Municipio*. Gobierno de México: Municipio de Xaltocan. Recuperado el 25 de julio de 2024. Link: <https://www.xaltocan.gob.mx/tu-municipio/nomenclatura>

- Muñoz, A. (2009). *Geodesia y cartografía: Fundamentos de los sistemas de información geográfica*, Universidad Oberta de Catalunya.
- Murai, S. (1999). *SIG, Manual Base: conceptos fundamentales*. Revista Selper, 15(1), 1-66.
- Nogué, A, & Antiga, J. (2012). *Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales*. Gobierno de España (Ministerio de Educación).
- Nowak, M., Dziób, K., Ludwisiak, Ł., & Chmiel, J. (2020). *Mobile GIS applications for environmental field surveys: A state of the art*. Global Ecology and Conservation, 23, e01089. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01089>
- Nualart, E., & García, J. (2010). *Cómo mirar a través de una cámara fotográfica*. Materials matemàtics, 0001-28.
- (Oriondo, L. & Jurado, J. (2023). *Optimización del rendimiento y costo de un Levantamiento Topográfico mediante el uso de drones en 1 km de trocha Carrozable del distrito 27 de Noviembre–Huaral–Lima*. Universidad Peruana a de Ciencias Aplicadas.
- Pacheco, C. E., & Pozzobon, E. N. (2006). *Manual de Ejercicios de Laboratorio Fotogrametría y Fotointerpretación*. Publicaciones Vicerrectorado Académico.
- Peña, E. & Buitrago, F. (2015). *Estudio del error de la componente altimétrica (z) de un modelo digital de terreno generado con tecnología Lidar terrestre con base a un levantamiento GPS*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas
- Pérez-López, P. A., (2010). *Topografía*. Textos Académicos. ITM.
- Pérez, C., & Muñoz, A. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Universidad de Salamanca
- Prado, T. (2016). *El ABC Fotográfico*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Pucha-Cofrep, F., & Fries, A. (2023). *Manual de ArcGIS Pro*. ArcGeek.

- PX Receptores GNSS. (2021). *Receptor GNSS RTK NTRIP – Ficha técnica*. PBX Virtual de Costa Rica S.R.L. Recuperado de: <https://pxgnss.com/doc/ficha%20tecnica%20PX%20GNSS.pdf>
- Quirós, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones.
- Real Academia Española. (s.f.). *Diccionario de la lengua española versión en línea*. [https://dle.rae.es/esc%C3%A1ner [08 de mayo de 2025].
- Reséndiz, D. (2010). *El rompecabezas de la ingeniería. Por qué y cómo se transforma el mundo (Vol. 215)*. Fondo de Cultura Económica.
- Riaño, E. R. (2018). *Metodología para el diseño de un vuelo fotogramétrico usando UAV*. S. Universidad Distrital Francisco José De Caldas
- Ríos, A. & Puerto, L. (2019). *Control terrestre en el proceso fotogramétrico usando vehículos aéreos no tripulados con fines cartográficos en el municipio de Cóbbita*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ruiz, J. (2013). *Generación de mapas 3D a partir de imágenes aéreas*. Universidad de Sevilla.
- Salamanca, J. & Pérez, J. (2008). *LIDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano*. *Ingeniería*, 13(1), 67-76. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Sevilla-de-Lerna, M. (1999). *Introducción histórica a la geodesia*. Universidad Complutense de Madrid.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT] (2019). *NOM-107-SCT3-2019*. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/602732/nom-107-sct3-2019-201119.pdf>
- Secretaría de Políticas Integrales sobre Drogas de la Nación Argentina [Sedronar]. (2013). *Cartilla II: Nociones Principales sobre georreferenciación*. Cartillas OPD, Jefatura de Gabinete de Ministros de Argentina.

- Sistema Nacional de Información Estadística y Geografía [SNIEG] (2010), *Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional*. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de:
https://snieg.mx/DocumentacionPortal/Normatividad/vigente/Norma_Tecnica_para_el_Sistema_Geodesico_Nacional.pdf
- Sitjar i Suñer, J. (2009). *Los Sistemas de Información Geográfica al servicio de la sociedad*. Cuadernos Internacionales de Tecnología para el Desarrollo Humano, 2009, núm. 8.
- Štroner, M., Urban, R., Křemen, T., & Braun, J. (2023). *UAV DTM acquisition in a forested area—comparison of low-cost photogrammetry (DJI Zenmuse P1) and LiDAR solutions (DJI Zenmuse L1)*. *European Journal of Remote Sensing*, 56(1), 2179942.
- Tarboton, D. Rafael, L. Bras, & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). *On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data*. *Hydrological Processes*. 5: 81–100.
- Tenorio, J. (2015). *Proceso y ajuste de nube de puntos LiDAR en el INEGI*. INEGI.
- Tippens, P. E., (2011). *Física: conceptos y aplicaciones*. McGraw-Hill
- Torge, W., (2001). *Geodesy. 3rd. Edition*. Walter de Gruyter-Berlin-New York. 416 pp.
- Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). *Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua*. *Idesia (Arica)*, 38(4), 99-107.
- Villa, R. (2016). *El datum, el geoide, el elipsoide y la cartografía*. *Revista general de marina*, 270(1), 27-37.
- Villa-Ochoa, J. (2007). *La modelación como proceso en el aula de matemáticas: un marco de referencia y un ejemplo*. *TecnoLógicas*, 63-86.
- Wang, C., Yang, X., Xi, X., Nie, S., & Dong, P. (2024). *Introduction to LiDAR remote sensing*. CRC Press.
- Zapata, C. (2022). *Análisis comparativo de datos en sensores activos y pasivos en sensores aéreos no tripulados*. Universidad Militar Nueva Granada.

Anexos

Anexo 1. Lista de Verificación

LISTA DE VERIFICACIÓN. COORDINACIÓN DEL VUELO.

Elemento	Acción	Estado
Nombre del servicio	Anotar en la bitácora	
Piloto a cargo	Anotar en la bitácora	
Nombre del cliente	Anotar en la bitácora	
Teléfono del cliente	Anotar en la bitácora	
Mapa o ruta para llegar al lugar del servicio	Dar la ubicación y pormenores de cómo llegar al lugar.	
Fecha y hora del servicio	Anotar en la bitácora	
Duración del servicio	Informar el número de días que será necesario repetir el servicio.	
¿Se coordinó que haya una persona responsable de parte del cliente para acompañar el vuelo?	Informar que se requiere alguien que sea responsable de parte del cliente, de acompañar el vuelo y con la autoridad necesaria para permitir accesos o solucionar pequeños conflictos. Apuntar en la agenda, nombre, teléfono y cargo de esta persona.	
Se coordinó el ingreso al lugar	Informar punto de encuentro	
Se coordinaron las área de despegue y aterrizaje	Se informó a la persona responsable sobre los mejores lugares para despegue y aterrizaje, esperando su aprobación	
Se coordinaron los requerimiento especiales del tipo de vuelo	Revisar que no se esté en una zona de vuelo restringida y en su caso solicitar permisos.	
Se coordinó cómo se dará el aviso de despegue del RPAS	Platica con la persona responsable y explicación a todo el personal involucrado.	
Se coordinó cómo se dará el aviso de inicio de las tomas	Platica con la persona responsable y explicación a todo el personal involucrado.	
Se coordinó cómo se dará el	Platica con la persona responsable y	

aviso del aterrizaje del RPAS	explicación a todo el personal involucrado.	
Se coordinó la entrega de plataforma y sensor	Anotar nombre de la persona responsable de entregar plataforma y sensor	
Se coordinó el retiro de plataforma y sensor	Anotar nombre de la persona responsable de recibir y almacenar plataforma y sensor	

LISTA DE VERIFICACIÓN.
PREVIO A LA SALIDA (llenar con un día de anticipación)

Elemento	Acción	Estado
Baterías del RPAS	Verificar carga	
Estado físico de las baterías del RPAS	Verificar operatividad y anotar ciclos actuales de uso	
Actualización de baterías	Verificar que se tengan instaladas las últimas actualizaciones	
Actualización del centro de carga	Verificar que se tengan instaladas las últimas actualizaciones	
RPAS		
Aspas	Comprobar que estén en la caja	
Tren de aterrizaje	Comprobar que estén en la caja	
Fuselaje	Buscar que no tenga daño	
Marcas de identificación	Checar	
Actualización del RPAS	Verificar que se tengan instaladas las últimas actualizaciones	
SENSOR		
Sensor	Verificar que no tenga daños	
Memoria del sensor	Formatear, verificar que sea de la capacidad y velocidad requeridas.	
Actualización del sensor	Verificar que se tengan instaladas las últimas actualizaciones	
CONTROL		
Baterías del control	Verificar carga	
Actualizaciones del control	Verificar que se tengan instaladas las últimas actualizaciones en todo el equipo	
BASE RTK		
Baterías de la Base	Verificar carga	
Actualizaciones de la base	Verificar que se tengan instaladas las últimas actualizaciones	
MISIÓN DE VUELO		
Planificación de la misión	Confirmar parámetros establecidos y anotarlos en la bitácora	
Verificar espacio aéreo	Consultar mapa del espacio aéreo, NOTAM's, etc.	
Verificar clima	Verificar informes de clima	
Verificar condiciones del aire	Consultar velocidad del viento en el lugar, verificar máximos de operación del equipo	

Área de vuelo	Inspeccionar visualmente los peligros, anotarlos e informar	
Área de despegue / aterrizaje	Empacar el equipo para delimitar área de despegue/aterrizaje	
Área de operaciones	Delimitar fuera del área de despegue	
Wi-fi	Conocer la disponibilidad de internet en la zona	

LISTA DE VERIFICACIÓN.
PREVIO AL VUELO.

Elemento	Acción	Estado	
Caja con el RPAS	Verificar que contiene: Aspas, tren de aterrizaje y todo lo necesario para su correcto funcionamiento		
Baterías del RPAS	Verificar que se encuentren cargadas y almacenadas		
Caja del sensor	Verificar que contenga todo lo necesario para su correcto funcionamiento		
Memoria del sensor	Verificar que se encuentre instalada, formateada y de la capacidad y velocidad necesaria		
Caja con la base RTK	Verificar que lleva: Tripie, base, flexómetro y todo lo necesario para su correcto funcionamiento		
Baterías de la base RTK	Verificar que se encuentran cargadas y almacenadas		
Control	Verificar que cuente con batería y con la misión de vuelo cargada		
Baterías del Control	Verificar que se encuentren cargadas y almacenadas		

LISTA DE VERIFICACIÓN.
DURANTE EL VUELO.

Elemento	Acción	Estado	
Base RTK en el punto base	Verificar que la base está correctamente nivelada y centrada		
Prender Base RTK	Debe estar en modo 5		
Prender el control	Visualizar la misión de vuelo		
Prender RPAS	Verificar que todos los seguros estén puestos		
Área de vuelo	Verificar visualmente constantemente		
Visualización de navegación	Verificar que el panel de navegación funcione correctamente		
Peligro en el área de vuelo	Comunicar al operador de inmediato		
Peligro en tierra	Comunicar al operador de inmediato		
Batería de drone	Monitorear constantemente		
Parámetros de vuelo	Monitorear constantemente		
Al tocar tierra	Quitar baterías		
Apagar	Apagar RPAS, apagar control, apagar la base RTK al término de la misión		

LISTA DE VERIFICACIÓN.
AL TÉRMINO DEL VUELO.

Elemento	Acción	Estado	
Batería	Extraer batería y poner en un lugar templado y a la sombra		
Motores	Verificar su operatividad		
Aspas	Verificar su operatividad		
Gimbal	Verificar su operatividad		
Sensor	Verificar su operatividad		
Tarjeta de memoria	Extraerla y realizar un respaldo		
Estructura del dron	Verificar su operatividad		
Equipo utilizado	Embalarlo después de la revisión		
Registro de vuelo	Actualizar registro de vuelo		

Anexo 2. Evidencia de Campo

Equipo en campo



Nota: La fotografía muestra el área de estudio y uno de los receptores GNSS de la marca PX en su bastón de aplomar y trípode para bastón. Enfrente del receptor está el dron M300 y lo más anterior de la fotografía las cajas donde se almacenan el sensor P1 y L1. Elaboración propia.

Señalización y Medición de PCT



Nota: En la fotografía de la izquierda vemos el receptor base en el tripié centrado y nivelado midiendo. En la fotografía de la derecha vemos el receptor móvil centrado y nivelado con el bastón de aplomar y trípode. Ambos puntos están señalizados con una cruz en una lona. Elaboración propia.

Base para vuelo drone y su ejecución



Nota: En la fotografía de la izquierda vemos la estación D-RTK 2 centrada y nivelada sobre el mismo punto base del levantamiento con receptores GNSS. En la fotografía de la derecha vemos el control del M300 y la supervisión durante el vuelo. Elaboración propia.

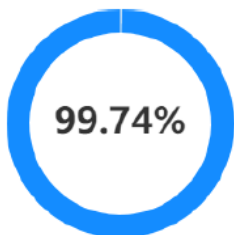
Anexo 3. Formato de Identificación de Puntos Control Terrestre

FORMATO DE IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE			
UBICACIÓN DEL PCT DENTRO DEL POLÍGONO (IMÁGEN SATELITAL)		VISTA AÉREA	
PROYECTO	CLAVE DEL PCT	VISTA EN TIERRA	
MUNICIPIO			
ESTADO			
ACERCA DE LA MEDICIÓN			
FECHA DE MEDICIÓN			
DATUM			
METODO DE MEDICIÓN			
RESULTADOS			
COORDENADAS GEOGRÁFICAS		COORDENADAS PROYECTADAS	
DATUM		DATUM Y PROYECCIÓN	
LONGITUD		X	
LATITUD		Y	
Z ELIPSOIDAL (h)		Z ORTOMÉTRICA (H)	
PRECISIÓN Y ORDEN DE LA MEDICIÓN			
σ_{ϕ} (LAT)=			
σ_{λ} (LONG)=			
CEP95=			
CLASE ORDEN			

Anexo 4. Reporte de Reconstrucción Fotogramétrica en DJI Terra

Descripción general

📷 Proporción de imágenes calibradas



Número de imágenes	382
Imagen con posición e inclinación de cámara	381
Imagen calibrada	381
Restringir con datos POS de la imagen	Si

Parámetros de la misión

☰ Parámetros de vuelo

Altura media de vuelo	92.15 m
GSD	1.136 cm/px
Cobertura de cartografía TDOM	0.066949 km ²
Color	3 bands, uint8

🕒 Tiempo de consumo total



● Aerotriangulación	5min 27s
● Reconstrucción 2D	28min 41s
● Reconstrucción 3D	3h 12min 47s

☰ Vista general de la información del hardware

CPU	Intel Xeon 12 cores
Cantidad de CPU	1
GPU 0	Quadro P2200
RAM	32448 M

Informe de calidad para aerotriangulación

☰ Exactitud de reconstrucción

Componentes conectados	1
Máx. cantidad de imágenes de componentes	381
Proyecciones	553298
Punto de amarre	149181
Error de reproyección RMS	1.609 px
Error cuadrático medio de la georreferenciación	1.579 m

☰ Parámetros de reconstrucción

Método de cálculo	Cálculo independiente
Densidad de puntos distintivos	Alto
Distancia del suelo/objetivo	100 m
Generar archivo XML	Sí

Información de GCP

☐ Error de GCP

Punto de control

Parámetros	dx	dy	dz	Error de 3D	Error vertical	Error horizontal
Medía cuadrática	0.496 m	0.096 m	0.03 m	0.597 m	0.03 m	0.506 m
Mediana	-0.035 m	-0.021 m	0.001 m	0.436 m	0.023 m	0.435 m

☐ Detalles del error

Error de punto de control

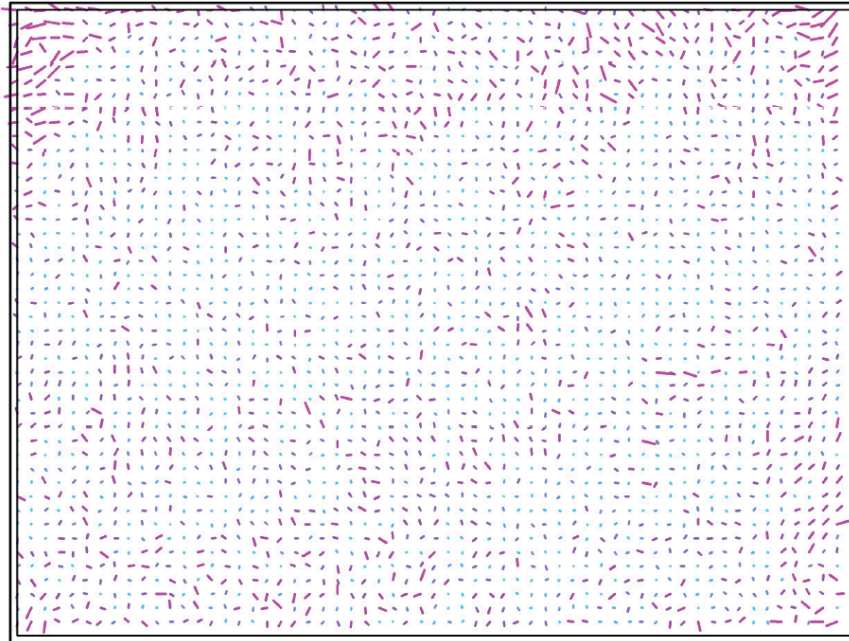
ID	Fotos marcadas	Fotos visibles	Error de reproyección RMS	Error de intersección frontal	Error horizontal	Error vertical	Error de 3D	dx	dy	dz
1	14	15	66.272 px	0.674 m	0.692 m	0.048 m	0.693 m	0.685 m	-0.094 m	-0.048 m
2	9	12	9.044 px	0.093 m	0.093 m	0.013 m	0.094 m	0.077 m	0.052 m	0.013 m
3	10	16	16.688 px	0.176 m	0.179 m	0.011 m	0.18 m	-0.148 m	-0.102 m	-0.011 m
5	11	23	67.039 px	0.699 m	0.71 m	0.033 m	0.711 m	-0.699 m	0.124 m	0.033 m

Estado de RTK

Estado	Cantidad de imágenes
Fijo	169
Fluctuante	0
Único	212
Otros	0

Información de calibración de la cámara

Residuos de imagen para la cámara



1 pix

Información de la cámara

Modelo de cámara	ZenmuseP1
N/S de cámara	3XMDK7S0011LQB
N/S de objetivo	02FY416C043P
Tipo de cámara	Estándar
Corregir configuración de la cámara	No corregir
Resolución de la foto	8192*5460
Precalibración	No
Número de fotos	381

Configuración de la cámara (bloque 0)

Parámetros intrínsecos de la cámara

Parámetros	Distancia focal	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
Inicial	8101.365	4081.896	2762.467	-0.04605514	0.029249882	-0.098258117	0.002201586	-0.000704749
Optimizada	8101.384	4081.952	2762.449	-0.04608901	0.029460291	-0.098716651	0.002200748	-0.000702416
Valor de diferencia	0.019	0.057	-0.017	-0.000033971	0.000210409	-0.000458533	-0.000000837	0.000001333

Matriz de covarianza

	Error	Distancia focal	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
Distancia focal	0.274	1	-0.039	0.156	-0.155	0.132	-0.129	-0.009	0.001
Cx	0.141	-0.039	1	-0.015	-0.027	0.019	-0.015	0.004	0.677
Cy	0.125	0.156	-0.015	1	0.013	-0.006	0.003	0.723	-0.01
K1	0.000106573	-0.155	-0.027	0.013	1	-0.959	0.899	0.024	-0.834
K2	0.000638422	0.132	0.019	-0.006	-0.959	1	-0.983	-0.001	0.027
K3	0.001153878	-0.129	-0.015	0.003	0.899	-0.983	1	0	-0.022
P1	0.00000441	-0.009	0.004	0.723	0.024	-0.001	0	1	0.003
P2	0.000004752	0.001	0.677	-0.01	-0.834	0.027	-0.022	0.003	1

Otra información

Los residuos de POS de la cámara se generan en la carpeta Informe en el archivo del proyecto, y el nombre predeterminado del archivo es "POS_residual_of_camera.csv".

Informe de calidad para reconstrucción 2D

⌚ Tiempo de consumo de reconstrucción 2D



Corrección de la distorsión y el color de la imagen

3min 10s

Densificación

15min 25s

Generación de TDOM

10min 6s

☰ Parámetros de reconstrucción

Escenario	Cartografía
Cálculo en clúster	No
Resolución	Alto
Uniformidad de luz	Sí
Reducción de neblina	No

Información de la imagen

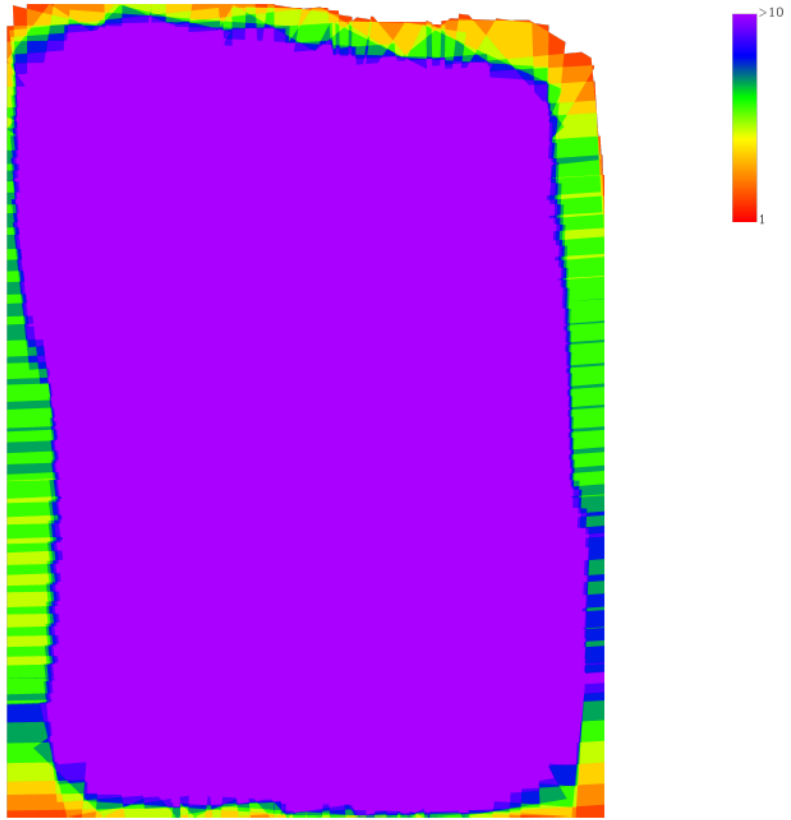
Previsualización de TDOM



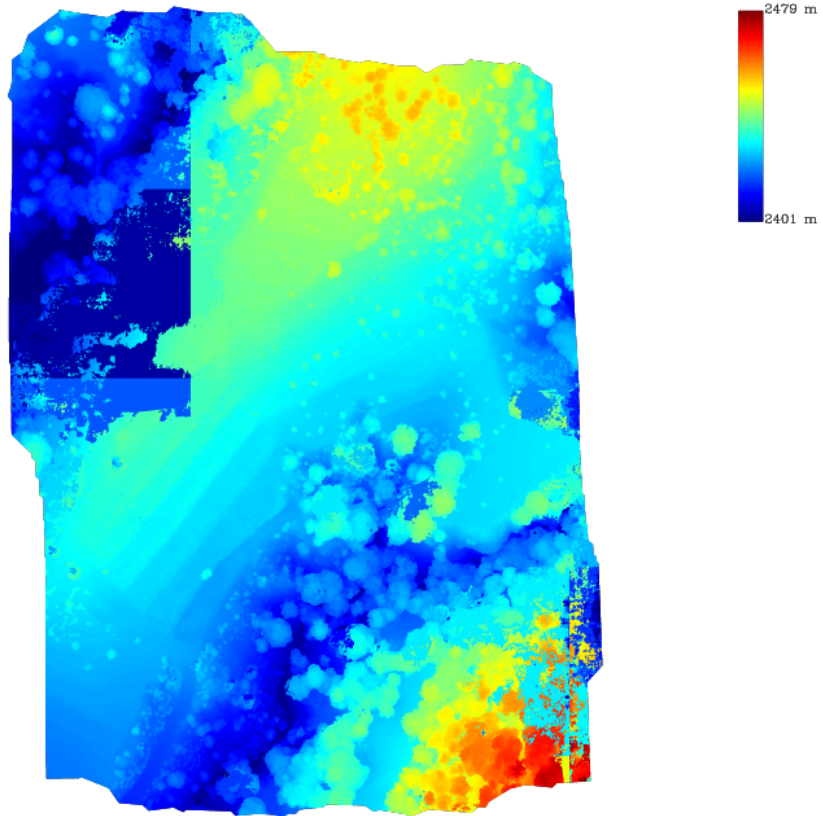
Distancia de muestreo del suelo de TDOM 1.16 cm/px

Cobertura de cartografía TDOM 0.106085 km²

☐ Solapamiento de escena



Previsualización de DSM



Informe de calidad para reconstrucción 3D

⊙ Tiempo de consumo de reconstrucción 3D



Hora de generación de la salida del modelo	16min 9s
Hora de generación de la salida de nube de puntos	3min 49s
Tiempo de fusión de la salida de nube de puntos	13s
Tiempo de clasificación de punto del terreno	2min 24s
Tiempo de generación de DEM	19s
Hora de generación de contorno	19s
Otros	2h 49min 34s

☰ Descripción general del bloque

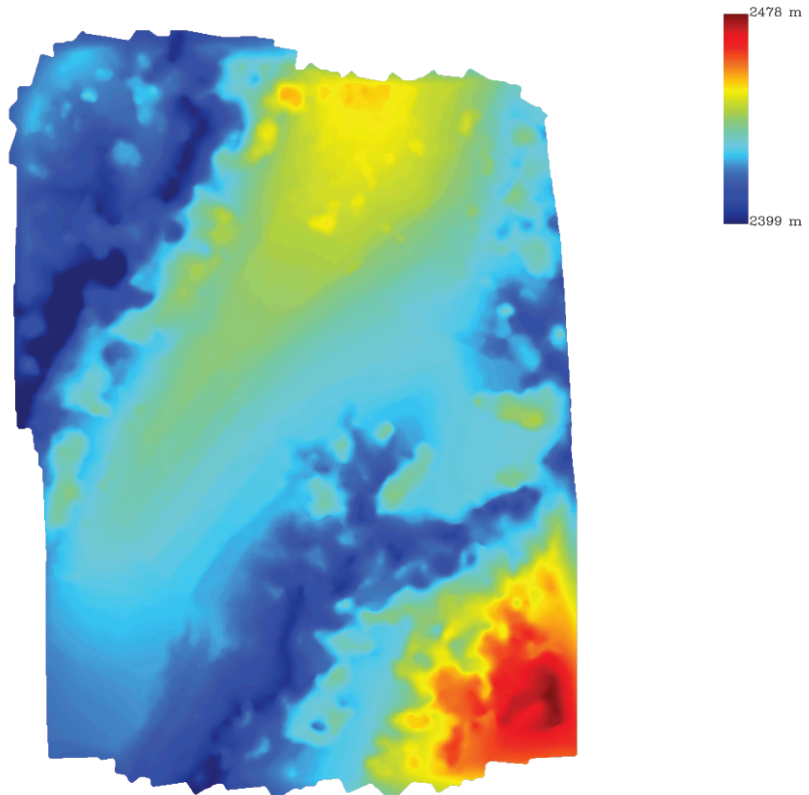
Modo de división MVS	Auto
Cantidad de bloques MVS	4

☰ Parámetros de reconstrucción

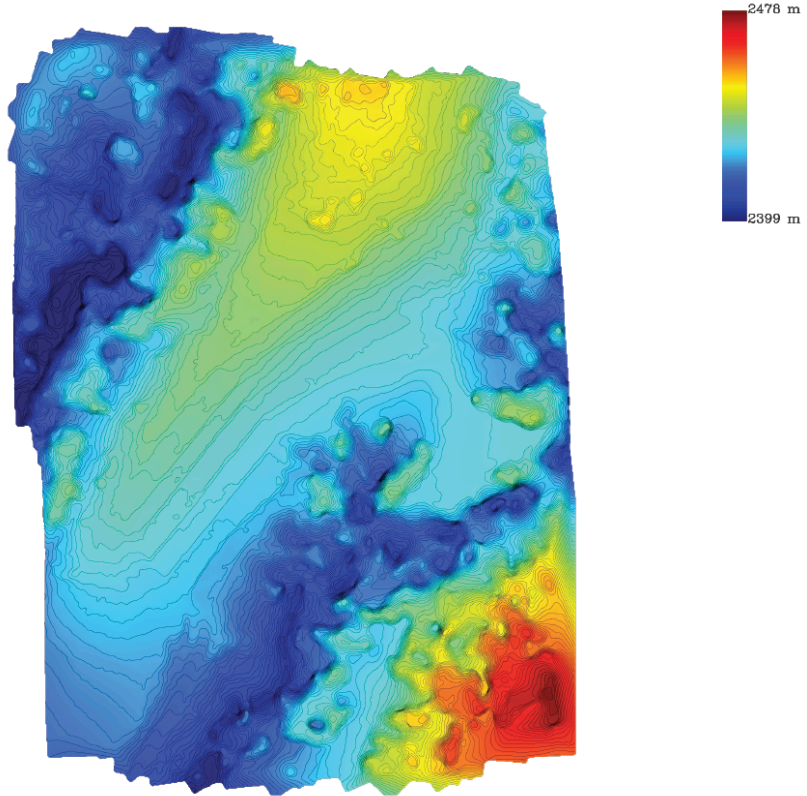
Escenario	Normal
Cálculo en clúster	No
Resolución	Alto
Refinar la superficie del agua	Sí
Reducir modelo a	50%
Clasificación de punto del terreno	Sí
Parámetros de clasificación de punto del terreno	Pendiente suave Diagonal máx. de edificio 2m Ángulo de iteración 6° Distancia de iteración 0.5m
DEM	Sí
Parámetros de DEM	Por GSD 0.5m
Contorno	Sí
Parámetros de contorno	Intervalo 1m Datos 0m Radio de anotación de cota 15m Longitud de contorno mínima 10m
Cuadrícula de puntos y TIN	No

Vista previa de salida

☐ DEM



Contorno



Lista de resultados

Aerotriangulación XML

Modelo B3DM PLY

nube de puntos PNTS LAS

DEM GeoTIFF

Contorno SHP DXF

Anexo 5. Reporte de Reconstrucción LiDAR en DJI Terra

Informe de calidad de DJI Terra

V4.2.5 | 2024-11-05 11:16 | Misión: Ejidos_Tlaxcala_LiDAR

Informe de calidad para el procesamiento de nubes de puntos LiDAR

⌵ Tiempo de recopilación de datos de la aeronave



Tiempo de recopilación de datos POS

8min 41s

Tiempo de recopilación de los datos de nube de puntos

6min 28s

⌵ Tiempo de procesamiento de software



Tiempo de optimización de la nube de puntos ^

8min 6s

• Tiempo de optimización de precisión de la nube de puntos

1min 17s

• Tiempo de nube de puntos de suavizado

1min 42s

• Tiempo de colorización de la nube de puntos

20s

• Tiempo de salida de fusión

22s

• Tiempo de guardado del resultado

31s

• Otros

3min 53s

Tiempo de clasificación de punto del terreno

2min 7s

Tiempo de generación de DEM

16s

Hora de generación de contorno

6s

Parámetros de reconstrucción

☰ Parámetros de optimización de la nube de puntos

Utilizar los datos de la estación base personalizada	No
Escenario	Procesamiento de nube de puntos
Densidad de nube de puntos (porcentaje)	Alto(100%)
Rango efectivo de distancia de nube de puntos	3-300 m
Control y comprobación de precisión	No
Optimizar precisión de la nube de puntos	Sí
Nube de puntos fluida	Sí

☰ Parámetros de salida de la nube de puntos

Formato de la nube de puntos	PNTS LAS
Salida combinada	Sí
Cantidad de bloques de nube de puntos LiDAR	2
Clasificación de punto del terreno	Sí
Parámetros de clasificación de punto del terreno	Pendiente suave Diagonal máx. de edificio 2m Ángulo de iteración 6° Distancia de iteración 0.5m
DEM	Sí
Parámetros de DEM	Por GSD 0.5m
Contorno	Sí
Parámetros de contorno	Intervalo 1m Datos 0m Radio de anotación de cota 15m Longitud de contorno mínima 10m
Sistema de coordenadas de salida	WGS 84 / UTM zone 14N Mexico_ITRF2008

Parámetros de la misión

☞ Parámetros de la aeronave (Aeronave 1)

Parámetros de hardware

Instrumento	DJI Zenmuse L1
N/S de instrumento	DJ59003GR9K
Parámetros de LiDAR	https://enterprise.dji.com/zenmuse-l1/specs

Parámetros de calibración LiDAR + IMU

Parámetros	X	Y	Z	rotación	inclinación	guiñada
Por defecto	0.03508m	0.01694m	-0.04644m	3.1180103 rad	0.0115898 rad	0.0025638 rad

Parámetros de vuelo (1 vuelos)

Velocidad de vuelo promedio	5.52m/s
Altura de vuelo	81.81m
Diámetro del haz de terreno	409mm*40mm
Frecuencia de pulso	240kHz
Velocidad de escaneo	720kHz

☰ Parámetros del sistema

CPU	Intel Xeon 12 cores
Cantidad de CPU	1
GPU 0	Quadro P2200
RAM	32448 M

Parámetros de precisión

Estado de POS

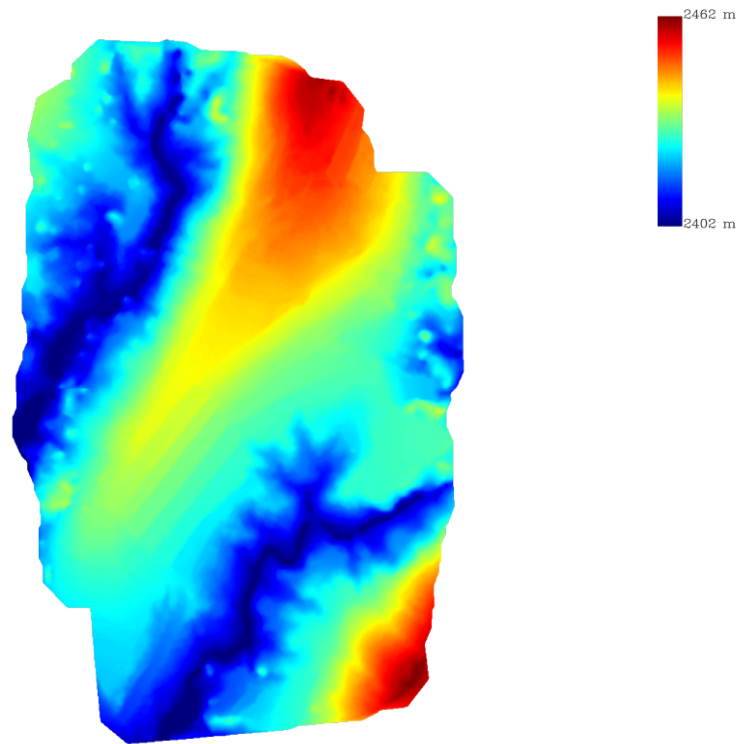
Fijo	100.00%
Otros	0.00%

Error de trayectoria de IMU

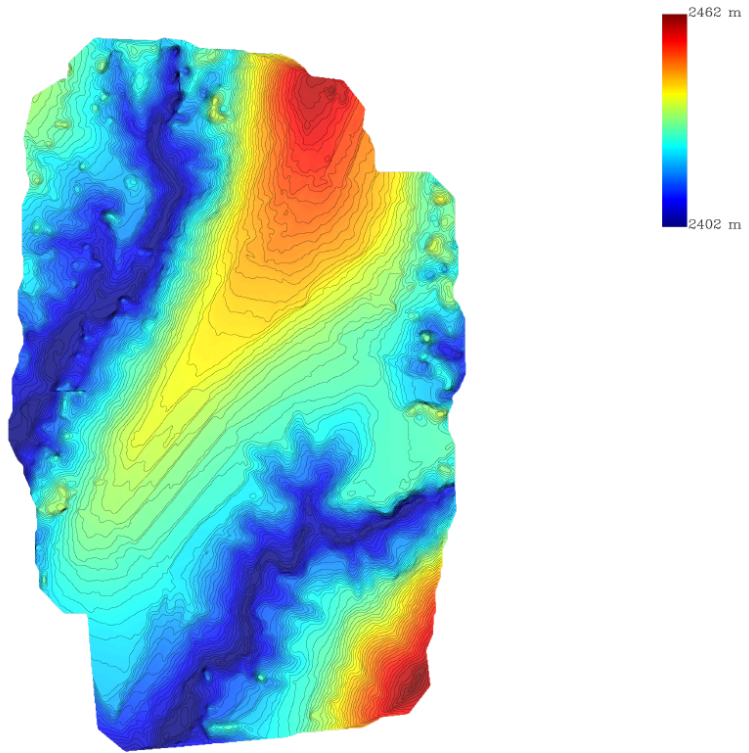
Parámetros	X(E) RMSE	Promedio X(E)	Y(N) RMSE	Promedio Y(N)	Z(U) RMSE	Promedio Z(U)
Ubicación	0.0001 m	0.00578 m	0.00009 m	0.00563 m	0.0001 m	0.00579 m
Posición	0.0000085 rad	0.0001897 rad	0.000005 rad	0.0001847 rad	0.0000651 rad	0.0004973 rad

Vista previa de salida

DEM



Contorno



Parámetros de salida

Densidad de nube de puntos

Escala	Densidad media de la nube de puntos	Densidad estándar de la nube de puntos	Longitud del lado de la cuadrícula	Número total de cuadrículas	Relación de cuadrícula no conforme
1:500	393puntos/m ²	16puntos/m ²	0.25 m	1142020	3.76%
1:1000	393puntos/m ²	4puntos/m ²	0.5 m	293976	2.88%
1:2000	393puntos/m ²	1puntos/m ²	1 m	75280	2.97%

Lista de resultados

nube de puntos **PNTS** LAS

DEM **GeoTIFF**

Contorno **SHP** DXF

Anexo 6. Bitacoras

Definición del Objetivo	Nombre del Proyecto	
	Propósito de uso de los datos:	
	Tipo de levantamiento	
	Sistema Geodésico:	
	Trabajos a Realizar:	
	Resolución espacial	
	Caracterización del área de estudio	
	Ubicación:	
	Área total:	
	Altitud:	
	Presencia de cuerpos de agua:	
	Clima:	
Rasgos visibles:		

PLANEACIÓN	Plan de vuelo Fotogramétrico		Plan de vuelo LiDAR	
	Plataforma:		Plataforma:	
	Sensor		Sensor	
	Control y Software		Control y Software	
	Altura constante:		Altura constante:	
	Velocidad:		Velocidad:	
	Superposición lateral:		Superposición lateral (visible):	
	Superposición frontal:			
			Superposición lateral (LiDAR):	
	Modo foto:		Modo foto:	
	GSD:		GSD:	
			Modo de retorno:	
			Tasa de muestreo:	
			Modo de exploración:	
			Adición de color RGB:	
Densidad de la nube de puntos:				
Distancia:		Distancia:		
Tiempo estimado:		Tiempo estimado:		
Área:		Área:		

PLANEACIÓN	Control Terrestre Fotogramétrico	
	Sistema de coordenadas:	
	Técnica de recolección:	
	Número de puntos y distribución	
	Señalamiento:	
	Otros factores	
	Permisos:	
	Factores de riesgo:	
	Fecha prevista:	
	Estado del tiempo:	
	Hora prevista:	

TRABAJO DE CAMPO	Levantamiento del Control Terrestre Fotogramétrico		Levantamiento del Control Terrestre LiDAR	
	Localizar			
	Señalar			
	Medir			
	Reseñar			
	Ejecución del vuelo	Fotogramétrico	LiDAR	
	Colocar Base RTK			
	Abrir el plan de vuelo			
	Ejecutar vuelo			
	Respaldo de los datos	Fotogramétrica	LiDAR	
	Nombre de la misión:			
	Número de archivos:			
	Tipo de archivos:			
	Tamaño:			