

**LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO COMBINANDO RTK Y
VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO PARA EL PROYECTO
DEL TRAMO DE CARRETERA SAN SILVESTRE - EL
PUEBLITO.****TOPOGRAPHIC SURVEY COMBINING RTK AND UNMANNED AERIAL
VEHICLE FOR THE SAN SILVESTRE - EL PUEBLITO ROAD PROJECT.****Autores****Josselyn Rosario Alava Mendoza**

Est., Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

jalava3963@utm.edu.ec ,<https://orcid.org/0009-0009-3495-2169>**Ingrid Julissa Menéndez Gilces**

Est., Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

imenendez5297@utm.edu.ec<https://orcid.org/0009-0003-0454-5876>**Eduardo Tejeda Piusseaut**

PhD., Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

eduardo.tejeda@utm.edu.ec<https://orcid.org/0000-0002-0589-9989>**Senén José Casquete Cedeño**

Magister, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

ccsenenjose@hotmail.es<https://orcid.org/0009-0000-1909-9176>

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO COMBINANDO RTK Y VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO PARA EL PROYECTO DEL TRAMO DE CARRETERA SAN SILVESTRE - EL PUEBLITO.

RESUMEN

Se realizó el levantamiento topográfico del tramo vial San Silvestre–El Pueblito mediante la integración de tecnologías GNSS-RTK y vehículos aéreos no tripulados (UAV). La aplicación combinada de estos sistemas permitió obtener mediciones de alta precisión tanto en el ámbito planimétrico como altimétrico, optimizando significativamente el proceso en comparación con los métodos tradicionales. El trabajo se desarrolló en dos fases. En campo, se establecieron bases geodésicas y puntos de control mediante RTK, complementados con vuelos fotogramétricos para la captura de imágenes de alta resolución. En gabinete, los datos fueron procesados con software especializado, generando productos topográficos de alta calidad, como curvas de nivel, perfiles de elevación y ortofotos georreferenciadas. Los resultados evidenciaron una notable mejora en la precisión y una reducción significativa en los tiempos y costos de levantamiento. El margen de error promedio fue de 0,875 cm en el componente horizontal y 1,575 cm en el vertical, de acuerdo con la comparación de precisión horizontal y vertical en levantamientos RTK, considerando la distancia y el modelo de error (PPM) del equipo Trimble R8. En conclusión, la integración de tecnologías RTK y UAV representa una metodología eficiente y viable para proyectos viales, especialmente en zonas de difícil acceso, contribuyendo al avance tecnológico y la modernización de los procesos topográficos en ingeniería civil.

Palabras claves: Drones, fotogrametría, levantamiento topográfico, precisión, RTK.

ABSTRACT

A topographic survey of the San Silvestre–El Pueblito road section was carried out through the integration of GNSS-RTK and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technologies. The combined application of these systems enabled the acquisition of highly accurate planimetric and altimetric measurements, significantly optimizing the process compared to conventional methods. The work was developed in two phases. In the field phase, geodetic bases and control points were established using RTK, complemented by photogrammetric flights to capture high-resolution images. In the office phase, the data were processed using specialized software to generate high-quality topographic products, such as contour lines, elevation profiles, and georeferenced orthophotos. The results showed a significant improvement in accuracy and a considerable reduction in survey time and costs. The average margin of error was 0.875 cm in the horizontal component and 1.575 cm in the vertical component, according to the comparison of horizontal and vertical accuracy in RTK surveys as a function of distance and the error model (PPM) of the Trimble R8 equipment. In conclusion, the integration of RTK and UAV technologies constitutes an efficient and viable methodology for road projects, particularly in areas with difficult access, contributing to the technological advancement and modernization of topographic processes in civil engineering.

Keywords: Drones, photogrammetry, topographic survey, accuracy, RTK.

Nota Editorial: Recibido: 16 de Septiembre 2025 Aceptado: 4 de Noviembre 2025

1. INTRODUCCIÓN

La fotogrametría, entendida como la disciplina que permite obtener dimensiones, formas y posiciones de los objetos a partir de imágenes, se ha consolidado como una de las metodologías más relevantes para la medición y representación espacial en el ámbito de los levantamientos topográficos. Su desarrollo ha sido impulsado por la incorporación de tecnologías digitales, sistemas de posicionamiento satelital y potentes herramientas de procesamiento informático, lo que ha permitido alcanzar niveles de precisión y eficiencia impensables en décadas anteriores. Esta evolución tecnológica ha transformado la forma de concebir los trabajos topográficos, ofreciendo alternativas más ágiles, seguras y económicamente competitivas frente a los métodos tradicionales.

No obstante, persiste el debate en torno al nivel de exactitud y confiabilidad que ofrecen herramientas como el RTK (Real Time Kinematics) y los vehículos aéreos no tripulados (VANT o dron). Si bien estas tecnologías presentan ventajas evidentes en términos de rapidez, cobertura y versatilidad, su desempeño depende en gran medida de factores operativos, ambientales y de procesamiento. Por esta razón, la investigación científica ha buscado determinar con mayor rigor las condiciones en las que su aplicación resulta más eficiente, y los parámetros necesarios para garantizar la calidad de los productos generados.

Diversos estudios han evidenciado que la integración de sistemas RTK GNSS con drones permite ampliar la cobertura en menor tiempo y mejorar la precisión altimétrica, cuando se emplea procesamiento especializado con programas como Agisoft Metashape [1]. A nivel internacional, la combinación de RTK y fotogrametría con dron ha demostrado generar resultados con márgenes de error menores en comparación con métodos convencionales, lo que ha impulsado su aplicación en áreas como la agricultura de precisión, la cartografía, la inspección de infraestructuras y la conservación ambiental. En esta misma línea, [2] demostraron que la integración de sensores LiDAR y cámaras, asistida por sistemas GNSS/INS, permite obtener modelos tridimensionales con mayor densidad y precisión, incrementando la calidad geométrica de los productos y ampliando su aplicabilidad práctica en diversos entornos operativos.

La ingeniería, en su constante proceso de evolución, demanda tecnologías que permitan ejecutar trabajos con mayor rapidez, cobertura y eficiencia, respondiendo a las exigencias de un mercado cada vez más competitivo. En este marco, la presente investigación incorpora el uso de un dron de gama media-alta con capacidad para cubrir hasta 100 hectáreas por jornada bajo condiciones operativas adecuadas. Esta herramienta se adapta de manera eficiente a levantamientos fotogramétricos de mediana escala, sin requerir sistemas de navegación de gran complejidad, constituyendo así una alternativa técnica viable y coherente con los objetivos planteados.

Finalmente, se reconoce que los drones aplicados a la fotogrametría representan una solución eficaz para levantamientos en zonas de difícil acceso [3]. La posibilidad de generar nubes de puntos densas en tiempos reducidos supone una ventaja frente a métodos tradicionales como la estación total digital. No obstante, esta eficiencia operativa está vinculada a la precisión en la captura y procesamiento de los datos, aspecto fundamental para garantizar la calidad, confiabilidad y aplicabilidad de los resultados obtenidos.

Con el fin de optimizar la comunicación entre los cantones Sucre y Portoviejo, en Ecuador, se ha planteado un proyecto vial que conecta las comunidades de San Silvestre y El Pueblito. Esta nueva vía permitirá reducir las distancias de recorrido, favoreciendo el transporte de mercancías al disminuir los tiempos de desplazamiento. En este contexto, el objetivo del presente estudio es demostrar la aplicabilidad y precisión del levantamiento topográfico mediante el uso combinado de un sistema RTK y un vehículo aéreo no tripulado (dron), generando un plano topográfico del tramo San Silvestre – El Pueblito que sirva como base técnica para la formulación del proyecto vial. Además, se busca aportar al desarrollo regional de los cantones involucrados y establecer recomendaciones técnicas que optimicen tanto la captura de información en campo como el procesamiento fotogramétrico, contribuyendo así al fortalecimiento de futuras investigaciones y obras de infraestructura similares.

2. DESARROLLO

El sistema RTK, ampliamente reconocido por su alta precisión y confiabilidad en la obtención de datos geospaciales, ha sido objeto de múltiples investigaciones y mejoras, particularmente mediante el uso de técnicas en red que refuerzan la integridad del posicionamiento [4].

Durante la planificación se definieron objetivos específicos relacionados con el nivel de precisión requerido, la extensión del tramo a cubrir y los productos finales esperados, entre los que se incluyeron perfiles de elevación, ortofotos y curvas de nivel. El trabajo se estructuró en dos fases: en campo, se realizaron las mediciones, la captura de imágenes aéreas y la recolección de datos; mientras que en gabinete se llevó a cabo el procesamiento de la información obtenida, generando los modelos topográficos y consolidando los productos finales necesarios para la investigación.

Como resultado del desarrollo del estudio, se obtuvieron los siguientes productos y beneficios:

- Plano topográfico del tramo San Silvestre – El Pueblito, elaborado mediante el uso combinado de un vehículo aéreo no tripulado (dron) y el sistema RTK, lo que permitió garantizar precisión en la representación planimétrica y altimétrica del terreno.
- Aporte al desarrollo de los cantones Portoviejo y Sucre, dado que el levantamiento topográfico constituye la base técnica para la formulación de un futuro proyecto vial que contribuirá a mejorar la conectividad y la infraestructura regional.
- Recomendaciones técnicas sobre la aplicación de estas tecnologías, orientadas a optimizar la recolección de información en campo, el procesamiento en gabinete y la extracción de datos topográficos, las cuales pueden servir de referencia para investigaciones o proyectos viales similares.

La Figura 1 muestra el mapa de ubicación del proyecto, elaborado en el software ArcMap, en el que se representa la alternativa de trazado vial propuesta identificada como tramo 1— junto con la ruta actualmente en uso, denominada tramo 2—. El objetivo principal del nuevo trazado es facilitar el transporte de productos agrícolas y comerciales, contribuyendo así a dinamizar la economía local y a impulsar el desarrollo regional mediante la integración de mercados y el acceso a nuevas oportunidades productivas.

De acuerdo con el análisis realizado, la nueva alternativa se presenta como la opción más favorable, ya que ofrece una mejor conexión entre los puntos estratégicos de la zona. Además de optimizar la conectividad territorial, permite reducir los tiempos de desplazamiento y mejorar el acceso a servicios básicos. Al tratarse de un trazado más corto y con menor grado de sinuosidad, contribuye a disminuir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes, promoviendo así una movilidad más eficiente y sostenible.

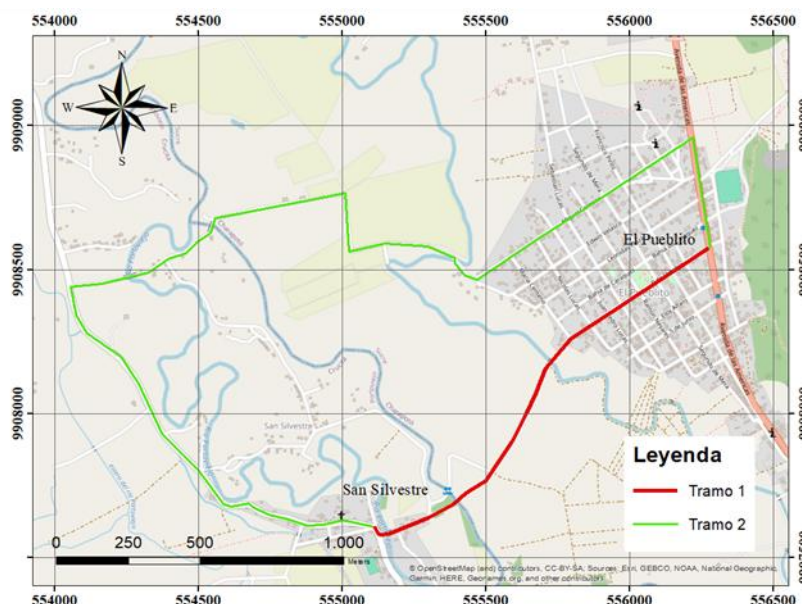


Fig. 1— Ubicación de las alternativas de trazado entre San Silvestre y El Pueblito (ArcMap)

2.1. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Este proceso incluyó la verificación de la disponibilidad y el estado técnico de los equipos e instrumentos requeridos para las mediciones, así como la comprobación del adecuado funcionamiento de los equipos de cómputo, el software y las bases de datos destinados al procesamiento y análisis de la información.

De manera complementaria, se efectuó un análisis preliminar del tramo de carretera objeto de estudio, considerando el tipo de equipos disponibles y su correcta utilización. Dicho análisis contempló la evaluación del estado actual de la vía, las características físicas del tramo y otros aspectos técnicos relevantes.

Los equipos y herramientas empleados en el proyecto fueron los siguientes: un receptor GNSS de alta precisión Trimble R8, un vehículo aéreo no tripulado (dron) DJI Phantom 4 Pro V2.0 y un nivel óptico para control y verificación de campo. En cuanto al procesamiento y análisis de la información, se utilizaron los programas Trimble Business Center, Agisoft Metashape y Autodesk Civil 3D, los cuales permitieron integrar, procesar y representar los datos topográficos obtenidos de manera precisa y eficiente.

2.2. ETAPA 1. TRABAJO DE CAMPO

En la primera etapa del proyecto se ejecutaron los trabajos orientados a la creación de una base de puntos geodésicos mediante la tecnología RTK (Real Time Kinematic). Esta metodología permitió obtener una densificación precisa de los puntos de control, fundamentales para garantizar la exactitud en las mediciones planimétricas y altimétricas del tramo de carretera. La base geodésica así establecida sirvió como referencia para el levantamiento topográfico, asegurando la consistencia y precisión de los datos recopilados durante las operaciones en campo y el procesamiento posterior en gabinete.

La etapa de trabajo en campo incluye también el levantamiento mediante el vehículo aéreo no tripulado (dron), lo que implica la planificación previa del vuelo, la colocación de los puntos de control terrestre y la ejecución del vuelo con el dron.

2.2.1. INSPECCIÓN DEL ÁREA

Para evaluar las características físico-geográficas del terreno y determinar la mejor ubicación de los puntos de referencia, se planificó y ejecutó una visita de campo preliminar en el área del proyecto. Durante esta inspección se identificaron aspectos relevantes del terreno, como la topografía, la cobertura vegetal, accesos y posibles obstáculos, lo que permitió seleccionar los sitios más adecuados para la colocación de los puntos de control. Esta planificación anticipada facilitó la organización del trabajo de campo, asegurando que las mediciones posteriores se realizaran de manera eficiente.

2.2.2. COLOCACIÓN DE LA BASE

Las bases geodésicas funcionan como puntos fijos de referencia desde los cuales se miden las coordenadas y se generan modelos precisos del terreno. Estas bases se determinan mediante métodos de posicionamiento geodésico, utilizando tecnología GNSS bajo distintas modalidades de observación, tales como el método estático y RTK (Real-Time Kinematic), técnicas que permiten aumentar la exactitud de las coordenadas, reducir errores y asegurar una correcta georreferenciación de los datos adquiridos [5].

Para garantizar la precisión del levantamiento topográfico, se establecieron dos puntos de base estratégicos en la zona de estudio. La base principal, ubicada en El Cerrito, se determinó mediante el método de observación estática prolongada, registrando datos desde un punto fijo durante más de una hora. Posteriormente, estos datos fueron corregidos mediante postprocesamiento con información oficial mostrada en la tabla 1, proveniente de la estación CNEC, ubicada en el Auditorio de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, campus Chone, perteneciente a la Red Geodésica de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME), operada por el Instituto Geográfico Militar. Ver imagen en la Figura 2.

El tiempo mínimo de observación necesario para garantizar la precisión requerida fue calculado aplicando la siguiente fórmula técnica, asegurando que los datos de posicionamiento cumplieran con los estándares de exactitud exigidos para proyectos de ingeniería vial.

$T = 30 \text{ min} + 2 \text{ min} * \text{cada kilómetro hasta la estación IGM}$ [6].

Tabla 1. Coordenadas geográficas y elevación de la Estación CNEC (Instituto Geográfico Militar) [7].

LISTA DE ESTACIÓN PERMANENTE REGME					
No. PUNTO	SITIO	COORDENADAS		ELEVACIÓN	CÓDIGO
		X	Y		
IGM	CHONE	599786.223	9922843.881	42.478	CNEC

Tras evaluar las estaciones disponibles (Figura 2), se determinó que la más cercana al Sitio San Silvestre era la estación CNEC, dado que la estación POEC de Portoviejo no se encontraba activa el día del procesamiento de la información. La distancia entre el punto de base y la estación CNEC era de aproximadamente 25 kilómetros, por lo que se aplicó un tiempo mínimo de observación de 80 minutos, considerado suficiente para garantizar la fiabilidad posicional del punto y cumplir con los estándares de precisión requeridos para el levantamiento topográfico.



Fig. 2— Localización de la estación CNEC del cantón Chone (Instituto Geográfico Militar) [7].

En la Tabla 2 se presenta la ubicación de la base en El Cerrito, esta localización fué seleccionada por la existencia de un proyecto previo en la cercanía y por el aprovechamiento de la altitud natural del sitio. No obstante, se determinó que la base no garantizaba una cobertura adecuada en toda el área de trabajo debido a su posición relativa.

Tabla 2— Puntos de base. Coordenadas planas rectangulares.

LISTA DE PUNTOS DE BASE					
N PUNTO	SITIO	COORDENADA		ELEVACIÓN(m)	CÓDIGO
		X	Y		
300	CERRITO	557030.4430	9900644.1950	65.4210	BASE
105	EL PUEBLITO	556287.9380	9908602.6770	25.9640	BASE

Posteriormente, se estableció una nueva estación base en el sector de El Pueblito, ubicada en la terraza de una edificación de dos pisos. Esta localización ofreció condiciones óptimas de visibilidad y recepción de señales satelitales, lo que permitió incrementar la precisión del levantamiento.

La correcta selección de la estación base, con adecuada visibilidad y recepción de señales GNSS, resulta fundamental para garantizar resultados consistentes en aplicaciones de posicionamiento en tiempo real, asegurando mediciones con precisión suficiente para los objetivos del proyecto. Esta estrategia fue clave para mantener una cobertura satelital continua y evitar pérdidas de precisión, en zonas montañosas o con presencia de obstáculos físicos [8].

La combinación de estaciones principales y complementarias aseguró una cobertura amplia y estable, mejorando significativamente la calidad de los levantamientos topográficos y fotogramétricos mediante el uso de RTK, lo que resultó esencial para la generación de curvas de nivel y modelos digitales del terreno [9].

2.2.3. POLIGONAL

Para el proyecto San Silvestre - El Pueblito, se levantó una poligonal abierta empleando equipos GNSS en modo RTK, registrando puntos enlazados que representan con precisión el trazado lineal de la vía. Los vértices correspondientes a los cambios de alineación fueron definidos en campo de acuerdo con criterios topográficos y las condiciones propias del terreno.

Con el fin de garantizar la calidad y confiabilidad de las mediciones, se realizó una verificación de los datos GNSS mediante métodos complementarios, que incluyeron puntos GPS, levantamientos estáticos y nivelación/contra nivelación. Este procedimiento permitió contrastar alturas y asegurar la obtención de información precisa y consistente, en concordancia con los principios establecidos en la literatura especializada en topografía y geomática [10].

En la Tabla 3 se presentan los puntos de referencia distribuidos a lo largo del trazado vial, los cuales resultan esenciales para complementar y validar el levantamiento topográfico. Estos puntos permiten comprobar la precisión de las coordenadas registradas, contrastándolas con valores previamente determinados. A diferencia de los puntos base, que funcionan como origen principal de la medición, los puntos de referencia se ubican estratégicamente en el área de trabajo y se emplean para comparar y ajustar los resultados obtenidos mediante técnicas fotogramétricas.

Tabla 3. Puntos de referencia. Coordenadas planas rectangulares.

LISTA DE REFERENCIAS					
N PUNTO	SITIO	COORDENADA		ELEVACIÓN (m)	CÓDIGO
		X	Y		
508	San Silvestre	555153.48	9907583.46	13.801	REFERENCIA
509	San Silvestre	555109.13	9907474.2	9.983	REFERENCIA
510	San Silvestre	555246.71	9906967.97	10.647	REFERENCIA
551	San Silvestre	555387.18	9907692.19	12.342	REFERENCIA
552	San Silvestre	555717.97	9908180.23	15.622	REFERENCIA
553	El Pueblito	556285.12	9908583.71	19.258	REFERENCIA

2.2.4. NIVELACIÓN Y CONTRANIVELACIÓN

En el estudio, la nivelación permitió determinar las alturas relativas entre los distintos puntos del terreno mediante el uso de un nivel óptico para registrar las diferencias de elevación. Como método de control, se aplicó la contranivelación, consistente en repetir las mediciones en sentido inverso sobre las mismas trayectorias, con el fin de detectar y corregir posibles errores sistemáticos. Este procedimiento garantiza la fiabilidad y precisión de los datos de elevación.

2.2.5. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO MEDIANTE RTK

El método RTK (Cinemática en Tiempo Real) se emplea ampliamente en proyectos que demandan precisión elevada, como estudios de infraestructura vial, catastros, monitoreo estructural y delimitación de predios [11]. Este procedimiento utiliza la trilateración para calcular con exactitud la posición de los objetos a partir de la geometría de distancias. Gracias a la tecnología GNSS, la técnica permite obtener coordenadas georreferenciadas con precisión centimétrica, tanto en 2D como en 3D, lo que resulta fundamental para el levantamiento de campo [12].

En este estudio se utilizó el receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) Trimble R8, que ofrece una precisión de 8 mm + 0,5 ppm en horizontal y 15 mm + 0,5 ppm en vertical bajo RTK de red [13].

Para evaluar la precisión del levantamiento RTK con el receptor Trimble R8, se realizó una observación a una distancia de 1.5 km, tomando como referencia un punto previamente georreferenciado. Este procedimiento

Tabla 4— Comparativa de precisión horizontal y vertical en levantamientos RTK en función de la Distancia y el Modelo de Error (PPM) en base al equipo Trimble R8

Tipo de Precisión	Distancia (km)	Error base(mm)	PPM	Error total (mm)	Error (cm)
Horizontal	1.5	8	0.5	8.75	0.875
Vertical	1.5	15	0.5	15.75	1.575

La eficacia del sistema RTK se basa en la transmisión continua de datos desde la estación base hacia el receptor móvil, lo que permite corregir los errores propios de la señal satelital, como los ionosféricos, troposféricos y de reloj. El levantamiento RTK se llevó a cabo empleando dos receptores GNSS: una estación base fija, ubicada sobre un punto de coordenadas previamente conocidas, y un receptor móvil (rover), encargado de registrar en tiempo real los datos geoespaciales durante su desplazamiento por el área de estudio [14].

Durante la fase de planificación y preparación, una vez determinada la ubicación de la estación base en un sitio con coordenadas georreferenciadas conocidas, instalada en un punto estable y libre de interferencias, el equipo es configurado con la calibración correspondiente. Finalmente, se encendió el receptor móvil o (rover), estableciendo la comunicación con la base mediante un radio módem.

Durante la adquisición de datos, el operador recorrió la vía registrando puntos de interés tales como dispositivos estructurales de la calzada, cunetas, árboles, postes, áreas edificadas, bordillos, linderos y otros elementos relevantes. Cada coordenada fue registrada en tiempo real con una duración de 1 segundo y precisión de 1 a 2 cm, gracias a la corrección diferencial suministrada por la estación base IGM [15].

Adicionalmente, se aplicaron técnicas de post-procesamiento a los datos recolectados mediante RTK. En los sectores donde la cobertura satelital no fue constante, las observaciones se almacenaron sin corrección en tiempo real, para posteriormente ser ajustadas con el software especializado Trimble Business Center, lo que incrementó la confiabilidad de los resultados finales.

Los datos obtenidos en el levantamiento topográfico se contrastaron con las coordenadas de puntos de control geodésico previamente establecidos, tanto de un proyecto cercano como de referencias oficiales del Instituto Geográfico Militar (IGM). Esta verificación permitió validar la precisión posicional alcanzada y asegurar la coherencia del modelo generado, en concordancia con las buenas prácticas geoespaciales descritas en estudios recientes [16].

2.2.6. LEVANTAMIENTO CON VUELO DE VANT (DRON)

La fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (Dron) se ha consolidado en los últimos años como una alternativa eficiente y precisa para la obtención de productos topográficos de alta resolución en plazos reducidos. Según [17], esta técnica permite obtener información altimétrica, curvas de nivel y detalles planimétricos del área de interés al combinar métodos topográficos tradicionales como el posicionamiento estático para la georreferenciación con la fotogrametría aérea, utilizada para la generación de modelos digitales del terreno.

El levantamiento se desarrolló en tres fases principales:

2.2.6.1. PLANIFICACIÓN DEL VUELO

Previo a la ejecución del levantamiento, se diseñó un plan de vuelo detallado con el fin de garantizar una cobertura completa y homogénea del área de estudio. La superposición de imágenes constituye un factor crítico para la calidad de los resultados. De acuerdo con [18], la superposición vertical influye directamente en la calidad del ortomosaico. Asimismo, [19] resalta que la definición de traslapes frontales y laterales óptimos depende de parámetros como la altura de vuelo, la resolución espacial (GSD), la distancia focal del sensor y la morfología del terreno.

Una superposición insuficiente compromete la reconstrucción precisa de la superficie, mientras que un traslape excesivo incrementa de manera innecesaria los tiempos de vuelo y el volumen de procesamiento de datos. Para este levantamiento se definieron parámetros geométricos fundamentales: una altura de vuelo de 120 m, traslape frontal y lateral del 75% y dirección de vuelo de 90°, condiciones que favorecieron la obtención de información detallada y con alta precisión.

La planificación del vuelo se llevó a cabo mediante la aplicación PIX4Dcapture, que permitió automatizar la misión configurando la trayectoria del dron, la altura, la velocidad de vuelo y la secuencia de disparo de la cámara. Esta automatización aseguró un control estricto sobre la calidad y cantidad de imágenes, facilitando la producción de resultados confiables en etapas posteriores. Además, la aplicación estableció de manera automática las líneas de vuelo y el punto de inicio, optimizando el proceso de adquisición de datos. Para garantizar condiciones adecuadas, los vuelos se realizaron en jornadas con cielo despejado y mínima presencia de viento, siguiendo las recomendaciones técnicas habituales en este tipo de trabajos.

2.2.6.2. UBICACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL

Se implementaron puntos de control terrestre (GCPs), georreferenciados con tecnología GNSS en el sistema de coordenadas UTM Zona 17S y datum WGS84. Los GCPs fueron medidos mediante el método de posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK) y procesados en el software Trimble Business Center. Este procedimiento resultó esencial para garantizar la calidad geométrica del modelo y reducir errores de posicionamiento. [20] destacan que una distribución estratégica y medición precisa de los puntos de control incrementa notablemente la exactitud de los modelos generados, sobre todo en zonas con alta variabilidad topográfica.

Los puntos fueron distribuidos de manera estratégica en la zona de estudio. En la Tabla 5 se presentan las coordenadas y elevaciones obtenidas mediante RTK. Estos puntos, también denominados puntos de apoyo fotogramétrico (PAF), se señalaron con lonas reflectivas de 1.20 × 1.20 m, lo que facilitó su identificación en las imágenes aéreas (Figura 3). Según [21], los GCPs contribuyen significativamente a la precisión de la georreferenciación, incluso en vuelos con cámaras oblicuas o trayectorias en cuadrícula. De igual manera, [22] subrayan que el uso de GCPs constituye el factor más determinante para la precisión final del Modelo Digital de Elevación (DEM), especialmente cuando se complementa con sensores de calidad y una adecuada altura de vuelo.



Fig. 3- Lonas reflectivas para puntos de control.

Tabla 5-Lista de Puntos de control. Coordenadas planas rectangulares.

N PUNTO	SITIO	COORDENADA		ELEVACIÓN (m)	CÓDIGO
		X	Y		
63	El Pueblito	556125.7000	9908457.2800	14.6400	Punto de control
131	El Pueblito	555817.9270	9908293.1719	11.3500	Punto de control

2.2.6.3. EJECUCIÓN DEL VUELO

La ejecución de los vuelos se realizó con un dron DJI Phantom 4 Pro V2.0, siguiendo las misiones previamente planificadas y abarcando las zonas de El Pueblito (cantón Portoviejo) y San Silvestre (cantón Sucre). Durante la captura de imágenes se prestó atención adecuada a elementos relevantes como los trazados viales y las estructuras existentes, los cuales se registraron con claridad suficiente para el análisis.

Ambos vuelos se efectuaron bajo el método GRID MISSION (Figura 4), diseñado para la captura fotográfica en 2D mediante un patrón de cuadrícula que garantiza una cobertura uniforme del área de estudio. Las imágenes fueron adquiridas con orientación nadiral (cámara en posición vertical respecto al terreno) y con coordenadas geográficas aproximadas proporcionadas por el sistema GNSS incorporado en el equipo.

La operación se desarrolló de manera completamente autónoma mediante la aplicación PIX4Dcapture, que controló la altura de vuelo, la velocidad, las rutas y los puntos de captura de acuerdo con los parámetros definidos en la fase de planificación. La precisión geométrica del ortomosaico generado se reforzó con la incorporación de puntos de control terrestre, cuya influencia en la exactitud posicional ha sido ampliamente validada en estudios previos [23].



Fig. 4. Imágenes del Dron marca DJI modelo PHANTOM 4PRO V2.0.

En la Tabla 6 se presenta el resumen de las características de las misiones realizadas, que abarcaron una cobertura total de 49.27 hectáreas mediante vuelos a una altura constante de 120 m sobre el punto de despegue. Se obtuvieron 445 imágenes entre ambos vuelos, con una resolución promedio de 2,47 cm/píxel (GSD). Durante la operación se mantuvo una velocidad constante de 10 m/s, lo que permitió registrar imágenes bien expuestas y con el traslape y la cobertura adecuados para garantizar la calidad del procesamiento posterior. Este nivel de precisión y control resultó fundamental para obtener productos confiables en la reconstrucción tridimensional del terreno.

Tabla 6- Características de las misiones fotogramétricas. Altura de vuelo de 120m y velocidad de 10 m/seg

No.	Sitio	Misión	Área de vuelos (Ha)	Tiempo estimado por vuelo (min)	Batería por vuelo	Cantidad de Imágenes	GSD (m/pixiles)
1	El Pueblito (Portoviejo)	1	22.90	14.59	1	205	2.47
2	San Silvestre (Sucre)	1	26.37	17.24	1	240	2.47

2.3. ETAPA 2. TRABAJO DE GABINETE

2.3.1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES, GENERARON ORTOFOTOS Y MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

El procesamiento de las imágenes capturadas durante los vuelos se realizó mediante el software Agisoft Metashape, especializado en aerotriangulación automatizada, con el objetivo de generar productos fotogramétricos de alta precisión.

En una primera fase, las imágenes se visualizaron y organizaron cronológicamente, lo que permitió identificar el trayecto del dron y el patrón de traslape aplicado, diseñado para garantizar una cobertura densa y homogénea. Aunque inicialmente no estaban georreferenciadas con precisión, los datos GNSS aproximados del dron y la orientación nadiral facilitaron la identificación de la secuencia de captura. Posteriormente, se efectuó la orientación fotográfica inicial, conservando los parámetros predeterminados del software, lo que permitió generar una nube de puntos dispersa que representaba tridimensionalmente los elementos fotografiados, aunque con baja densidad y vacíos en algunas zonas.

Para mejorar la precisión del modelo, se importaron los puntos de control terrestre obtenidos mediante GNSS en modo RTK. Previamente, se configuró el sistema de coordenadas del proyecto (UTM Zona 17S, datum WGS84), transformando las coordenadas geográficas del dron en coordenadas métricas (Este, Norte y Elevación). Los GCPs fueron ubicados manualmente en las imágenes mediante la herramienta de marcadores del software, posicionándolos con exactitud sobre las lonas reflectivas visibles. A medida que se marcaban, el software detectaba automáticamente coincidencias adicionales, agilizando el proceso. Finalizada esta etapa, se ejecutó la optimización de la cámara, ajustando los parámetros internos y externos en función de los puntos establecidos.

Con esta configuración se generó una nube densa de puntos, que representó con mayor detalle la superficie levantada. A partir de ella se construyó una malla tridimensional texturizada, utilizando la información cromática de las fotografías. Posteriormente, se generó el Modelo Digital de Elevación, del cual se derivan el Modelo Digital de Superficie y el Modelo Digital del Terreno. Estos modelos, en formatos 2D y 3D, representan las variaciones altimétricas y codifican los cambios de elevación mediante escalas de colores, lo que facilita la interpretación de las zonas altas y bajas del terreno [24].

A partir del modelo digital se generó una ortofoto libre de distorsiones geométricas, escalada de manera adecuada y georreferenciada. El ortomosaico del área obtenido se muestra en la Figura 5. Posteriormente, se clasificaron los puntos y se elaboraron curvas de nivel con equidistancia adaptada a la morfología del terreno: más cerrada en superficies planas y más amplia en zonas inclinadas, evitando la saturación visual.

Es importante destacar que, aunque la ortofoto y la planimetría presentan alta precisión, la altimetría derivada de la fotogrametría puede verse afectada si no se utilizan suficientes GCPs. En este estudio, al emplearse los puntos de control terrestre medidos con sistema GNSS en modo RTK, fue posible cuantificar los errores residuales del proceso de aerotriangulación en las componentes Este (X), Norte (Y) y Altitud (Z). Los resultados obtenidos, resumidos en la Tabla 7, mostraron errores cuadráticos medios (ECM) inferiores a 0.13 mm en todas las direcciones, con valores de 0.065 mm en X, 0.109 mm en Y y 0.024 mm en Z, evidenciando una excelente consistencia geométrica. Estos resultados confirman que la ortofoto y los Modelos Digitales de Elevación (MDE) alcanzaron una precisión acorde con los estándares topográficos de alta exactitud, validando la fiabilidad espacial de los productos obtenidos mediante el procesamiento fotogramétrico. No obstante, diversos estudios han evidenciado que la precisión vertical suele ser menor que la horizontal, por lo que en proyectos que requieren alta exactitud altimétrica se recomienda complementar con levantamientos topográficos convencionales [25]. De ahí la importancia de combinar vuelos de dron con equipos GNSS de precisión.

Finalmente, la ortofoto fue exportada en formato TIFF, garantizando alta calidad espacial. Posteriormente se convirtió a formato ECW mediante Global Mapper, optimizando su manejo en plataformas CAD como Autodesk Civil 3D. Esta conversión permitió insertar automáticamente el modelo digital en el entorno CAD del proyecto, facilitando la selección de coordenadas, la visualización a escala real y la integración precisa de la información topográfica en el diseño y análisis del proyecto.

Este tipo de levantamiento fotogramétrico permitió representar con detalle el relieve, interpretar la morfología y altitud del terreno, optimizar tiempos de trabajo en campo y reducir riesgos en zonas de difícil acceso, sin comprometer la calidad ni la resolución del producto final [26]. Estos drones al estar equipados con cámaras fotogramétricas son el completo perfecto para capturar taludes y áreas inaccesibles mediante vuelos automatizados brindando seguridad [27].

Tabla 7- ECM de puntos de apoyo.

No.	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Error en XY (mm)	Total (mm)
Total	0,0651967	0,109252	0,0243934	0,127227	0,129544



2.3.2. Fig. 5-Modelo digital de elevaciones y Ortofoto del vuelo el pueblito y San Silvestre

2.3.3. PERFIL LONGITUDINAL DE ELEVACIÓN

En el levantamiento topográfico realizado en el tramo comprendido entre *El Pueblito* y *San Silvestre*, se elaboró un perfil de elevación que refleja las variaciones del relieve a lo largo del eje vial. Esta representación altimétrica facilita la identificación de cambios de pendiente y de los puntos de mayor y menor altitud, información esencial para la planificación y ejecución del proyecto. Asimismo, el perfil longitudinal resulta fundamental en el análisis de movimiento de tierras, pues permite calcular los volúmenes de corte y relleno, definir el sistema de drenaje y detectar tramos del trazado donde puedan presentarse complicaciones geométricas o hidráulicas.

Los datos obtenidos en campo mediante GNSS RTK y fotogrametría con drones se procesaron en AutoCAD Civil 3D, software que permite integrar los datos topográficos, validar curvas horizontales y verticales según normas técnicas, aplicar controles de pendiente y generar perfiles y secciones transversales ajustadas a la geometría del terreno. Además, posibilita incorporar elementos complementarios, como curvas de nivel y cuencas de drenaje, optimizando el diseño y reduciendo errores derivados del cálculo manual [28,29].

Los datos se exportaron desde la colectora GNSS a Excel como registro original de los puntos levantados (Identificador del punto, coordenadas Norte y Este, elevación y código o referencia del elemento capturado en cada ubicación). Posteriormente, el archivo fue convertido a formato .csv, lo que facilitó su importación en plataformas CAD para continuar con el modelado topográfico. Una vez preparado, el archivo fue incorporado a Civil 3D, donde los puntos fueron procesados para generar una superficie topográfica en formato TIN (Triangulated Irregular Network). Esta superficie constituye la base para la representación tridimensional del terreno, permitiendo una visualización clara de la morfología del área de estudio.

A partir del modelo TIN se generaron curvas de nivel a intervalos regulares, lo que permitió interpolar con mayor precisión las variaciones del relieve, facilitando el análisis visual del terreno y la identificación de pendientes, cuencas y divisorias de aguas. Esta representación topográfica brindó una primera aproximación a las condiciones geométricas del área, factores que inciden directamente en el diseño del trazado vial. Con la superficie obtenida se definió la alineación del eje central de la vía, sobre la cual se apoyan los perfiles longitudinales y secciones transversales.

Mediante la herramienta de generación de perfiles de Civil 3D se elaboró el perfil longitudinal del terreno natural, reflejando las variaciones de elevación a lo largo del trazado y permitiendo identificar tramos que requieren cortes o rellenos para cumplir con las normas de pendiente máxima.

En el tramo San Silvestre (abscisa K 0+000 a K 0+995 km), mostrado en la Figura 6, el perfil natural se representa mediante una línea verde, evidenciando un trazado con pocas variaciones altimétricas. Se identifican tres puentes: los dos primeros generan ligeros cambios en la pendiente, provocando pequeñas alteraciones en la altura del terreno, mientras que el tercer puente presenta ascensos y descensos más pronunciados, con un perfil más irregular en comparación con los anteriores. Entre estas estructuras, el terreno mantiene un comportamiento relativamente constante, con un perfil uniforme que se prolonga hasta alcanzar un último sector con pendiente más marcada al final del tramo. En el tramo El Pueblito (abscisa K 0+995 a K 1+562.14 km), mostrado en la Figura 7, el perfil revela un ascenso gradual hacia el final del tramo. Esta descripción del estado actual del terreno, obtenida a partir del levantamiento topográfico, documenta con precisión la orografía existente.

De acuerdo con [30], la optimización del perfil longitudinal puede generar beneficios significativos, como una reducción del 6% en consumo energético y del 8% en el potencial de cambio climático global (PCA), impactando principalmente a vehículos pesados y articulados, por lo cual tiende a suavizar las pendientes ascendentes y descendentes, disminuyendo la energía disipada durante el frenado y mejorando la eficiencia energética general del transporte.

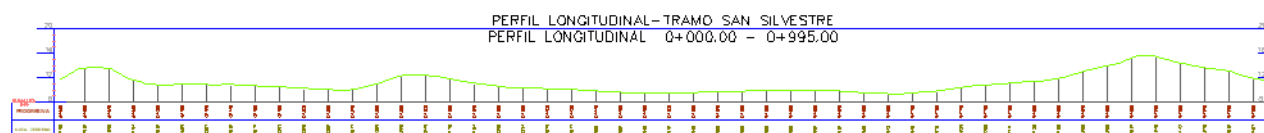


Fig. 6- Perfil de elevación del tramo San Silvestre. Escala 1-600

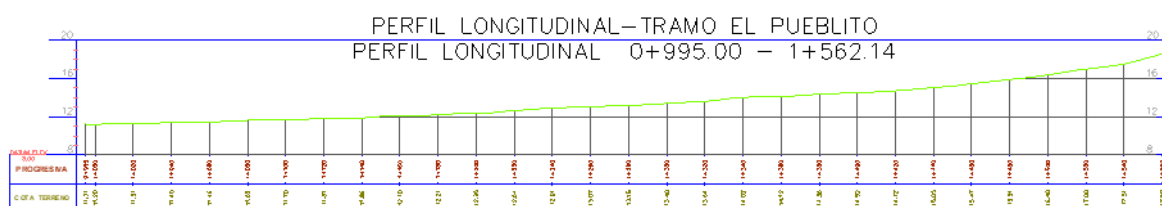


Fig. 7- Perfil de elevación del tramo el Pueblito. Escala 1-400

Con la alineación definida, se generaron las secciones transversales del terreno, distribuidas a lo largo de la vía a intervalos de 20 metros, obtenidas a partir de la intersección de la superficie del terreno con planos perpendiculares al eje. Estas secciones son fundamentales para definir ancho de calzada, bermas, taludes, analizar estabilidad en zonas de corte y relleno, y calcular volúmenes de movimiento de tierras.

La combinación del levantamiento RTK con el modelado en Civil 3D garantiza una representación confiable del terreno, optimizando análisis y diseño geométrico, reduciendo incertidumbres durante la planificación y construcción, y permitiendo la actualización dinámica de perfiles y secciones ante cualquier modificación de la alineación o de la superficie base.

3. CONCLUSIONES

La integración de GNSS en modo RTK y vehículos aéreos no tripulados (UAV) permitió cumplir los objetivos del levantamiento topográfico del tramo vial San Silvestre – El Pueblito, obteniendo mediciones de alta precisión planimétrica y altimétrica, con un margen de error promedio de 0.875 cm horizontal y 1.575 cm vertical, según la comparativa de precisión basada en el modelo de error PPM del equipo Trimble R8. Estos resultados confirman que el levantamiento alcanzó la precisión planificada.

La utilización de referencias oficiales del Instituto Geográfico Militar (IGM), junto con la correcta selección del punto base, garantizaron la confiabilidad geodésica y la estabilidad de las mediciones. La instalación estratégica de bases geodésicas y puntos de control terrestre (GCPs) permitió garantizar la exactitud de las mediciones y mejorar la densidad y precisión de las nubes de puntos generadas mediante procesamiento en Agisoft Metashape. Esto demuestra que la combinación de técnicas GNSS y fotogrametría es confiable para levantamientos topográficos de mediana escala.

La combinación de RTK y fotogrametría UAV posibilitó la generación de productos topográficos de alta calidad, incluyendo ortofotos georreferenciadas, curvas de nivel con equidistancia de 1 m, perfiles de elevación y modelos tridimensionales (MDE, MDS y MDT), esenciales para el análisis geométrico del terreno y la planificación del proyecto vial.

Adicionalmente, la estrategia aplicada optimizó los tiempos de campo, redujo costos operativos y disminuyó impactos ambientales, al limitar la movilización de equipos y personal en zonas de difícil acceso. Su desempeño en terrenos con variabilidad topográfica evidenció ventajas sustanciales frente a los métodos convencionales, aportando información geoespacial robusta para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura y contribuyendo a la modernización de los procesos de ingeniería civil en los cantones Portoviejo y Sucre.

1. Solis, J. E. B., Torres, L. M. C., & Paredes, B. G. P. (2022). Análisis comparativo topográfico sobre levantamientos altimétricos con RTK GNSS, Estación Total y Drone en Manta. *Polo del Conocimiento*, 7(12), 586–602.V
2. Zhou, T., Hasheminasab, S. M., & Habib, A. (2021). Tightly-coupled camera/LiDAR integration for point cloud generation from GNSS/INS-assisted UAV mapping systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180, 336–356. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.08.020>
3. Ballesteros Ruiz, R. D., Lordsleem Júnior, A. C., & Aquino Rocha, J. H. (2021). Inspeção de fachadas com veículos aéreos não tripulados (VANT): Estudo exploratório. *Revista ALCONPAT*, 11(1), 88–104. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.517>
4. Barbosa, E. D. M., Monico, J. F. G., Alves, D. B. M., & De Oliveira, L. C. (2010). Integridade no posicionamento RTK e RTK em rede. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 16(4), 589–605. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702010000400007>
5. Zafra Granados, Y. (2018). Manual para el postproceso de imágenes obtenidas a partir de una aeronave tripulada remotamente (DRONE) en los softwares Agisoft photoscan y Pix4d [Informe técnico]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/52d64f1d-5ce6-4481-b7fa-7fc4be1b9fdd/content>
6. Instituto Geográfico Militar (IGM). (2021). Geodesia – Manual completo de especificaciones técnicas (Levantamientos geodésicos, metodologías y consideraciones en campo) [Manual técnico]. Geoportal Ecuador. <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/normalizacion-tecnica/>
7. Instituto Geográfico Militar (IGM). (2023). Geodesia –Ficha de Estación Permanente-REGME, Estación CNEC. Geoportal Ecuador. <https://www.geoportaligm.gob.ec/geodesia/>
8. Osca Mellado, M., & Barreda Yabar, R. V. (2022). Aplicación de dron para elaborar modelos digitales en frente de minado, Unidad Minera Las Bambas [Tesis]. Repositorio Institucional Universidad Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12090>
9. Jaskowski, P., Tomczuk, P., & Chrzanowicz, M. (2022). Construction of a measurement system with GPS RTK for operational control of street lighting. *Energies*, 15(23), 9106. <https://doi.org/10.3390/en15239106>
10. Ghilani, C. D. (2020). *Elementary surveying: An introduction to geomatics*. Pearson Education.
11. Vázquez-Paulino, J. C., & Backhoff-Pohls, M. A. (2017). Procesamiento geo-informático de datos generados mediante drones para la gestión de infraestructura del transporte. Instituto Mexicano del Transporte. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt490.pdf>
12. Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2016). *Topografía* (14ª ed.). Alfaomega Grupo Editor.
13. Instrumental y Óptica. (s. f.). Trimble R8 – alquiler. Instrumental y Óptica. <https://instrumentalyoptica.com.ec/product/trimble-r8-alquiler/>
14. Cedeño, S. J. C., & Hernández, D. O. A. (2022). Modelo de la franja de la carretera obtenido mediante fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (VANT). *Revista Ciencia y Construcción*, 3(3), 19–33. <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/121>
15. Stott, E., Williams, R. D., & Hoey, T. B. (2020). Ground control point distribution for accurate kilometre-scale topographic mapping using an RTK-GNSS unmanned aerial vehicle and SfM photogrammetry. *Drones*, 4(3), 55. <https://doi.org/10.3390/drones4030055>
16. Căţeanu, M., & Moroianu, M. A. (2024). Performance evaluation of real-time kinematic global navigation satellite system with survey-grade receivers and short observation times in forested areas. *Sensors*, 24(19), 6404. <https://doi.org/10.3390/s24196404>
17. Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing*, 12(15), 2447. <https://doi.org/10.3390/rs12152447>
18. Domingo, D., Ørka, H. O., Næsset, E., Kachamba, D., & Gobakken, T. (2019). Effects of UAV image resolution, camera type, and image overlap on accuracy of biomass predictions in a tropical woodland. *Remote Sensing*, 11(8), 948. <https://doi.org/10.3390/rs11080948>

19. Maes, W. H. (2025). Practical guidelines for performing UAV mapping flights with snapshot sensors. *Remote Sensing*, 17(4), 606. <https://doi.org/10.3390/rs17040606>
20. Carvajal-Ramírez, F., Agüera-Vega, F., & Martínez-Carricondo, P. (2021). Editorial for special issue "UAV photogrammetry and remote sensing." *Remote Sensing*, 13(12), 2327. <https://doi.org/10.3390/rs13122327>
21. Awasthi, B., Karki, S., Regmi, P., Dhami, D. S., Thapa, S., & Panday, U. S. (2020). Analyzing the effect of distribution pattern and number of GCPs on overall accuracy of UAV photogrammetric results (pp. 339–354). https://doi.org/10.1007/978-3-030-37393-1_29
22. Deliry, S. I., & Avdan, U. (2021). Accuracy of unmanned aerial systems photogrammetry and structure from motion in surveying and mapping: A review. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(8), 1997–2017. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01366-x>
23. Ortiz, D., & Hernández, F. (2019). Análisis de la influencia de los puntos de control terrestre en la exactitud posicional de ortofotomosaicos generados por medio de un vuelo fotogramétrico realizado por un vehículo aéreo no tripulado (VANT). *Revista de Topografía Azimut*, (10), 1–11. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/azimut/article/view/14972/15706>
24. Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
25. Mesas-Carrascosa, F.-J., Torres-Sánchez, J., Clavero-Rumbao, I., García-Ferrer, A., Peña, J.-M., Borra-Serrano, I., & López-Granados, F. (2015). Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management. *Remote Sensing*, 7(10), 12793–12814. <https://doi.org/10.3390/rs71012793>
26. Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*, 4(5), 1392–1410. <https://doi.org/10.3390/rs4051392>
27. Martínez Taboada, A. (2022). Fotogrametría en la generación del modelo digital de un terreno mediante drones. *Revista Ingeniería*, 6(14), 124–139. <https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v6i14.94>
28. Gaikawad, P. (2020). A review—Geometric design of highway with the help of AutoCAD Civil 3D. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 8(5), 916–921. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.5145>
29. Patil, R., & Wankhede, N. (2025). Integration of GNSS RTK and AutoCAD Civil 3D for road alignment optimization. *International Journal of Surveying and Structural Engineering*, 6(1), 23–26. <https://doi.org/10.22271/2707840X.2025.v6.i1a.35>
30. Vandanjon, P.-O., Vinot, E., Cerezo, V., Coiret, A., Dauvergne, M., & Bouteldja, M. (2019). Longitudinal profile optimization for roads within an eco-design framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 642–658. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.002>