

Propuesta de protocolo técnico para la implementación de vehículos aéreos no tripulados de bajo costo en la inspección de la superestructura ferroviaria.

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Propuesta de protocolo técnico para la implementación de vehículos aéreos no tripulados de bajo costo en la inspección de la superestructura ferroviaria

Llevado a cabo por el estudiante:

Marín Alfaro Daniel

Carné: 2014089190

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el miércoles 13 de agosto de 2025 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

Ing. Braulio Umaña Quirós, MSc.
Representante Director de Escuela

Dr. Irving Pizarro Marchena
Profesor Guía

Ing. Alejandro Medina Angulo, MEng.
Profesor Lector

Ing. Milton Sandoval Quirós, MAE
Profesor Observador

Resumen

El transporte ferroviario es vital para la movilidad sostenible y eficiente, tanto en el transporte de personas como de carga, sin embargo estos sistemas ameritan de inspecciones para la toma de decisiones de mantenimiento, es por esto que este trabajo tiene como objetivo desarrollar una propuesta de protocolo técnico para la implementación de vehículos aéreos no tripulados de bajo costo en la inspección de la superestructura ferroviaria utilizando el tramo comprendido entre la estación de Oreamuno y Plaza Paraíso de la línea 1, con el fin de contribuir en el fortalecimiento de la gestión y mantenimiento del sistema ferroviario del INCOFER. El trabajo se desarrolló comenzando con una revisión bibliográfica, seguida por la implementación de una poligonal de control, así como los puntos de control y chequeo. Luego se ejecutaron vuelos en un tramo experimental para definir los parámetros óptimos, los cuales se aplicaron posteriormente en 2 km de vía férrea. Los resultados demostraron que es posible obtener productos fotogramétricos con precisiones lineales y altimétricas de 7 mm y 13 mm, respectivamente a una altura de vuelo de 25 metros. Además, se verificó su viabilidad técnica y económica, resaltando la reducción en tiempos de inspección, riesgos al personal y costos operativos. Se concluye que los RPAS permite realizar inspecciones de manera eficiente y efectivas, aplicando tecnologías novedosas y ahorrando recursos como tiempo y personal sin afectar al tránsito ferroviario.

Palabras clave: Inspección, superestructura, ferrovías, RPAS, fotogrametría, protocolo de vuelo.

Abstract

Rail transport is vital for sustainable and efficient mobility, both for passenger and freight transportation. However, these systems require regular inspections to support maintenance decision-making. Therefore, the objective of this work is to develop a technical protocol proposal for the implementation of low-cost unmanned aerial vehicles (UAVs) in the inspection of the railway superstructure, using the section between the Oreamuno and Plaza Paraíso stations on Line 1 as a case study, with the aim of contributing to the strengthening of INCOFER's railway system management and maintenance. The work began with a literature review, followed by the establishment of a control traverse, along with the placement of control and check points. Test flights were conducted on a validation segment to define optimal parameters, which were later applied along 2 km of railway track. The results showed that it is possible to obtain photogrammetric products with horizontal and vertical accuracies of 7 mm and 13 mm, respectively, at a flight altitude of 25 meters. Additionally, technical and economic feasibility was verified, highlighting reductions in inspection time, personnel risk, and operational costs. It is concluded that UAVs enable inspections to be carried out efficiently and effectively by applying innovative technologies, saving resources such as time and labor, without interrupting railway traffic.

Keywords: Inspection, superstructure, railways, RPAS, photogrammetry, flight protocol.

Propuesta de protocolo técnico para la implementación de vehículos aéreos no tripulados de bajo costo en la inspección de la superestructura ferroviaria.

DÁNIEL MARÍN ALFARO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio de 2025

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Resumen ejecutivo	11
Introducción	15
Capítulo 1: Marco teórico	27
Capítulo 2: Metodología	48
Capítulo 3: Resultados y análisis	73
Conclusiones y Recomendaciones	106
Referencias	111
Apéndices	119

Índice de cuadros

Cuadro 1. Aplicaciones de los RPAS en las redes ferroviarias europeas.....	21
Cuadro 2. Precisión de las antenas GNSS Leica Viva GS14 según su modo de trabajo.	51
Cuadro 3. Precisión de la antena CHCNAV iBase y receptor móvil CHCNAV i89 según su modo de trabajo.	52
Cuadro 4. Especificaciones de cámara del RPAS DJI Phantom 4 Pro-Plus.....	54
Cuadro 5. Especificaciones de cámara del RPAS DJI Air 2S.....	55
Cuadro 6. Parámetros de vuelo para los vuelos con RPAS DJI AIR S2.....	69
Cuadro 7. Comparación de métodos de inspección ferroviaria.	73
Cuadro 8. Puntos de referencia establecidos en la vía férrea.	77
Cuadro 9. Datos del levantamiento para los 10 mojones de la poligonal de control.....	79
Cuadro 10. Coordenadas de los puntos de control y de chequeo en el tramo experimental.....	83
Cuadro 11. Valores de resolución espacial para cada altura de vuelo.	84
Cuadro 12. Tiempo de procesamiento de productos fotogramétricos en los vuelos en el tramo experimental.	85
Cuadro 13. Coordenadas de los puntos de chequeo obtenidas por topografía terrestre y el procesamiento del vuelo 3.....	85
Cuadro 14. Diferencias entre las coordenadas de los puntos de chequeo en el vuelo 3.	86
Cuadro 15. Diferencias lineales en puntos de chequeo para el tramo experimental.....	86
Cuadro 16. Medidas descriptivas de los errores lineales obtenidos en el tramo experimental.....	87
Cuadro 17. Errores altimétricos en puntos de chequeo para el tramo de experimental.	88
Cuadro 18. Medidas descriptivas de los errores altimétricos obtenidos en el tramo experimental.....	88
Cuadro 19. Tiempo de procesamiento de todo el tramo de vía férrea.....	91
Cuadro 20. Errores obtenidos en los puntos de chequeo en la totalidad del trayecto de vía férrea.	91
Cuadro 21. Medidas descriptivas de los errores altimétricos obtenidos en el trayecto total de vía férrea. ...	92
Cuadro 22. Definición del protocolo de vuelo para la inspección con RPAS.	97
Cuadro 23. Viabilidad técnica del uso de RPAS en la inspección de la superestructura ferroviaria.....	102

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del tramo en estudio.	11
Figura 2. Elementos de la superestructura e infraestructura de una vía férrea.	29
Figura 3. Rieles de ferrocarril.	30
Figura 4. Placas de unión.	31
Figura 5. Elementos de sujeción.	33
Figura 6. Durmientes de concreto	34
Figura 7. Balasto de ferrovía.	35
Figura 8. Altura de vuelo del RPAS sobre el terreno.	42
Figura 9. Componentes tradicionales para un plan de vuelo fotogramétrico.	44
Figura 10. Diferencia de la información altimétrica de un DSM y un DMT.	46
Figura 11. Estación total Geomax Zoom 40.	51
Figura 12. Antena GNSS Leica Viva GS14.	52
Figura 13. Antena GNSS CHCNAV iBase.	53
Figura 14. Receptor Móvil GNSS CHCNAV i89.	53
Figura 15. Nivel de precisión Ruide DSZ2.	54
Figura 16. RPAS DJI Phantom 4 Pro-Plus.	55
Figura 17. RPAS DJI Air 2S.	56
Figura 18. Diseño de mojones para poligonal de apoyo.	57
Figura 19. Varilla corrugada utilizada para los mojones.	57
Figura 20. Varilla corrugada número 3 de 20 cm utilizada para los GCP y CHP (A) con desgaste en uno de sus extremos (B).	58
Figura 21. Lona para identificar puntos de terreno y puntos de chequeo.	59
Figura 22. Dimensiones de lona para la identificación de los puntos de control de terreno y puntos de chequeo.	60
Figura 23. Puntos de control y de chequeo pintados en elementos de la vía férrea.	60
Figura 24. Diagrama de flujo de la elaboración del proyecto.	63
Figura 25. Diagrama de flujo de para la elaboración del protocolo de vuelo.	66
Figura 26. Ubicación de los puntos de referencia.	78
Figura 27. Ubicación de los mojones en el tramo 1.	80

Figura 28. Ubicación de los mojones en el tramo 2.....	81
Figura 29. Tramo experimental por utilizar.	82
Figura 30. Ubicación de puntos de control y de chequeo en el tramo experimental.....	83
Figura 31. Nube de puntos sin filtrar elementos no deseados.....	93
Figura 32. Detalle de la superestructura ferroviaria en la nube de puntos filtrada.....	94
Figura 33. Perfil del balasto y extracto del DSM en el tramo experimental.....	95
Figura 34. Sección de la ortofoto generada en el tramo de estudio.	96

Glosario

En esta sección se presenta una serie de términos, abreviaturas y siglas mencionadas durante el desarrollo del trabajo como una referencia para que los lectores puedan tener a su alcance la definición y/o traducción de cada uno de los elementos del glosario.

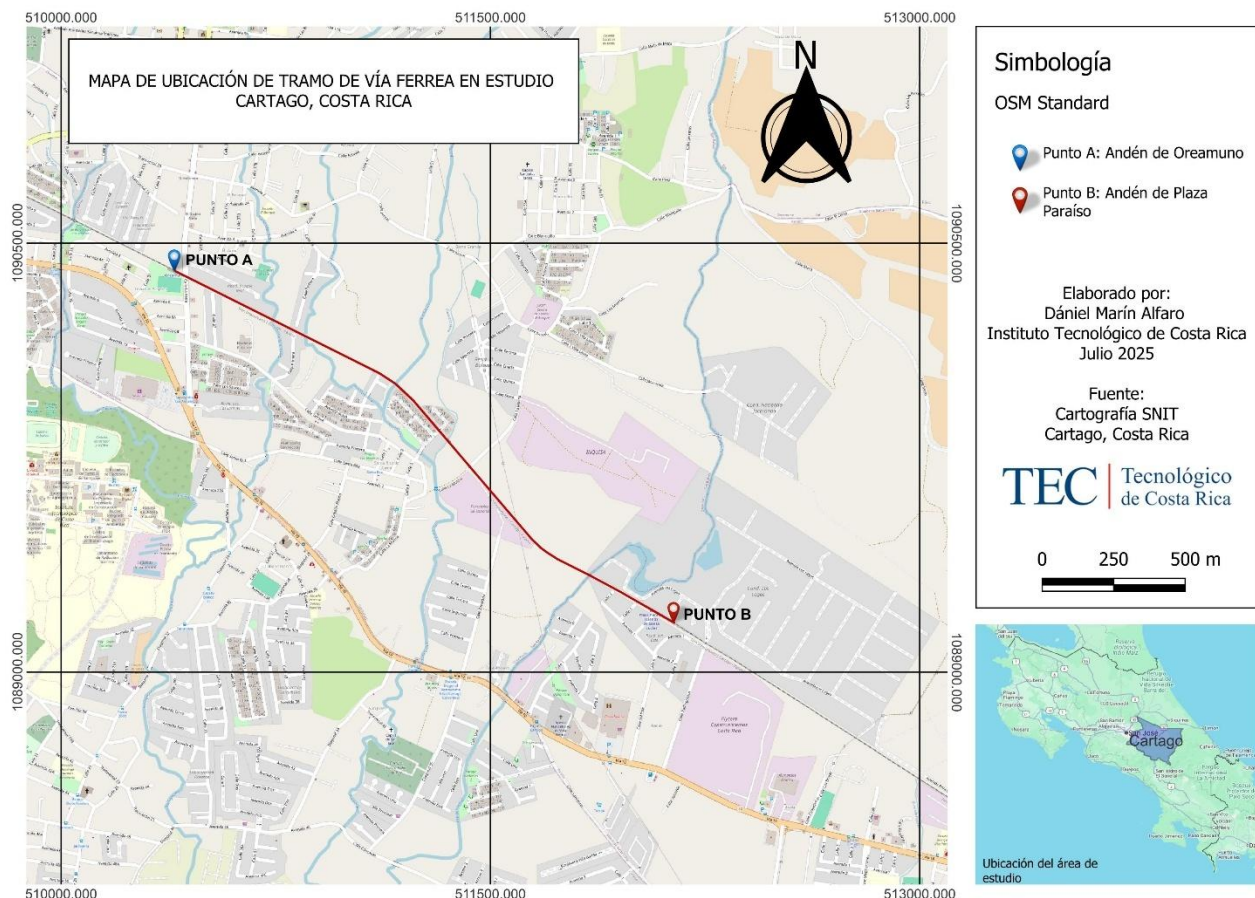
- ARESEP: Autoridad reguladora de los Servicios Públicos.
- CHP: Puntos de Chequeo.
- CTA: Terminal de Contenedores Altenwerder.
- DB: Ferrocarril Alemán.
- DEM: Modelo digital de Elevación.
- DfT: Departamento de Transporte.
- DMT: Modelo digital de Terreno.
- DSM: Modelo digital de Superficie.
- GAM: Gran Área Metropolitana.
- GCP: Puntos de Control del Terreno.
- GNSS: Sistema Global de Navegación por Satélite.
- GPS: Sistema de Posicionamiento Global.
- GSD: Distancia de Muestreo en el Terreno (Ground Sampling Distance por sus siglas en inglés).
- INCOFER: Instituto Costarricense de Ferrocarril.
- NR: Red Ferroviaria.
- OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
- ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- PPK: Postproceso Cinemático.
- RPAS: Sistema de Aeronaves Pilotadas de Forma Remota (Remotely Piloted Aircraft System por sus siglas en inglés)
- RPS: Estación de Piloto Remoto.
- RTK: Tiempo Real Cinemático.
- SIG: Sistema de Información Geográfica.
- SNCF: Compañía Nacional de los Ferrocarriles Franceses (Société Nationale des Chemins de fer Français por sus siglas en francés)
- SNIT: Sistema Nacional de Información Territorial.

- TfL: Transporte de Londres.
- UAV: Vehículo Aéreo no Tripulado (Unmanned Aerial Vehicle por sus siglas en inglés)

Resumen ejecutivo

El presente trabajo de graduación desarrolla una propuesta de protocolo técnico para la implementación de vehículos aéreos no tripulados de bajo costo (RPAS) en la inspección de la superestructura ferroviaria, utilizando como caso de estudio el tramo comprendido entre las plataformas de Oreamuno (PUNTO A) y Plaza Paraíso (PUNTO B) de la línea 1 del sistema ferroviario nacional, mostrado en la **Figura 1**. Este trayecto fue escogido por presentar buenas condiciones para la operación de los RPAS, tales como buena accesibilidad, poca interferencia de obstáculos verticales, una topografía regular y una buena visibilidad de la superestructura ferroviaria, permitiendo que los vuelos se puedan efectuar de manera eficiente sin poner en riesgo al equipo.

Figura 1. Ubicación del tramo en estudio.



Esta iniciativa surge como respuesta a las debilidades identificadas en los procesos de inspección del sistema ferroviario nacional, particularmente en lo relacionado con la ausencia de protocolos estandarizados y de sistemas de monitoreo que respalden una gestión adecuada de la superestructura ferroviaria. Según un informe técnico de la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), publicado en 2022, estas limitaciones se reflejan en una calificación técnica del 43% al comparar el desempeño nacional con el de países miembros de la OCDE.

En ese sentido, el desarrollo de un protocolo eficiente, replicable y accesible no solo contribuye al fortalecimiento del INCOFER, sino que también representa una valiosa oportunidad para la Escuela de Ingeniería en Construcción, al incorporar herramientas tecnológicas innovadoras que fortalecen la relación entre academia y gestión pública.

El proyecto se vincula con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, particularmente el ODS 9, enfocado en fomentar la innovación y la infraestructura resiliente; el ODS 11, orientado a promover comunidades sostenibles a través de un transporte público más eficiente; y el ODS 13, que alienta a adoptar tecnologías que reduzcan el impacto ambiental.

El trabajo se realizó a través de tres objetivos específicos: El primero, investigar las técnicas de inspección con RPAS utilizadas a nivel internacional y adaptarlas al contexto costarricense; de segundo, diseñar un protocolo específico de vuelo y captura de datos usando un dron de bajo costo en la inspección de la superestructura ferroviaria, y por último, evaluar la viabilidad técnica y económica de la propuesta de protocolo, comparando los resultados con los procedimientos tradicionales de inspección.

La metodología del proyecto se realizó en varias etapas. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión de la literatura científica y técnica, lo que permitió identificar las mejores prácticas para la realización de vuelos fotogramétricos aplicados a la inspección de la superestructura ferroviaria, incluyendo el uso de ortofotos, modelos digitales de superficie, nube de puntos y algoritmos de detección automática. Posteriormente, se estableció una poligonal de control a lo largo del tramo en estudio, mediante la colocación de mojones cementados que sirvieron para georreferenciar puntos de control y de chequeo en el tramo de estudio. A partir de esto, se definió un tramo experimental, sobre el cual se realizaron nueve vuelos experimentales con distintas combinaciones de parámetros, tales como altura, velocidad y traslapes entre fotografías. Estos vuelos fueron procesados en un software fotogramétrico Agisoft Metashape, integrando los puntos de control y de chequeo para evaluar la precisión y resolución de los productos generados. Con base en los resultados obtenidos, se identificaron los parámetros de vuelo óptimos, considerando resolución y precisión, los cuales fueron posteriormente aplicados al resto del tramo ferroviario.

En cuanto a los resultados de la revisión bibliográfica, se llevó a cabo un análisis comparativo de diversas técnicas de inspección ferroviaria utilizadas a nivel internacional, incluyendo métodos tradicionales como la inspección visual y los coches de auscultación, así como enfoques avanzados como el uso de UAV con fotogrametría, sensores LiDAR y algoritmos de inteligencia artificial, actualmente empleados en países como China, Francia y Alemania. Esta revisión permitió identificar las ventajas y desventajas de cada método, sus aplicaciones específicas en la inspección de la superestructura ferroviaria, así como las regiones donde han sido implementados con éxito. La comparación permitió evaluar variables como resolución, precisión, autonomía operativa y parámetros de vuelo para adaptarlos al contexto nacional, considerando las limitaciones presentes en el sistema ferroviario nacional. Estudios como los de Cuyper et al. (2023), Wu et al. (2018) y Gómez et al. (2022) fueron fundamentales para definir alturas de vuelo óptimas entre 25 y 35 metros y velocidades adecuadas que aseguran una recolección de datos de calidad sin comprometer la seguridad operativa.

Entre los principales resultados, se logró generar productos fotogramétricos con una resolución espacial de 0.723 cm/píxel al volar a 25 metros de altura, con desviaciones estándar de 7 mm y 13 mm en planimetría y altimetría respectivamente. Para definir los parámetros óptimos, se llevaron a cabo un total de nueve vuelos con diferentes combinaciones de altura, velocidad y traslapes, abarcando alturas entre 25 y 35 metros, una velocidad constante de 2 m/s y variaciones en los traslapes que van desde 75% frontal y 65% lateral, 80% frontal y 75% lateral, hasta llegar a los 85% frontal y 75% lateral. A partir de esta serie de vuelos, se identificó que el vuelo número 3, realizado a una altura de 25 metros, con una velocidad de 2 m/s y traslapes de 85% frontal y 75% lateral, ofrecía el mejor equilibrio entre precisión altimétrica y resolución espacial. Estos parámetros fueron posteriormente aplicados al resto del tramo en estudio, confirmando su aplicabilidad y eficiencia para la inspección de la superestructura ferroviaria.

En cuanto a la viabilidad técnica del uso de los RPAS para la inspección de la superestructura ferroviaria, se pudo constatar que cada misión de vuelo tiene una duración de entre 7 a 10 minutos, cubriendo tramos entre 400 y 500 metros, es decir con una batería se tiene la posibilidad de cubrir alrededor de 1 kilómetro, ya que la autonomía de esta ronda los 25 a 30 minutos, sin requerir el cierre de la vía férrea ni desplegar recursos operativos significativos. Además, los tiempos de procesamiento fotogramétrico por tramo tuvieron una duración en promedio de 2 horas con 20 minutos por bloque de aproximadamente 210 fotos, proceso que no demanda una intervención humana constante, lo cual permite programar las tareas de procesamiento en momentos de menor carga laboral.

En relación con la viabilidad económica, se demostró que el uso de RPAS es una solución accesible para la inspección de la superestructura ferroviaria. La adquisición de un equipo similar al RPAS de bajo costo utilizado ronda los \$1.200 USD, y su operación puede ser realizada por una o dos personas, reduciendo los

costos asociados al transporte, personal y logística de campo requeridos en métodos tradicionales. A esto se suma el costo de licencias de software como Agisoft, utilizado para el procesamiento de las fotografías capturadas por el RPAS, cuya versión estándar ronda los \$170 USD. Si bien implica una inversión inicial, esta se compensa rápidamente por los ahorros operativos. Adicionalmente, diversos autores como Cuypers et al., Wu et al. y Gómez han documentado que los RPAS contribuyen a mejorar la eficiencia, disminuir los riesgos al personal y reducir los costos de inspección, en comparación con métodos tradicionales que suelen involucrar mayor personal, cierre de vías y movimiento de equipo pesado.

El estudio concluye que, incluso en ausencia de procesos estandarizados de inspección por parte del INCOFER, el protocolo propuesto demuestra ser técnicamente viable, económicamente accesible y replicable en distintos tramos de la red ferroviaria nacional. El uso de drones no solo mejora la trazabilidad y seguridad en los procesos de inspección, sino que también promueve una cultura de innovación tecnológica dentro del ámbito ferroviario costarricense. La estandarización del protocolo, el respaldo bibliográfico de su enfoque, y la claridad de sus beneficios en términos de tiempo, precisión y costos, le dan a esta herramienta una solución moderna, segura y sostenible para el fortalecimiento del sistema ferroviario del país.

Introducción

Este proyecto consiste en el desarrollo de una propuesta de protocolo técnico para la implementación de vehículos aéreos no tripulados de bajo costo (RPAS) en la inspección de la superestructura ferroviaria. Como tramo de estudio se seleccionó la sección comprendida entre los andenes de Oreamuno y Plaza Paraíso, con el fin de que se pueda replicar en otros sectores del sistema ferroviario nacional, complementando los procesos de inspección actualmente ejecutados por el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER). El desarrollo del protocolo se fundamenta en la adquisición y procesamiento de información geoespacial mediante técnicas de fotogrametría aérea, abarcando desde la implantación de controles hasta la generación de productos fotogramétricos para la evaluación del estado de la vía férrea, garantizando la calidad de los resultados obtenidos.

En los últimos años, el uso de RPAS en aplicaciones de ingeniería ha tenido una gran relevancia debido a su capacidad para optimizar procesos de inspección y monitoreo en sectores como la construcción, la topografía y la infraestructura de transporte. En el ámbito ferroviario, su implementación ha demostrado ser una herramienta eficaz en países con sistemas ferroviarios más desarrollados, donde se han adoptado como una alternativa moderna a los métodos tradicionales de inspección. La capacidad de los drones ha resultado ser una buena solución para realizar levantamientos aéreos detallados, con las ventajas de no interrumpir la operación de las vías, facilidad de despliegue y el acceso a zonas más complicadas para realizar los procesos de inspección, convirtiéndose en una solución innovadora y rentable.

En Costa Rica, el sistema ferroviario requiere mecanismos de inspección que permitan mejorar la seguridad y el mantenimiento de la infraestructura con métodos más ágiles y precisos. Por medio de reuniones con personeros del ICOPER se pudo constatar que la institución realiza sus planes de inspección y mantenimiento con información brindada por los maquinistas. La implementación de RPAS busca reducir estos desafíos, permitiendo inspecciones más rápidas, seguras y detalladas, contribuyendo así a la mejora y el mantenimiento del sistema ferroviario nacional.

A través de este estudio, se pretende demostrar cómo la incorporación de RPAS en la inspección ferroviaria puede complementar y mejorar los procesos actuales, facilitando la toma de decisiones en el

mantenimiento de la superestructura ferroviaria y asegurando una operación más eficiente y segura del sistema de transporte ferroviario en el país.

Planteamiento del Problema

En 2022, la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) destacó la necesidad de que el INCOFER mejore sus planes de mantenimiento de la red ferroviaria nacional, tras un estudio comparativo con siete países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) para adoptar las mejores prácticas que garanticen la continuidad y seguridad del servicio. El informe reveló que INCOFER obtuvo una calificación del 43% según criterios técnicos, evaluando aspectos como la prestación del servicio, la estrategia y fiscalización del mantenimiento, donde se obtuvo un 60% de calificación y la continuidad del servicio, evidenciando la necesidad de mejoras en estos ámbitos (ARESEP, 2022). Este estudio por parte de la ARESEP resalta la necesidad de implementar mejoras en el mantenimiento de la vía férrea, implementando procesos de inspección más eficientes.

Tradicionalmente, la inspección de la superestructura ferroviaria se ha llevado a cabo mediante observación visual directa por parte del personal encargado. No obstante, este método resulta engorroso, laborioso y lento, además de ser susceptible a errores humanos que pueden comprometer la calidad de los resultados. Durante reuniones con funcionarios del Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), se constató que los actuales procesos de mantenimiento se basan en la información proporcionada por los maquinistas de las distintas rutas. Este procedimiento presenta limitaciones importantes, ya que los maquinistas pueden pasar por alto aspectos técnicos relevantes sobre el estado de la superestructura, debido a la falta de criterios específicos en materia de inspección y a las condiciones propias de la operación, como la velocidad a la que se desplaza la máquina.

Ante esto, el presente estudio busca contribuir al fortalecimiento de los procesos de mantenimiento de la superestructura ferroviaria, mediante el desarrollo de un protocolo técnico de inspección que pueda ser adoptado por el INCOFER dentro del sistema de vías férreas nacional. La implementación de un protocolo que sistematice el proceso de inspección representa un paso clave hacia la ejecución de evaluaciones más controladas, detalladas, continuas y eficientes, lo que permitiría optimizar la toma de decisiones y mejorar la gestión integral del mantenimiento ferroviario.

Justificación

El transporte ferroviario es uno de los medios más relevantes y utilizados a nivel mundial. En Europa en el año 2020, el tráfico de pasajeros se duplicó en comparación con años anteriores, impulsado por la creciente popularidad de este medio de transporte y la aparición de nuevas empresas que ofrecen servicios de movilidad entre ciudades. Asimismo, el transporte de carga experimentó un crecimiento, llegando a triplicarse (Márquez, 2006). Esto deja en evidencia que el uso del ferrocarril desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico y social de una región y como toda infraestructura, el sistema ferroviario requiere de un proceso de inspección riguroso para garantizar su correcto funcionamiento y la seguridad de sus usuarios.

En el ámbito ferroviario, la incorporación de herramientas que permitan optimizar y modernizar los procesos de inspección de la superestructura ha tomado mayor relevancia. Si bien tradicionalmente estas labores se han llevado a cabo mediante inspección visual, este procedimiento presenta deficiencias en cuanto a precisión y seguridad del personal. Además, requiere de recursos adicionales, como equipos de protección personal, que incrementan los costos operativos. Por otro lado, en países con mayor desarrollo tecnológico, se ha logrado avanzar hacia sistemas automatizados que permiten mejorar la calidad de las evaluaciones, reducir los riesgos asociados al trabajo en campo y aumentar la eficiencia operativa. En este sentido, la incorporación de los RPAS representa una oportunidad viable y pertinente para fortalecer la gestión del mantenimiento ferroviario en el contexto nacional (Gong et al., 2022).

En el ámbito de la Ingeniería en Construcción y los sistemas ferroviarios, varios autores han subrayado el potencial de los RPAS en los procesos de inspección de la superestructura ferroviaria. Por ejemplo, (Cuypers et al., 2023), menciona sobre el posicionamiento planimétrico de rieles mediante fotogrametría con RPAS. Este estudio menciona que el uso de esta tecnología representa una alternativa prometedora, ofreciendo beneficios en términos de seguridad y rapidez en las inspecciones, lo que reduce significativamente los costos en comparación con los métodos tradicionales, como el uso de carros de inspección, que no solo son más lentos, sino que también implican mayores riesgos al requerir acceso físico a las vías férreas.

Asimismo, Wu et al., (2018) indican que los RPAS son una herramienta eficaz para la detección de defectos en la superficie de los rieles y otros componentes de la superestructura ferroviaria, ya que las imágenes capturadas permiten identificar los daños con mayor precisión, facilitando las acciones de mantenimiento. Finalmente, Masat & Kaya, 2019 señalan que el uso de esta tecnología ha ganado mucha popularidad en los últimos años debido a sus múltiples ventajas, destacándose su capacidad para reducir accidentes en las vías férreas gracias a inspecciones más eficientes. Además, las instituciones responsables

se benefician económicamente, ya que el uso de RPAS conlleva menores costos operativos en los procesos de inspección, tomando en consideración que puede haber ciertas limitantes en el uso de estas tecnologías.

En esta propuesta se destaca la incorporación de nuevas tecnologías aplicadas a la inspección de la superestructura ferroviaria nacional, aprovechando las ventajas que ofrecen los RPAS en términos de reducción de costos y tiempos en comparación con los métodos de inspección tradicionales. Tal como lo mencionan Mardiana et al., (2020) y Lesiak, (2020), la utilización de sistemas de inspección mediante RPAS en la superestructura ferroviaria ha demostrado ser altamente eficiente, ya que permite la obtención de productos de alta calidad útiles en el monitoreo y supervisión de manera precisa los diferentes componentes de la vía, tales como durmientes, elementos de sujeción, balasto y rieles. Esto es posible gracias al procesamiento de imágenes capturadas por los RPAS, optimizando así la gestión y el mantenimiento de la infraestructura ferroviaria.

El proyecto busca contribuir a tres Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, los cuales se describen a continuación:

1. *ODS 9: Industria, Innovación e infraestructura:* En este objetivo destaca la incorporación de nuevas tecnologías en la supervisión y mantenimiento del sistema ferroviario. Los procesos de inspección mediante RPAS permiten obtener datos con mayor rapidez en comparación con los métodos tradicionales, lo que optimiza la planificación y el mantenimiento de la superestructura. Además, la reducción de costos operativos y el menor riesgo asociado a la movilización de personal en campo hacen que esta tecnología sea una alternativa eficiente y segura.
2. *ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles:* Un mantenimiento más eficiente y preciso promueve un transporte público más seguro y confiable. Con un sistema ferroviario mejor supervisado, se fomenta el uso del tren como alternativa de movilidad sostenible, lo que ayuda a reducir la congestión vehicular y la contaminación en las ciudades. Asimismo, la inspección con drones permite detectar fallas con rapidez, evitando accidentes y asegurando que la superestructura ferroviaria esté en condiciones óptimas para su uso continuo. Esto beneficia especialmente a las comunidades que dependen del ferrocarril como un medio de transporte público eficiente y seguro.
3. *ODS 13: Acción por el Clima:* El uso de RPAS minimiza la necesidad de movilizar vehículos de inspección tradicionales, lo que implica una disminución en el consumo de combustibles fósiles y, por ende, en la emisión de gases de efecto invernadero. Además, un mantenimiento más preciso y frecuente permite extender la vida útil de la superestructura ferroviaria, reduciendo la necesidad de intervenciones mayores que generan residuos y demandan un alto consumo de materiales.

Antecedentes

La historia de los ferrocarriles está marcada por una serie de grandes avances tecnológicos, además ha sido participe de grandes transformaciones socioeconómicas que han dado forma a una gran cantidad de sociedades y poblaciones a nivel mundial. En muchas partes los ferrocarriles fueron el inicio de grandes civilizaciones, así como el inicio de importantes sistemas de transporte de mercancías y pasajeros que hicieron crecer a estas localidades y contribuir incluso al comercio mundial.

Los sistemas de ferrocarril que empezaron a desarrollarse en el siglo XVII, pasaron de simples vías de madera a sofisticados sistemas impulsados por vapor en la época industrial del carbón inglesa en el siglo XIX, donde destaca la creación de la locomotora a vapor en los años 1830. Este sofisticado sistema de redes de ferrocarril impulsó el transporte de mercancías y permitió la conectividad de diferentes regiones (Gwyn, 2022). Desde este siglo, el ferrocarril ha tomado un gran impulso, dando paso a modernos sistemas ferroviarios con vías de alta velocidad, especialmente en países de Asia y Europa, transportando a cientos de pasajeros al día y mercancías valoradas en miles de dólares.

Con la evolución de los sistemas ferroviarios, surgió la necesidad de mantenerlos en condiciones óptimas para garantizar un transporte seguro y eficiente para los usuarios. En este contexto, se desarrollaron los programas de inspección de la superestructura ferroviaria, la cual constituye el componente fundamental sobre el que circula el material rodante, ya sea destinado al transporte de carga o de pasajeros. En un principio las inspecciones se realizaban por medio de evaluaciones visuales, donde una cuadrilla visitaba el tramo de ferrovía a inspeccionar y evidenciaban los problemas que se pudieran presentar en la superestructura, sin embargo, esta metodología está sujeta al criterio del inspector y puede que no sea la manera más precisa (Abdelmalik et al., 2024).

Desde principios de la década de 1960, se implementó el primer vehículo de inspección ferroviaria por ultrasonidos, marcando el inicio de las tecnologías de inspección no destructiva. Este método permite detectar roturas superficiales y defectos internos en los rieles de las vías. Junto a estos avances, se han incorporado sistemas de monitoreo remoto vía satélite y equipos de monitoreo en tiempo real. Sin embargo, una de las tecnologías que ha cobrado mayor relevancia es la inspección mediante vehículos aéreos no tripulados. Esta técnica es ampliamente utilizada en las redes ferroviarias de alta velocidad en Europa para detectar fallas en los diferentes componentes de la superestructura, aprovechando algoritmos de procesamiento de imágenes para analizar los datos recopilados. El proceso de inspección con RPAS se basa en tres etapas fundamentales: la planificación de la inspección, la recopilación de los datos y el procesamiento y análisis de estos, lo que permite una evaluación más precisa y eficiente de la infraestructura ferroviaria (Li et al., 2023).

Actualmente, Li et al., (2023) menciona que existen dos enfoques o métodos principales para analizar los resultados obtenidos a partir de la inspección de la superestructura ferroviaria con RPAS. El primer enfoque consiste en la captura de imágenes, las cuales son procesadas mediante tecnología de reconocimiento e inteligencia artificial en programas dedicados de fotogrametría. A través de este análisis, es posible examinar el entorno, evaluar el estado estructural y detectar posibles defectos en la superestructura inspeccionada. Por otro lado, el segundo método se basa en la generación de modelos tridimensionales, que permiten visualizar de manera detallada la condición general del objeto de inspección. Estos modelos facilitan la medición de distancias, pendientes y otras características geoespaciales, lo que resulta útil para evaluar la magnitud de desastres geológicos. Además, al comparar modelos generados en distintos periodos de tiempo, se pueden analizar cambios tanto en la estructura inspeccionada como en su entorno, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones en mantenimiento y gestión de riesgos.

Cuypers et al., (2023) realizó un estudio en un patio de maniobras ferroviarias en donde se evaluó el uso de RPAS como una alternativa eficiente y de menor costo para la inspección de la superestructura ferroviaria, en comparación con los métodos tradicionales que requieren un alto presupuesto y procesamiento manual de datos. Se aplicaron técnicas avanzadas de detección de líneas para analizar la ubicación y el ancho de los rieles mediante fotogrametría, utilizando modelos como “*Holistically-Nested Edge Detection, DexiNed y Segment Anything Model*”. Los resultados demostraron una alta precisión y una tasa de detección prometedora, lo que sugiere que esta metodología no solo permite automatizar el proceso sin afectar el tráfico ferroviario, sino que también reduce la necesidad de intervención humana y mejora la seguridad. Además, la tecnología moderna permite capturar imágenes de Ultra alta resolución, facilitando inspecciones más detalladas y optimizando el mantenimiento preventivo de la infraestructura ferroviaria.

Desde el año 2013, la Sociedad Nacional de Ferrocarriles franceses (SNCF) ha incorporado el uso de RPAS en sus labores de inspección, vigilancia y mantenimiento. Para optimizar estos procesos, las autoridades crearon “*Altametris*”, una filial especializada en el desarrollo de soluciones personalizadas con RPAS, enfocándose en la integración de sensores avanzados, el diseño de tecnologías innovadoras y el procesamiento eficiente de datos para mejorar la gestión de la infraestructura ferroviaria (Lesiak, 2020). Sin embargo, el sistema de ferrocarriles no ha sido el único en aplicar los RPAS para diferentes trabajos en las vías férreas, en el **Cuadro 1** se muestran las aplicaciones de los RPAS en las redes ferroviarias europeas.

Cuadro 1. Aplicaciones de los RPAS en las redes ferroviarias europeas.

País	Organismo/Empresa	Propósito de la implementación
Francia	Red de SNCF	Mediciones topográficas, levantamiento de redes, trabajos de inspección, supervisión y mantenimiento
Alemania	Ferrocarril Alemán (DB)	Supervisión, inspección y evaluación de la planificación de la construcción.
Países Bajos	ProRail	Control de sistemas de calefacción por interruptores, control de protección contra la corrosión de estructuras de acero.
Noruega	Bane NOR	Monitorización y lubricación de máquinas de agujas mediante vehículos aéreos no tripulados autónomos
	CAF Signalling	Geolocalización de sistemas de señalización en líneas de alta velocidad
España	Thales, Adif	Pruebas de detección de errores en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla (para trabajos de mantenimiento) Operación automática de trenes((ATO)
	Departamento de transporte (DfT)	Pruebas y ensayos Pathfinder del DfT
Gran Bretaña	Trasporte de Londres (TfL)	Medición y mantenimiento de la red del metro de Londres
	Red Ferroviaria (NR)	Trabajos de inspección y mantenimiento de vías

Nota: Adaptado de (Lesiak, 2020).

Por otro lado Mardiana et al., (2020), propone el desarrollo de un sistema de monitoreo avanzado para la inspección de la superestructura ferroviaria utilizando RPAS. El sistema utiliza drones equipados con cámaras para tomar imágenes detalladas de las vías, permitiendo detectar cambios o daños en los rieles que podrían poner en peligro la seguridad de los pasajeros, como desplazamientos o rupturas causadas por factores naturales o la estructura del propio ferrocarril. A través del procesamiento de imágenes y datos satelitales, el sistema proporciona información precisa sobre las condiciones de las vías, con una alta precisión de hasta el 90%. Este enfoque mejora la eficiencia y la precisión en la inspección, reduciendo costos operativos y aumentando la seguridad al evitar la exposición de los trabajadores en el campo.

Ghassoun et al. (2021) presentan un caso en el que los sistemas de inspección mediante RPAS no solo se aplican a redes ferroviarias convencionales, sino también a infraestructuras con vías férreas montadas sobre durmientes y balasto, como las utilizadas por grúas porticas en grandes puertos. El proyecto denominado Aerolnspekt propuso un método de medición automatizado para determinar la posición de las vías en la Terminal de Contenedores Altenwerder. (CTA) en Hamburgo, utilizando fotogrametría basada en RPAS. El objetivo era alcanzar una alta precisión en las mediciones, con tolerancias de hasta 10 mm en el plano XY, a lo largo de un tramo de 300 metros. Durante las pruebas realizadas en junio de 2020, se emplearon diferentes cámaras y velocidades de vuelo para capturar imágenes desde una altura de 35 metros. Además, se desarrolló un proceso automatizado para delinear las vías a partir del modelo de superficie generado, el cual fue posteriormente evaluado con mediciones de referencia terrestre. Los resultados demostraron una precisión de 3 mm en el plano XY y en altitud de 8 mm, permitiendo realizar las inspecciones con mínima interrupción de las operaciones, mejorando la eficiencia y reduciendo pérdidas de capacidad y tiempo en la terminal.

De esta manera, se evidencia que el uso de los RPAS ha sido progresivamente incorporado en diversos sistemas ferroviarios a nivel internacional, incluyendo instalaciones portuarias que operan con líneas férreas. Esto demuestra que, a pesar de ser una tecnología relativamente reciente, su aplicación en los procesos de inspección del Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER) es completamente factible, contribuyendo al fortalecimiento de las labores de mantenimiento y mejorando la seguridad del transporte ferroviario para los usuarios que dependen de este servicio diariamente.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una propuesta de protocolo técnico para la implementación de vehículos aéreos no tripulados de bajo costo (RPAS) en la inspección de la superestructura ferroviaria utilizando el tramo comprendido entre la estación de Oreamuno y Plaza Paraíso de la línea 1, con el fin de contribuir en el fortalecimiento de la gestión y mantenimiento del sistema ferroviario del Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER).

Objetivos Específicos

1. Investigar las técnicas de inspección de la superestructura ferroviaria empleando vehículos aéreos no tripulados, con el fin de identificar e incorporar las mejores prácticas y adaptarlas a las características particulares del sistema ferroviario nacional.

2. Diseñar un protocolo de vuelo y captura de datos para la utilización de vehículos aéreos no tripulados de bajo costo en la inspección de la superestructura ferroviaria.
3. Evaluar la viabilidad técnica y económica de la propuesta de protocolo, comparando los resultados con los procedimientos tradicionales de inspección utilizados por el INCOFER.

Alcance

El proyecto tiene como propósito diseñar un protocolo técnico para la implementación de vehículos aéreos no tripulados (RPAS) en la inspección de la superestructura ferroviaria, aprovechando las ventajas de la fotogrametría. Para su aplicación, se ha seleccionado el tramo comprendido entre las plataformas de Oreamuno y Plaza Paraíso, con el objetivo de evaluar la efectividad de esta tecnología en la optimización de los procesos de inspección ferroviaria.

El alcance de la propuesta se limita al derecho de vía actual, centrándose exclusivamente en la inspección de la superestructura ferroviaria sin considerar terrenos colindantes ni estructuras aledañas. La zona de estudio incluye sectores urbanos y suburbanos, con un enfoque mayoritariamente suburbano para el desarrollo del plan piloto. Asimismo, la viabilidad del protocolo estará determinada por las especificaciones técnicas del RPAS de bajo costo utilizado, en este caso, un DJI AIR 2S.

El procesamiento de los datos, obtenidos a través de los vuelos, se realizará mediante el software Agisoft Metashape de la empresa Drone Emotions, con el fin de generar productos fotogramétricos, tales como ortofotos modelos digitales de elevación y nubes de puntos. Estos insumos permitirán una reconstrucción digital de la superestructura ferroviaria y así facilitar la inspección, análisis y diagnóstico.

Para alcanzar los objetivos específicos del estudio, se han establecido los siguientes alcances:

En primer lugar, se investigarán las técnicas de inspección de la superestructura ferroviaria utilizando RPAS, con el fin de identificar las mejores prácticas y adaptarlas al sistema ferroviario nacional. Para ello, se realizará una revisión exhaustiva de literatura académica tanto a nivel nacional como internacional, enfocándose en el uso de RPAS en fotogrametría y su aplicación en la inspección ferroviaria. Además, el protocolo deberá adaptarse a los procedimientos de inspección actualmente utilizados por el INCOFER, en caso de que la institución los tenga.

En segundo lugar, se diseñará un protocolo de vuelo y captura de datos para el uso de RPAS de bajo costo en la inspección de la superestructura ferroviaria. Se contemplarán tramos de medición de aproximadamente 400 metros, considerando las variaciones del terreno, la presencia de obstáculos, la autonomía del RPAS y la capacidad de procesamiento de los datos. Los parámetros fotogramétricos por estudiar se limitarán a la altura de vuelo, la velocidad y el porcentaje de traslape. La georreferenciación indirecta se establecerá mediante una poligonal base de apoyo, mientras que el procesamiento de datos se realizará exclusivamente con “Agisoft Metashape”. Además, los parámetros de vuelo y captura estarán sujetos al “*Ground Sample Distance*” (GSD) requerido para identificar el menor elemento presente en la superestructura ferroviaria.

Finalmente, dado que el INCOFER no cuenta con un protocolo de inspección formalmente establecido, se recurrirá a la revisión de literatura especializada para sustentar la comparación entre el uso de los RPAS y los métodos convencionales de inspección. Esta evaluación considerará las capacidades técnicas de un RPAS de bajo costo y se enfocará en parámetros clave como el tiempo de ejecución y los costos operativos. Las recomendaciones finales estarán orientadas a la adaptación de un protocolo técnico basado en RPAS de bajo costo para la inspección de la superestructura ferroviaria, con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso y optimizar el uso de recursos.

Limitaciones

El desarrollo del proyecto enfrentó una serie de limitaciones y posibles riesgos que pudieron afectar la recolección de datos, el procesamiento de la información y la implementación del protocolo técnico. Sin embargo, se definieron acciones de mitigación para reducir su impacto y garantizar el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Uno de los principales desafíos es la dificultad para acceder a datos sobre los procesos de inspección actuales del INCOFER, esto retrasó la evaluación comparativa entre los métodos tradicionales y la propuesta con RPAS. Para mitigar este riesgo, se gestionó con anticipación la solicitud de información a las autoridades del INCOFER, asegurando que los datos requeridos estén disponibles antes del inicio del proyecto.

Otro factor que se consideró fue el posible daño de las estaciones de referencia que conforman la poligonal base de apoyo, lo que afectaría la georreferenciación de los productos fotogramétricos. Para minimizar este riesgo, se implementarán estaciones de referencia cementadas, garantizando su estabilidad y permanencia durante el periodo de estudio.

Las condiciones climáticas, como lluvia, viento fuerte y alta nubosidad, representaron una limitante significativa, ya que afectan tanto la captura de imágenes como la estabilidad del vuelo del RPAS. Para reducir este impacto, la planificación de actividades se realizó en la época seca del año, asegurando las condiciones óptimas para los levantamientos aéreos.

Asimismo, el proyecto depende de un único equipo RPAS para la toma de datos, lo que implica un riesgo en caso de fallas técnicas o accidentes durante los vuelos. Para mitigar este riesgo, se adoptaron todas las medidas de seguridad necesarias en el uso del equipo, además de contar con un operador experimentado que garantice su correcto manejo.

Una de las limitaciones que puede presentar el protocolo es que los vuelos se ejecutan con la cámara del RPAS orientada de forma vertical (nadir). Esta configuración es adecuada para la generación de ortofotos y modelos digitales del terreno, lo que permite identificar deformaciones generales o la ausencia de elementos de gran tamaño. Sin embargo, restringe la visibilidad de otros componentes, como placas de unión, pernos u otros elementos internos del riel.

Por otro lado, la resolución de las imágenes es suficiente para proporcionar información sobre deformaciones globales y desgaste superficial de ciertas capas o secciones de la superestructura; no obstante, no se pretende llegar a detectar detalles milimétricos en la superestructura ferroviaria. Dichos aspectos solo pueden ser evaluados mediante inspecciones más focalizadas que empleen técnicas especializadas e instrumentación específica.

Por último, la falta de información sobre los costos y tiempos asociados a la inspección con métodos tradicionales pudo haber afectado la comparación de viabilidad técnica y económica del protocolo. Sin embargo, esta limitación se resolvió mediante una revisión bibliográfica, lo que permitió realizar una evaluación objetiva y fundamentada, a pesar de no contar con datos directos del INCOFER.

Agradecimientos

En primera instancia doy gracias a Dios todo poderoso, que me permitió seguir adelante durante todo el proceso de elaboración de este proyecto, así como durante toda la vida universitaria, a él le doy las gracias por haberme permitido trabajar con personas de gran corazón, que de uno u otro modo estuvieron anuentes a ofrecer su ayuda en muchas ocasiones.

Doy las gracias infinitas a mi familia, mi madre Arlyn Alfaro, mi padre Henry Marín y mi hermano menor Sebastián Marín, por ser el soporte más importante, por estar siempre pendientes y brindar su apoyo incondicional para poder lograr la meta final, son quienes en momentos difíciles han estado ahí y me han alentado a seguir adelante para poder llegar a tener un futuro mejor. Por otro lado, doy las gracias a una persona que ha sido un gran apoyo en todo este proceso, mi amiga Leiny Alpízar que al igual que mi familia ha estado siempre anuente a escucharme en los momentos más difíciles, darme consejos y ser un apoyo incondicional en todo momento.

Agradezco infinitamente a mi mejor amiga de la universidad y compañera de carrera Jazmín Cardenal, siendo ella la persona más cercana que me ha dejado la vida universitaria, con la que he compartido grandiosos momentos y la que me ha enseñado lo que es ser una persona siempre anuente a escuchar, que sin importar las circunstancias, siempre ha estado para brindarme su tiempo y amistad de manera incondicional, un soporte sumamente valioso en los momentos más complicados en los diferentes procesos de la carrera, a ella una infinidad de gracias.

En el ámbito educativo, agradezco la invaluable disposición del profesor Dr. Irving Pizarro Marchena, siendo una persona que confió en mí para apoyarlo en distintos trabajos, así como el docente que me abrió los ojos para ver la vida universitaria desde otra perspectiva, su gran conocimiento y dedicación han sido una inspiración para seguir adelante y culminar este proceso. Agradezco a mis compañeros de tesis Josué Guillen, Daniela Fallas y Erick Solís, con quienes compartí estos últimos meses mientras cada uno terminaba su proceso. Así mismo agradezco a cada uno de los profesores de la escuela por brindar su conocimiento y enseñanzas en cada uno de los cursos, estando siempre anuentes a ayudar. Por otro lado, doy las gracias a los funcionarios del INCOFER que nos compartieron la información para poder abordar ciertos aspectos de este proyecto.

Finalmente agradezco a los asistentes que me ayudaron a la elaboración de este proyecto, Jimena Vargas, Michelle Marín, Andrey Calderón, Fabiola Solís y Arianna Quesada, así como al técnico de la escuela Juan Carlos Coto, quienes representaron un apoyo crucial en el trabajo de campo para el levantamiento y recolección de datos topográficos, así como durante los vuelos fotogramétricos.

Capítulo 1: Marco teórico

Esta sección presenta una serie de conceptos para comprender los procesos en la inspección de la superestructura ferroviaria. Se abordan aspectos relacionados con la importancia de los sistemas ferroviarios en el transporte masivo de personas, así como la definición y descripción de los elementos que conforman la superestructura ferroviaria y las características del sistema ferroviario nacional.

Asimismo, se consideran los diferentes métodos de inspección ferroviaria existentes, con el objetivo de contextualizar el uso de vehículos aéreos no tripulados (RPAS) en la evaluación de la superestructura ferroviaria.

1.1 Importancia en el transporte

Los ferrocarriles juegan un papel fundamental en el sistema de transporte, ya que ofrecen grandes ventajas en temas económicos y ambientales. Su capacidad para transportar de manera eficiente grandes volúmenes de carga y pasajeros los convierte en un componente esencial para la logística a nivel nacional e internacional.

En diversos países, el sistema ferroviario contribuye de manera significativa al crecimiento económico, principalmente por su capacidad para mejorar la eficiencia logística en el transporte de mercancías. Esta eficiencia impacta positivamente en el producto interno bruto (PIB) asociado al sector transporte, ya que el ferrocarril combina velocidad y rentabilidad, manteniendo un bajo impacto ambiental, lo que lo posiciona como una alternativa sostenible frente a otros modos de transporte. (Freitas Machado, 2023).

Si bien el sistema ferroviario es ampliamente reconocido por su alta eficiencia energética y su menor huella de carbono en comparación con otros medios de transporte, también ofrece la importante ventaja de poder movilizar grandes volúmenes de pasajeros o carga. Esto contribuye significativamente a la reducción de la congestión en las carreteras, alineándose con los objetivos de promover un transporte sostenible en las regiones donde su implementación es viable. (Isazade, 2023).

A nivel nacional el transporte ferroviario de pasajeros ha desempeñado un papel fundamental en la movilidad, sobre todo en el Gran área Metropolitana (GAM). Este medio de transporte ha sido ampliamente utilizado por los usuarios debido a su accesibilidad y eficiencia, representando una alternativa viable para

evitar las congestionadas vías del GAM, particularmente durante las horas pico, además de contar con nuevos sistemas de pago electrónico, lo cual da una comodidad y seguridad extra a los pasajeros (Comunicación INCOFER, 2025).

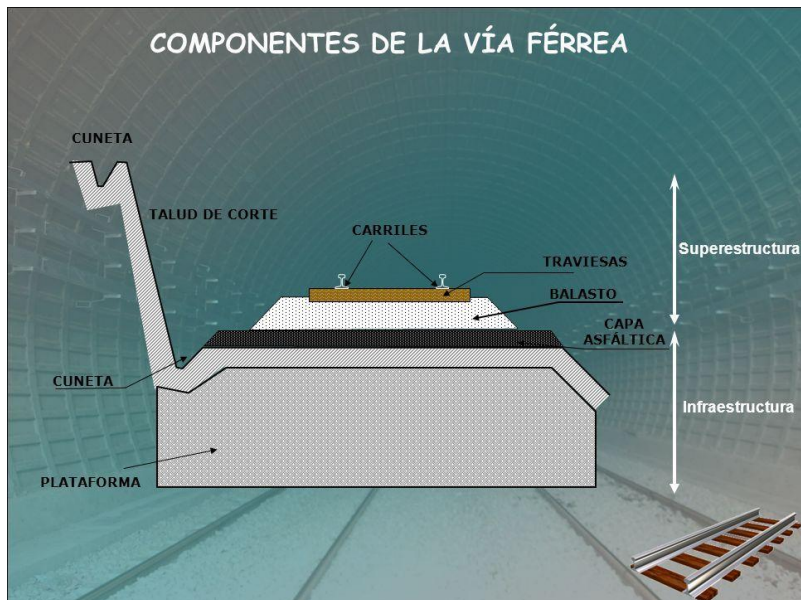
Por otro lado, en el segundo semestre del año 2020 el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER) incorporó a su flota 16 unidades múltiples de propulsión diésel-eléctrica, adquiridas a la empresa CRRC Qingdao Sifang Co. Ltd. Estas unidades, totalmente nuevas, representaron un avance en la mejora del servicio de transporte ferroviario en el país, sobre todo para sustituir material rodante que data del siglo pasado y que ya cumplió su vida útil, sin embargo, la compra de estos equipos nuevos no es la solución definitiva a un sistema que cuenta con una capacidad reducida, sobre todo en horas pico (Gudiño, 2019).

La eficiencia del transporte ferroviario no solo depende de la modernización de su flota, sino también del mantenimiento adecuado de toda su infraestructura. En particular, la superestructura de la vía férrea, por donde circula el material rodante, esta requiere inspecciones periódicas y mantenimiento riguroso para garantizar su óptimo estado. La implementación de procedimientos de inspección constantes y eficientes no solo contribuye a la continuidad operativa del servicio, sino que también es un factor clave para la seguridad de los pasajeros y el personal ferroviario.

1.2 Superestructura ferroviaria

La superestructura ferroviaria es un conjunto de elementos clave que garantiza la seguridad y eficiencia en la circulación de trenes, tanto de pasajeros como de carga. Está conformada por distintos componentes esenciales, entre ellos los rieles, que sirven de guía para el material rodante; los elementos de sujeción, que aseguran la estabilidad de la vía, los durmientes, fabricados comúnmente en concreto o madera, que proporcionan soporte y distribución de cargas, por último, el balasto, una capa de piedra triturada, la cual cumple una función fundamental en la absorción de impactos y el drenaje de la vía, contribuyendo a la durabilidad y el correcto funcionamiento del sistema ferroviario. Este elemento es diferente a la infraestructura ferroviaria, en donde se contemplan elementos como puentes, túneles, terraplenes, entre otros, en la **Figura 2** se muestra la diferencia de estas dos secciones.

Figura 2. Elementos de la superestructura e infraestructura de una vía férrea.



Nota: Tomado de (Ampayo, 2020).

El óptimo funcionamiento de la vía férrea comienza desde su fase de diseño; sin embargo, para garantizar la seguridad de los trenes y de sus pasajeros, es fundamental implementar un mantenimiento adecuado y continuo. La inspección y el mantenimiento periódico desempeñan un papel esencial en la conservación de la geometría de la vía, ya que el constante tránsito ferroviario genera desgaste y deformaciones en los materiales. Estas alteraciones deben ser identificadas y corregidas oportunamente para preservar la integridad estructural de la superestructura y asegurar la operatividad del sistema ferroviario en condiciones óptimas de seguridad (Šestáková et al., 2022).

La optimización de un sistema de seguridad en operaciones ferroviarias permite minimizar eficazmente los riesgos asociados a su funcionamiento. Para lograrlo, es fundamental aplicar un sistema de inspección que permita brindar la seguridad necesaria a los usuarios, garantizando un equilibrio entre la mitigación de riesgos y la eficiencia en los costos de implementación y mantenimiento. Estos sistemas desempeñan un papel clave en la gestión de peligros dentro del control del tráfico ferroviario, asegurando que el nivel de riesgo se mantenga dentro de parámetros tolerables y cumpla con los estándares de seguridad exigidos. Además, su correcta implementación contribuye a mejorar la confiabilidad operativa, reducir incidentes y optimizar el desempeño del sistema ferroviario en su conjunto (Gill & Smoczyński, 2021).

A continuación, se describen los principales elementos de la superestructura ferroviaria ya mencionadas, esenciales para la estabilidad y seguridad de la vía.

1.2.1 Rieles

Los rieles, también conocidos como carriles o raíles (ver **Figura 3**), son las barras metálicas sobre las cuales se desplazan los trenes y demás equipos rodantes. Es uno de los elementos fundamentales de la superestructura ferroviaria, ya que no solo sirven como soporte y guía para el material rodante, sino que, en sistemas electrificados, también actúan como conductores de electricidad. Entre sus características técnicas más relevantes destacan la interacción con la rueda de pestaña, así como su diseño específico y capacidad para soportar cargas (Aquino Jave, s.f).

Figura 3. Rieles de ferrocarril.



Nota: Tomado de (LET, s. f.).

Los rieles, al ser el primer componente en contacto con el material rodante, están sujetos a distintos tipos de fallas que pueden comprometer la seguridad y eficiencia de la superestructura ferroviaria. Diversos autores mencionan los siguientes fallos que pueden llegar a presentar los rieles:

En el caso de Arain et al., (2024), este señala que los defectos superficiales en los rieles comprenden fallas muy comunes, tales como grietas, descascarillados y desprendimientos, las cuales pueden comprometer la vida útil del riel, afectando su desempeño estructural y la seguridad operativa del sistema ferroviario.

Por otro lado, un problema recurrente en los rieles ferroviarios es la desalineación, la cual puede originarse por el tráfico intenso de trenes, así como por factores ambientales. Esta condición puede alcanzar niveles críticos que incrementan el riesgo de descarrilamiento, comprometiendo tanto la seguridad de los pasajeros como la integridad del material rodante involucrado en el incidente (Mukhtiar et al., 2023).

Por último, S. et al., (2024), resalta las fallas en los materiales, derivadas de defectos de fabricación o de una ejecución inadecuada de la soldadura entre rieles, pueden comprometer la integridad de estas uniones, generando esfuerzos irregulares que aceleran la degradación del balasto. Esta situación afecta

directamente la estabilidad de la superestructura ferroviaria, reduciendo su vida útil y aumentando el riesgo de fallos estructurales.

El mantenimiento y la inspección constante de los rieles son fundamentales para garantizar la seguridad, eficiencia y durabilidad de la superestructura ferroviaria. La detección temprana de fallas y su corrección oportuna no solo previenen incidentes graves, como descarrilamientos, sino que también optimizan el rendimiento del sistema, reducen costos de reparación y prolongan la vida útil de la vía.

1.2.2 Placas de Unión

Los rieles suelen fabricarse en longitudes estándar de 12 metros. Cuando no se emplea soldadura para garantizar la continuidad de las secciones, estos se ensamblan mediante placas de unión como las mostradas en la **Figura 4**, fijadas en las caras del alma del riel y aseguradas con cuatro o seis pernos con sus respectivas arandelas de presión para evitar la pérdida de apriete. Sin embargo, estos empalmes generan una discontinuidad en la vía, reduciendo la calidad del apoyo y provocando una deformación progresiva bajo la carga dinámica del material rodante. Como consecuencia, el paso de las ruedas sobre estas uniones produce impactos en la superficie de rodadura del riel, generando oscilaciones verticales en los trenes y afectando la estabilidad y el confort del transporte ferroviario (Lima De Paiva, 2016).

Figura 4. Placas de unión.



Nota: Tomado de (L.B. Foster, s. f.).

Las fallas en las placas de unión se pueden presentar por varios factores, una de ellas es la degradación del material, como menciona Dearden et al., (2014), la corrosión es un factor crítico que afecta a las placas de unión. Al ser un material ferroso, las placas son susceptibles a este problema, lo cual puede generar debilidad estructural en el elemento. Como consecuencia, esto podría provocar la ruptura de la placa, comprometiendo la sujeción de los rieles y afectando la estabilidad de la vía férrea.

A pesar de su uso común en la instalación de los rieles, este tipo de juntas ocasionan perturbaciones a lo largo del riel, lo que produce una experiencia incómoda durante el tránsito de los trenes. En este sentido, lo más recomendable sería optar por uniones soldadas, las cuales permiten un desplazamiento más uniforme del material rodante sobre las vías, mejorando la estabilidad y el confort en el recorrido (Lima De Paiva, 2016).

1.2.3 Elementos de sujeción

Las sujeciones son los elementos responsables de fijar los rieles de manera estable a los durmientes, permitiendo así la continuidad estructural de la vía. Su función principal es garantizar la integridad física del emparrillado (compuesto por rieles, durmientes y elementos de sujeción) frente a las diversas cargas a las que está sometido. En tramos rectos, los trenes no solo transmiten esfuerzos verticales, sino también horizontales debido al movimiento de lazo. Además, en las curvas, los esfuerzos derivados de la aceleración también deben ser soportados. Por lo tanto, las fijaciones deben contrarrestar estos esfuerzos, asegurando que los rieles y las traviesas permanezcan en su posición, y facilitando la transmisión de cargas a la plataforma de la vía (Insa Franco et al., 2016).

Los elementos de sujeción (ver **Figura 5**) se pueden clasificar en diferentes tipos, en este caso Lima De Paiva, (2016) menciona los siguientes tipos:

- Rígido: Estos favorecen la comprensión de la fijación de las vías con su apoyo en el durmiente, haciendo que la sujeción sea más eficiente.
- Elástico: En este caso la sujeción permite una pequeña articulación o flexión que da lugar a un movimiento mínimo a las vías cuando estas lo requieren, tienen la ventaja de ser buenas para absorber las vibraciones que se generan por el tránsito ferroviario.

El autor Lima De Paiva, (2016) también menciona las principales funciones que los elementos de sujeción dan a la superestructura ferroviaria, las cuales son:

- Aseguran el ancho de vía en todo el trayecto.
- Transmiten los esfuerzos de las vías a los durmientes sin que estos sufran daños.
- Presentan alta resistencia a los desplazamientos longitudinales de las vías férreas.
- Distribuyen de forma uniforme y constante la presión sobre ambos lados del bogie (conjunto de ruedas y suspensión que soporta y dirige al tren en la vía) del material rodante que circula por la vía.
- Facilita el mantenimiento de las vías férreas, evitando daños mayores o intervenciones extensas innecesarias.
- Propician inclinaciones adecuadas y permanentes a las vías a lo largo de las vías férreas.

Figura 5. Elementos de sujeción.



Nota: Tomado de (Gantry Rail, s. f.).

Como ya se ha mencionado, los elementos de sujeción son una pieza fundamental para mantener la geometría de la vía férrea, si estos fallan pueden provocar una pérdida de la linealidad de la vía o incluso llegar a generar descarrilamientos de trenes, los cuales pueden llegar a ser fatales, así lo menciona Kaewunruen et al., (2019) en su artículo sobre los planes de mantenimiento para este tipo de elementos, de esta manera esta sección de la superestructura es una de las más críticas para el protocolo a desarrollar ya que es de suma importancia poder adecuarlo a un punto donde estos elementos sean visibles de la mejor manera posible y observar los posibles fallos en caso de haberlos.

1.2.4 Durmientes

Los durmientes, mostrados en la **Figura 6**, son elementos estructurales colocados de manera transversal a la dirección de la vía férrea, su función principal es servir de apoyo para los rieles y garantizar su fijación mediante los sistemas de sujeción previamente mencionados, de esta manera se trasladan las cargas dinámicas a la subestructura y permiten su distribución en el balasto y en las otras capas soportantes. Estos pueden fabricarse en diferentes tipos de materiales, incluyendo madera, concreto y acero, así como en alternativas más recientes, como plásticos y materiales reciclados, que ofrecen ventajas en términos de sostenibilidad y durabilidad (Lima De Paiva, 2016).

Figura 6. Durmientes de concreto



Nota: Tomado de (Holcim, s. f.).

Estos elementos cumplen diferentes funciones, los autores Kaewunruen et al., (2020) y Lima De Paiva, (2016) mencionan las siguientes:

- Funcionar como soporte para las vías férrea.
- Asegurar el ancho de vía en todo el recorrido, así como mantener de forma constante sin perturbaciones.
- Actuar como soporte elástico entre la vía y el balasto.
- Distribuir los esfuerzos de tensión provenientes de las vías férreas a una capa de mayor superficie, en este caso el balasto.
- Garantizan la estabilidad de la vía, evitando que se generen desplazamientos longitudinales y transversales.

Al igual que los otros elementos de la superestructura, estos pueden llegar a presentar fallos que tienen que ser inspeccionados para tomar las respectivas decisiones, por ejemplo, Lin et al.,(2023) menciona que uno de los fallos más comunes en los durmientes se presenta en los tornillos que fijan los elementos de sujeción. Estos componentes están sometidos a cargas dinámicas generadas por el paso constante de los trenes, lo que puede provocar fallas por fatiga con el tiempo. Sin embargo, la detección de estos fallos resulta compleja, ya que la fractura o debilitamiento de los tornillos puede ocurrir dentro del durmiente, dificultando su inspección visual y requiriendo técnicas de evaluación más especializadas en este elemento.

Por otro lado, en los durmientes de concreto, especialmente en los del tipo pretensado, pueden presentarse diferentes modos de falla bajo carga, lo que finalmente conduce a la aparición de grietas en etapas tempranas. Esta situación puede requerir la sustitución del componente para evitar daños mayores en otras partes de la superestructura (Çeçen & Aktaş, 2022).

1.2.5 Balasto

El balasto está compuesto por rocas trituradas cuya función principal es soportar el peso del material rodante y facilitar el drenaje en las secciones de la superestructura. Sin embargo, este componente está expuesto a la degradación debido a las cargas y velocidades a las que circulan los trenes, por lo que resulta fundamental realizar inspecciones periódicas y mejorar las estrategias de mantenimiento para garantizar su buen estado y funcionamiento. (Guo et al., 2022).

El balasto (ver **Figura 7**) cumple diferentes funciones dentro de la superestructura ferroviaria. Actúa como apoyo para los durmientes y también los recubre, brindándoles protección adicional.

Según Insa Franco et al., (2016), las funciones principales del balasto en la superestructura ferroviaria son las siguientes:

- Transmite y reparte las cargas que se producen bajo el durmiente.
- Proporcionan anclaje a los durmientes, lo que da soporte a los esfuerzos que los demás componentes están sujetos, tales como movimientos longitudinales, variaciones de temperatura, las aceleraciones y frenado del material rodante, entre otras.
- Da elasticidad y amortiguamiento a la superestructura.
- Afina la rasante de la vía, dando el correcto acabado a la vía férrea.
- Aporta el peralte correcto a la vía en los tramos que lo requieren. Este debe lograrse a través del balasto y no mediante la rasante del terreno, para evitar posibles desplazamientos del material.
- Ralentiza, pero no evita del todo, el crecimiento de plantas en las zonas cercanas, por lo tanto, es un factor importante para considerar en las inspecciones.
- Funciona como elemento aislante del ruido debido a las capas de aire que se generan entre el agregado grueso.

Figura 7. Balasto de ferrovía.



Nota: Tomado de (Vázquez, 2023).

Al igual que los demás componentes mencionados, el balasto no está exento de sufrir desperfectos que pueden comprometer la vida útil de la vía férrea. Además, al ser un pilar fundamental de la superestructura, es crucial que se mantenga en buen estado. En su estudio, Wongkaew et al. (2024) señala que uno de los problemas que pueden presentarse en el balasto es la falla por pandeo, la cual ocurre bajo condiciones ambientales variables. Esto resalta la necesidad de realizar inspecciones frecuentes para detectar a tiempo este tipo de deterioro y prevenir consecuencias mayores.

Por otro lado, factores ambientales pueden afectar negativamente el comportamiento del balasto. Eventos como lluvias intensas o inundaciones pueden provocar el arrastre del material hacia otras zonas, así como la infiltración de partículas finas en sus capas. Esta contaminación reduce la capacidad de drenaje, lo que favorece la acumulación de humedad y el crecimiento de vegetación no deseada cerca de la vía, comprometiendo la estabilidad de la superestructura. Estos materiales finos también pueden provenir de la rasante, la cual, debido al paso continuo de los trenes y las presiones ejercidas, expulsa partículas que migran hacia el balasto, agravando aún más la situación. (Mohamad Ali Ridho & Kaewunruen, 2021).

1.3 Inspección Ferroviaria

El sistema ferroviario, con el uso continuo, experimenta desgaste y deterioro en diversos componentes, especialmente en los diferentes componentes de la superestructura. Este componente estructural del sistema ferroviario está sometido a fuerzas dinámicas y variaciones de velocidad generadas por el tránsito del material rodante, además de estar expuesto a condiciones ambientales adversas. Factores como las precipitaciones intensas pueden afectar si las partes metálicas de la superestructura, acelerando su corrosión y comprometiendo su integridad.

Dado que la superestructura ferroviaria está expuesta a múltiples factores que pueden incidir en su estado, es fundamental llevar a cabo inspecciones periódicas. Estas evaluaciones permiten identificar oportunamente la necesidad de acciones de mantenimiento, garantizando así la seguridad y operatividad del sistema ferroviario para los usuarios.

Según Lima De Paiva (2016), los procedimientos de inspección se llevan a cabo con el propósito de obtener mediciones sistemáticas y rutinarias que permitan caracterizar el proceso de degradación de cada componente de la superestructura. No todos los elementos experimentan deterioro simultáneamente, ya que cada uno posee una vida útil estimada. Sin embargo, factores como el tráfico ferroviario, las condiciones climáticas y eventos imprevistos pueden acelerar su degradación, haciendo necesario un monitoreo

constante para garantizar su adecuado funcionamiento y prolongar su durabilidad. Las inspecciones generalmente se pueden realizar de las siguientes maneras:

- Por medio de inspección visual: Este tipo de inspección es la más básica y se lleva a cabo de manera periódica por el personal del ferrocarril, como parte de las labores operativas y de mantenimiento. Aunque lo recomendable es que se realice diariamente, la frecuencia puede ajustarse según la intensidad del tráfico y las condiciones específicas de la vía.

El objetivo principal de la inspección visual es detectar fallos en los diferentes componentes de la superestructura ferroviaria, tales como el desgaste de los rieles, la presencia de fisuras, la alineación de la vía y, sobre todo, la ausencia o mal estado de elementos de sujeción, que son cruciales para la estabilidad de la vía.

- Inspección objetiva puntual: A diferencia de la inspección visual, que depende en gran medida de la experiencia del personal, la inspección objetiva puntual se basa en la utilización de equipos de medición de alta precisión para evaluar el estado de la vía en ubicaciones estratégicas. Estas inspecciones se concentran en secciones específicas del ferrocarril que están sometidas a mayores niveles de carga y desgaste.

La aplicación de esta metodología permite obtener mediciones detalladas de parámetros críticos, como el desgaste del perfil del riel, desigualdades en el ancho de vía y la calidad del balasto. Este tipo de inspección se realiza con tecnología no destructiva, lo que significa que no interfiere con la operatividad del ferrocarril y proporciona información clave para la planificación del mantenimiento preventivo.

- Inspección objetiva continua: Cuando se requiere una evaluación integral y en tiempo real de la superestructura ferroviaria, se recurre a la inspección objetiva continua. Esta metodología emplea vehículos de inspección ferroviaria especializados, conocidos como vehículos de auscultación, que funcionan como cabinas de control equipadas con sensores y sistemas de adquisición de datos en tiempo real.

Estos vehículos pueden medir simultáneamente una serie de parámetros estructurales y funcionales de la vía, como la geometría de los rieles, la alineación longitudinal y transversal, la rigidez del balasto y la respuesta dinámica de la vía ante el paso de trenes.

Una de las ventajas de este tipo de inspecciones es que permite la detección temprana de problemas que no son perceptibles mediante una simple inspección visual, por otro lado, facilita la caracterización del comportamiento dinámico del ferrocarril bajo carga real, lo que resulta fundamental para evaluar la vida útil de la infraestructura y optimizar los programas de mantenimiento.

Cada uno de estos métodos de inspección cumple un propósito fundamental en la evaluación y mantenimiento de la superestructura ferroviaria. Si bien algunos pueden representar una inversión más elevada debido al uso de equipos más sofisticados, su implementación resulta esencial para garantizar la seguridad y operatividad del sistema ferroviario.

Independientemente de la metodología utilizada, todas requieren acceso directo a la superestructura ferroviaria, ya sea a través de inspecciones visuales realizadas por personal en sitio o mediante equipos especializados que operan directamente sobre las vías. No obstante, estas inspecciones pueden resultar intrusivas y generar interrupciones en la operación ferroviaria.

En este contexto, la incorporación de vehículos aéreos no tripulados (RPAS), es una alternativa innovadora y eficiente. Su empleo permite la ejecución de inspecciones sin la necesidad de invadir físicamente la vía férrea, reduciendo riesgos para el personal, optimizando tiempos de evaluación y minimizando afectaciones a la circulación de trenes. La aplicación de esta tecnología se detalla más adelante.

Las principales condiciones que indican la necesidad de una inspección en una vía férrea se presentan cuando se pierde la geometría de diseño, ya sea en el perfil longitudinal o en el alineamiento vertical. Estas variaciones pueden ocasionar los siguientes problemas: (RFFSA, 1978):

- Variaciones en el ancho de vía férrea.
- Variaciones en la nivelación longitudinal y transversal.
- Pérdida de la alineación longitudinal de la vía.
- Desgaste vertical y horizontal de los rieles.
- Variaciones en la curvatura en segmentos curvos.

Por otro lado, Lima De Paiva, (2016), menciona que se pueden dar defectos aún mayores si no se realizan inspecciones de manera periódica tales como:

- Rieles con grietas, corrugados o con descamación superficial.
- Fracturas en el alma del riel.
- Deficiencia en la estabilidad de los durmientes por daños o roturas de estos.
- Espacio desigual entre los durmientes.
- Balasto obstruido afectado el drenaje o con capacidad de soporte comprometida.
- Placas de unión rotas o con tornillos flojos.

Muchos de los defectos en la superestructura ferroviaria pueden ser identificados con mayor precisión mediante inspecciones realizadas con sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS). El uso de esta

tecnología permite llevar a cabo evaluaciones detalladas sin necesidad de acceso físico a la vía, lo que reduce riesgos para el personal y evita interrupciones en la operación ferroviaria. Gracias a la captura de imágenes y videos de alta resolución, así como a la posibilidad de generar modelos tridimensionales mediante fotogrametría, se pueden detectar anomalías en los distintos componentes de la superestructura ferroviaria.

Además, al contar con datos georreferenciados, es posible registrar con exactitud la ubicación de los fallos, proporcionando coordenadas precisas para su pronta intervención. Esto facilita la planificación de los trabajos de mantenimiento, optimizando los tiempos de respuesta y permitiendo una asignación más eficiente de recursos.

1.4 inspección Ferroviaria con RPAS

Los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) han experimentado un crecimiento exponencial en su uso debido a su versatilidad, facilidad de operación y la amplia gama de opciones disponibles en el mercado. Estos sistemas abarcan desde modelos básicos y accesibles, ideales para tareas simples de monitoreo y captura de imágenes, hasta equipos de alto rendimiento con sensores avanzados y capacidades especializadas que permiten aplicaciones en sectores como la ingeniería, la topografía, la inspección de infraestructuras y la seguridad. Su evolución tecnológica ha permitido que cada vez más industrias incorporen RPAS en sus procesos operativos, optimizando tiempos, reduciendo costos y mejorando la precisión en la recolección de datos.

Uno de los usos más destacados de los RPAS es la fotogrametría, una técnica basada en la captura de imágenes aéreas georreferenciadas que, mediante procesamiento en software especializado, permite generar modelos tridimensionales de alta precisión, ortofotos, nubes de puntos y otros productos cartográficos. Estas herramientas son muy utilizadas en la inspección de edificaciones, carreteras, terrenos y, en el caso particular de este estudio, en la evaluación detallada de la superestructura ferroviaria. Gracias a la capacidad de los RPAS para cubrir grandes extensiones en un tiempo reducido y sin interferir con la operación ferroviaria, puede ser posible obtener información valiosa para la toma de decisiones en mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura.

1.4.1 Sistema de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS)

Los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS), también conocidos como drones, representan una tecnología avanzada que opera sin la necesidad de un piloto a bordo. Su creciente popularidad se debe a su versatilidad y eficiencia, lo que ha impulsado su adopción en múltiples sectores.

Según la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 2015), el término RPA se refiere a la aeronave en sí misma, mientras que RPAS abarca todo el sistema, incluyendo la aeronave, la estación de control, los enlaces de comunicación y otros componentes. Por otro lado, la estación desde la cual opera el piloto remoto se denomina estación de piloto remoto (RPS) o estación de control.

Siendo una tecnología relativamente moderna, se ha puesto a prueba en una gran variedad de aplicaciones, desde la agricultura con la función de monitorear las diferentes tierras agrícolas con el fin de gestionar de manera eficiente los cultivos (Задорожний et al., 2024). En seguridad y defensa donde los RPAS han sido diseñados para incorporar mecanismos de defensa para mejorar la seguridad por medio de controles y supervisión remotos (Tauseef et al., 2024). Por último, en el campo del monitoreo ambiental donde los datos recabados por medio de RPAS son utilizados para realizar iniciativas de conservación (Moreira et al., 2024).

Gracias a la gran variedad de productos derivados de los RPAS, tales como ortofotos y nubes de puntos obtenidos a través del procesamiento fotogramétrico, es posible llevar a cabo diversas aplicaciones en el ámbito civil. Un ejemplo es el uso en el monitoreo y la evaluación del avance en proyectos de construcción. Este tipo de tecnología permite realizar un seguimiento preciso y detallado, en este caso autores como Ojeda et al., (2024) mencionan que los vehículos aéreos no tripulados permiten un seguimiento en tiempo real de los proyectos de construcción, obteniendo imágenes de alta resolución que se integran con el modelado de información de construcción, facilitando la estimación precisa del avance de las obras.

En el caso del uso de los RPAS para la inspección ferroviaria, Cuypers et al., (2023) mencionan que el uso de estos es sumamente útil para evidenciar el tipo de desviaciones en las vías férreas producto del desgaste o del escaso mantenimiento de componentes clave, como los durmientes, los elementos de sujeción y el balasto, el cual, como se ha mencionado previamente, constituye la capa encargada de brindar soporte a toda la superestructura.

De esta manera se puede decir que el uso de los RPAS constituye una herramienta de gran potencial para diversas áreas de la ingeniería civil, debido a su versatilidad y capacidad de adaptación a distintas ramas. Los productos generados a partir de las imágenes y videos capturados por estos sistemas resultan

muy valiosos en el ámbito de la ingeniería de construcción, facilitando la obtención de datos precisos y detallados para la toma de decisiones y el monitoreo de proyectos.

1.4.2 Fotogrametría con RPAS

La fotogrametría con RPAS se ha convertido en una disciplina útil en una gran variedad de campos de la ingeniería, entre ellos en la ingeniería en construcción, en donde es utilizada para la planificación urbana, inspecciones de diferentes tipos de obras, entre otros. Esta técnica se puede definir como la ciencia, el arte y la tecnología para obtener información confiable y veras por medio de fotografías, en este caso tomadas por el RPAS (Wolf & Ghilani, 2016).

Para poder realizar la fotogrametría por medio de los RPAS es indispensable considerar diferentes factores que pueden alterar la calidad de las fotografías y videos obtenidos tales como los diferentes parámetros de vuelo y traslape o porcentaje de recubrimiento de las imágenes tomadas. Estos factores se detallan de mejor manera a continuación.

1.4.2.1 Parámetros de vuelo

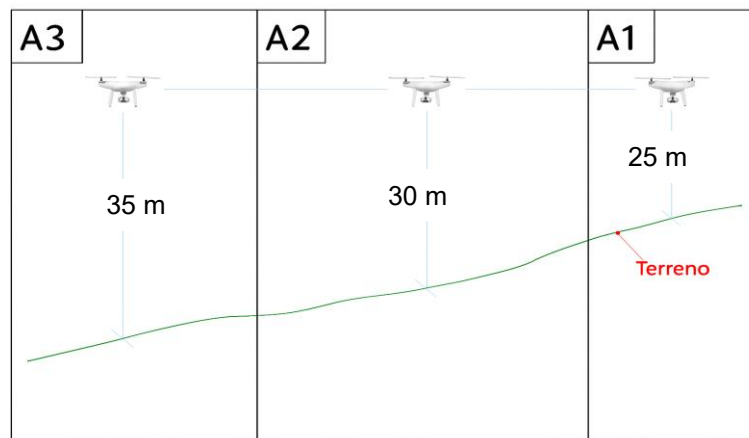
Los parámetros de vuelo en los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia se utilizan para optimizar el rendimiento y obtener los mejores resultados posibles en la captura de las imágenes y videos necesarios para la fotogrametría. Entre los parámetros de vuelo que se deben tomar en consideración para obtener buenos resultados se encuentran la altitud, la superposición de las fotografías capturadas, resolución espacial y los diferentes modos de vuelo. Estudios como el de Mora-Felix et al., (2020) revelan que con parámetros de vuelo óptimos se pueden llegar a precisiones planialtimétricas de 0,11 m y 0,38 m respectivamente con el uso de tecnología RPAS de bajo costo.

Para garantizar la calidad de los resultados en la fotogrametría, no solo es importante el manejo del RPAS, sino también considerar factores externos, como las condiciones ambientales y climáticas. Entre estos, el viento juega un papel fundamental, ya que puede afectar la estabilidad del vuelo y la captura de imágenes. Por ello, antes de realizar un vuelo para la adquisición de datos, es esencial evaluar las condiciones climáticas en la zona, a fin de minimizar posibles inconvenientes durante el procesamiento de las imágenes capturadas por el sensor del RPAS.

1.4.2.2 Altura de vuelo

Este parámetro se refiere a la altitud a la que el RPAS opera sobre el terreno o, en este caso, sobre la superestructura ferroviaria durante la captura de imágenes, como se observa en la **Figura 8**. La altura de vuelo es un factor determinante, ya que influye directamente en la resolución espacial de las imágenes obtenidas. A menor altitud, se logra una mayor resolución espacial, lo que permite capturar detalles más precisos de la superficie observada. Por el contrario, a mayores altitudes, la resolución espacial disminuye, lo que puede afectar la calidad y utilidad de la información recopilada. La selección de la altura de vuelo debe realizarse en función del propósito del estudio, garantizando que los datos obtenidos sean adecuados y relevantes para el análisis requerido (Lobo Rodríguez, 2023).

Figura 8. Altura de vuelo del RPAS sobre el terreno.



Nota: Tomado y adaptado de (Pizarro, 2024)

Un aspecto importante para considerar en la altura de vuelo es que no se recomienda operar a altitudes muy altas debido a un tema de resolución. En primer lugar, esto puede comprometer la calidad de la resolución espacial de las imágenes, como se mencionó anteriormente. Además, factores climáticos como el viento, la nubosidad u otras interferencias atmosféricas pueden afectar la estabilidad del RPAS y la precisión en la captura de datos. Asimismo, volar a grandes alturas podría implicar una posible invasión del espacio aéreo, lo que representa un riesgo para otras aeronaves (Arriola Valverde et al., 2018).

1.4.2.3 Resolución Espacial

La resolución espacial, también conocida como “*Ground Sample Distance*” (GSD, por sus siglas en inglés), es un indicador que representa la dimensión real en el terreno correspondiente a cada píxel en las imágenes

capturadas por el RPAS. Este parámetro se determina a partir de diversas variables incluidas en la ecuación 1.

$$GSD = \frac{H \cdot S_w \cdot 100}{P_w \cdot f} \quad (1)$$

Donde:

GSD = Resolución espacial (cm/píxel)

H = Altura de vuelo (m)

S_w = Ancho del sensor (mm)

P_w = Ancho de la imagen (píxel)

f = Distancia focal (mm)

Nota: Adaptado de (Cordero-Quirós, 2018).

En diversos estudios relacionados con la inspección de componentes de la superestructura ferroviaria, como el realizado por Cuypers et al., (2023), se ha demostrado la influencia de la altura de vuelo en la resolución espacial de las imágenes obtenidas. En este estudio, realizado con un RPAS de categoría industrial a una altitud de 25 metros, se logró alcanzar un GSD de 1.17 mm/píxel, lo que permitió capturar imágenes de ultra alta resolución.

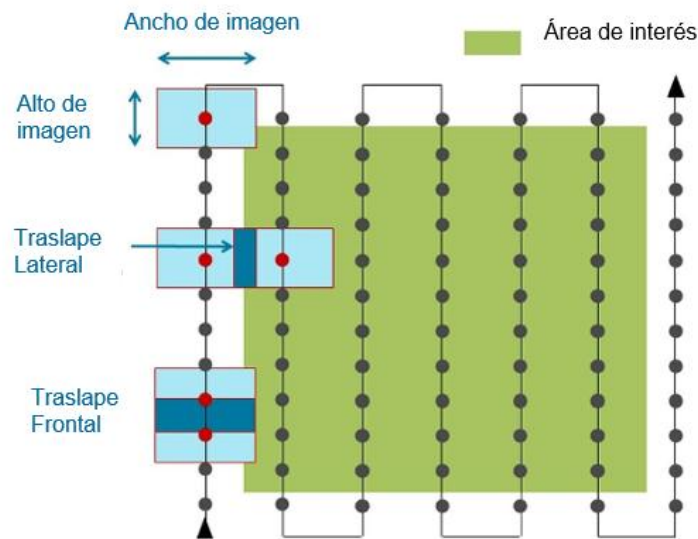
1.4.2.4 Porcentaje de recubrimiento

Otro de los factores importantes a la hora de realizar un trabajo donde se involucre la fotogrametría es el porcentaje de recubrimiento de las fotografías obtenidas con el RPAS, el porcentaje de recubrimiento hace referencia al traslape entre las imágenes tomadas por el RPAS. Este traslape permite que una misma área del terreno sea visualizada en múltiples fotografías, asegurando la presencia de puntos en común entre ellas, lo cual se torna de vital importancia para realizar el procesamiento en un software especializado (Cordero-Quirós, 2018).

Existen dos tipos de traslape que se deben considerar durante un levantamiento con RPAS: el traslape frontal, que se genera a lo largo de la trayectoria seguida por el RPAS, y el traslape lateral, que se

produce perpendicularmente a la línea de vuelo. Se recomienda que el porcentaje de recubrimiento frontal no sea inferior al 60% ni superior al 85%, ya que un porcentaje demasiado alto puede aumentar significativamente los tiempos de procesamiento sin proporcionar una mejora considerable en la precisión de los resultados. En cuanto al recubrimiento lateral, debe mantenerse dentro del rango del 60% al 80% para mitigar los efectos derivados de la posible inestabilidad de la aeronave (Lobo Rodríguez, 2023). En la **Figura 9** se ilustra de mejor manera los traslapes a la hora de realizar los vuelos con RPAS.

Figura 9. Componentes tradicionales para un plan de vuelo fotogramétrico.



Nota: Tomado y adaptado de (Cordero-Quirós, 2018).

1.4.2.5 Georreferenciación en levantamientos fotogramétricos

Al capturar fotografías con RPAS, estas incorporan información sobre las coordenadas del sitio donde se realizaron los vuelos, un aspecto fundamental para la georreferenciación de las imágenes. Estas coordenadas pueden registrarse en sistemas de referencia globales o en sistemas locales específicos de cada región o país. La georreferenciación permite posicionar con precisión las imágenes dentro de un marco espacial definido, facilitando su integración en análisis cartográficos, modelos tridimensionales y otros procesos de procesamiento de datos geoespaciales, esta georreferenciación puede ser directa o indirecta según las necesidades.

En la georreferenciación directa, cada imagen capturada por el RPAS es asignada con coordenadas obtenidas a través del receptor GNSS o GPS de la nave. Estas coordenadas proporcionan información sobre

la posición y orientación de la cámara en el momento de la captura, lo que contribuye a mejorar la precisión de los productos fotogramétricos. Sin embargo, es importante considerar que la precisión en este método puede verse limitada por errores en el rango centimétrico, los cuales, dependiendo de los requerimientos del estudio, podrían no ser aceptables para diferentes tipos de análisis (Teppati Losè et al., 2023).

Por otro lado, la georreferenciación indirecta se basa en el uso de Puntos de Control en el Terreno (*Ground Control Points*, GCP por sus siglas en inglés). Estos puntos se ubican estratégicamente en la zona donde se llevará a cabo el levantamiento con RPAS y cuentan con coordenadas previamente determinadas mediante instrumentos terrestres, como estaciones totales, o sistemas de posicionamiento satelital, como antenas GNSS. Es fundamental que los GCP sean claramente visibles en las imágenes capturadas, ya que serán utilizados durante el procesamiento fotogramétrico para mejorar la precisión del modelo generado. Este método permite alcanzar niveles de precisión milimétrica en determinados puntos, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren altos estándares de exactitud (Gordillo Salinas et al., 2020).

1.4.2.6 Productos obtenidos con fotogrametría

La fotogrametría con RPAS genera productos de gran valor para la ingeniería, con aplicaciones en diversos ámbitos como la topografía, la arquitectura, los estudios de ordenamiento vial y distintos tipos de inspecciones, incluyendo la evaluación de la superestructura ferroviaria. Entre los principales productos obtenidos a partir de este proceso se encuentran las ortofotos, las nubes de puntos y los modelos digitales de elevación, los cuales permiten un análisis detallado y preciso del terreno y las infraestructuras.

Ortofoto

Las ortofotos son uno de los primeros productos obtenidos tras la realización de vuelos con RPAS. Estas imágenes de alta resolución, libres de distorsiones en el área de interés, se emplean para representar con precisión elementos arquitectónicos, ingenieriles y de otras disciplinas (Previtali et al., 2024). Su aplicación puede resultar de gran utilidad en la detección de defectos y en la evaluación del estado de las vías férreas, permitiendo la identificación de zonas que requieren mantenimiento y facilitando la toma de decisiones para su intervención.

Nube de puntos

Se trata de un conjunto de puntos con información planialtimétrica que modela la superficie en estudio. Cada punto dentro de esta nube de datos conserva las características de colores de las imágenes capturadas, lo que permite una mejor interpretación visual del terreno. Este tipo de representación es fundamental en

aplicaciones como la cartografía, la ingeniería civil y la inspección de infraestructuras, ya que facilita la identificación de elementos de interés, la detección de irregularidades y la toma de decisiones basadas en datos precisos (Gordillo Salinas et al., 2020).

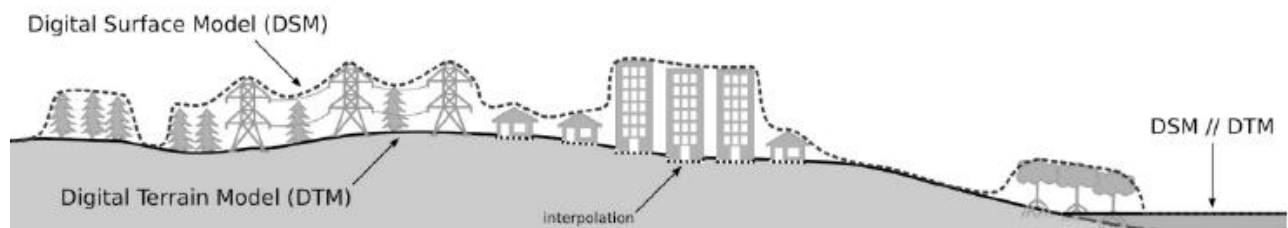
Modelos digitales de elevación

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM) son representaciones tridimensionales del relieve terrestre que contienen información detallada sobre la altitud del terreno. Estos modelos son fundamentales en diversas aplicaciones, como en la hidrología y la planificación de infraestructuras.

En el ámbito ferroviario, los DEM permiten evaluar la uniformidad del balasto, identificando posibles asentamientos o irregularidades que puedan afectar la estabilidad y seguridad de la vía férrea. Su generación puede realizarse a partir de diversas fuentes, incluyendo imágenes satelitales, levantamientos topográficos y fotogrametría aérea con RPAS (Dahal & Mishra, 2020).

Entre los modelos digitales de elevación que más se mencionan están los modelos digitales de superficie (DSM) y los modelos digitales de terreno (DMT), en el caso de los DSM estos contienen información de la elevación del terreno, de los objetos naturales y artificiales que están dentro del terreno de estudio (Romanos et al., 2018). Por otro lado, el DMT representa la información altimétrica únicamente del suelo, sin que se contabilicen elementos artificiales o naturales que pueden estar presentes en el lugar de estudio (Guth et al., 2021). En la **Figura 10** se ilustra de mejor manera la diferencia entre el DSM y el DMT.

Figura 10. Diferencia de la información altimétrica de un DSM y un DMT



Nota: Tomado de (Guth et al., 2021).

Verificación de la precisión

En los levantamientos realizados con RPAS, es fundamental verificar la precisión de los productos generados. Para ello, se emplean los puntos de chequeo (CHP), los cuales se establecen en el terreno mediante métodos

topográficos tradicionales, como el uso de estación total o receptores GNSS. Estos puntos comparten las mismas condiciones que los puntos de control en tierra (GCP) ya mencionados, pero no intervienen en el procesamiento de las imágenes capturadas con el RPAS. Su principal propósito es evaluar la precisión y exactitud de los productos obtenidos, comparando las coordenadas extraídas de estos con las obtenidas mediante instrumentos topográficos convencionales (Gordillo Salinas et al., 2020)

Capítulo 2: Metodología

2.1 Tipo de investigación

La naturaleza de esta investigación es de carácter aplicado, ya que busca dar solución a un problema específico, en este caso, la ausencia de un protocolo estandarizado para las inspecciones ferroviarias del INCOFER. Para ello, se aprovechará el conocimiento existente y se tomarán como referencia parte de trabajos ya realizados en países con sistemas ferroviarios más consolidados y tomar información de utilidad para implementarlo en el sistema ferroviario nacional.

La elaboración del protocolo y su posterior evaluación económica, en comparación con los métodos tradicionales de inspección, requieren la recopilación de información preliminar. En este sentido, es fundamental disponer de datos topográficos que permitan validar la calidad de la información obtenida mediante RPAS, lo cual implica la implementación de una poligonal de apoyo y la colocación de puntos de control y de chequeo, utilizando estación total y antenas GNSS. Este proceso responde a un enfoque de investigación secuencial, ya que sigue un sistema estructurado en la ejecución de los estudios y levantamientos. Es decir, antes de realizar los vuelos con RPAS, es necesario contar con una base de información que respalde y valide los productos generados a través de la fotogrametría. Este tipo de enfoque corresponde a una investigación de carácter cuantitativo.

Debido a la naturaleza del proyecto, que involucra un extenso trabajo de campo, se está expuesto a factores externos fuera de control absoluto. Esta característica define el enfoque del estudio como cuasiexperimental, ya que las condiciones del entorno pueden influir en el desarrollo de las actividades sin posibilidad de manipulación directa (Monje Álvarez, 2011). Otro factor para considerar y que es de suma importancia es el climático, ya que en condiciones de fuerte viento, nubosidad o lluvia no es posible operar el RPAS ni realizar levantamientos con equipo más tradicional, lo que conlleva a posibles atrasos.

2.2 Sujetos de información

En este caso, la población de estudio para el desarrollo del protocolo y su adaptación a las necesidades de la institución y del país, corresponde al tramo ferroviario comprendido entre las plataformas de Oreamuno y Plaza Paraíso, perteneciente a la Línea 1 del ferrocarril nacional. Para el desarrollo inicial del protocolo, se seleccionó un tramo experimental de aproximadamente 500 metros dentro del trayecto total en estudio. Esta muestra permitió realizar pruebas controladas para evaluar distintos parámetros de vuelo, tales como las alturas de vuelo, los traslapes entre fotografías y la velocidad del RPAS, esto con el fin de determinar las combinaciones que ofrecieran mayor precisión, comparando los resultados obtenidos mediante fotogrametría con mediciones realizadas con estación total y nivel de precisión, con el fin de garantizar una adecuada exactitud planialtimétrica.

Una vez definidos y validados estos parámetros, se procedió a aplicar el protocolo al tramo completo de 2 kilómetros. Este segmento, que se encuentra en operación, presenta condiciones adecuadas para ser utilizado como modelo de referencia, con miras a extender la aplicación del protocolo propuesto a otras líneas ferroviarias a nivel nacional. Cabe destacar que el tramo seleccionado incluye curvas horizontales, variaciones altimétricas, así como zonas urbanas y suburbanas, lo cual lo convierte en un entorno ideal para evaluar el desempeño del protocolo en diferentes condiciones operativas.

2.3 Fuentes de información

La tecnología de los RPAS ha surgido como una herramienta innovadora con aplicaciones en una amplia variedad de campos de la ingeniería, funcionando como un complemento a los métodos tradicionales para optimizar la eficiencia de diversos procesos, como las inspecciones de la superestructura ferroviaria.

Debido a esto, las principales fuentes de información para este estudio se basan en una investigación exhaustiva sobre los procesos de inspección ferroviaria realizados en países con sistemas ferroviarios de alto nivel mediante el uso de RPAS. A partir de estas investigaciones y estudios previos, se busca identificar parámetros y datos relevantes que puedan ser adaptados al contexto del sistema ferroviario nacional.

Las fuentes primarias utilizadas en este estudio fueron recopiladas a partir de una búsqueda en diversas bases de datos y revistas científicas, tales como IEEE Xplore, ScienceDirect, ASCE Library, MDPI, Frontiers y Google Académico, así como en repositorios académicos de universidades. Además, se consultaron libros especializados en sistemas ferroviarios para garantizar un respaldo teórico y técnico sólido.

Además, se llevaron a cabo reuniones con representantes del INCOFER con el propósito de recopilar información sobre los procesos de inspección que la institución aplica en la actualidad. Asimismo, estas reuniones permitieron obtener datos clave sobre el sistema ferroviario nacional, incluyendo sus características generales, los anchos de vía utilizados en el país y el sistema constructivo de la superestructura ferroviaria a nivel nacional.

2.4 Técnicas e instrumentos

Para garantizar la calidad de los productos fotogramétricos obtenidos mediante vuelos con RPAS, resulta fundamental la implementación de un control planialtimétrico preciso. Este se logra mediante la aplicación de técnicas de topografía terrestre, utilizando equipos como estación total, antenas GNSS y nivel de precisión. A través de estos instrumentos se recopilaban datos detallados de planimetría y altimetría, necesarios para validar la precisión de la información generada por los RPAS.

Estas mediciones topográficas permiten establecer una base de referencia confiable, indispensable para el desarrollo de la propuesta y la elaboración del protocolo técnico. Para ello, se llevaron a cabo diversas actividades de recolección de datos bajo distintos parámetros, con el fin de evaluar su desempeño y precisión. Más adelante se detallan estas actividades en función de los objetivos específicos planteados en la investigación.

2.4.1 Equipos

Como se ha mencionado, para el desarrollo del protocolo con RPAS fue necesario contar previamente con una base de datos topográficos precisa, obtenida a través de un control planialtimétrico. Este control fue fundamental para garantizar la calidad de los productos fotogramétricos generados posteriormente. Los datos fueron recopilados utilizando equipos de última generación, gracias a la colaboración y el préstamo de instrumentos por parte del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO).

2.4.1.1 Estación Total

Para el desarrollo del proyecto, se utilizó una estación total Geomax Zoom 40 junto con sus accesorios (trípode, prisma, bastón y bípode y trípode para bastón) como la que se muestra en la **Figura 11**. Este equipo ofrece una precisión angular de 2" o 5", según los requerimientos, y su distanciómetro cuenta con una precisión de 2 mm + 2 ppm. (Geomax, 2023).

Figura 11. Estación total Geomax Zoom 40.



2.4.1.2 Antenas GNSS

En el caso de las antenas GNSS, se utilizaron dos modelos. Para la colocación de los puntos de la línea base de referencia en la mitad del trayecto en estudio, se emplearon antenas de la marca Leica, modelo Viva GS14, como se muestra en la **Figura 12**. Antena GNSS Leica Viva GS14. Las características de estas antenas se presentan en el **Cuadro 2** ya que pueden variar según el modo en el que se esté trabajando.

Cuadro 2. Precisión de las antenas GNSS Leica Viva GS14 según su modo de trabajo.

Modo de trabajo	Condición de trabajo	Precisión
Tiempo real	Línea base individual	Hz 8 mm + 1 ppm / V 15 mm + 1 ppm
cinemático	Red RTK	Hz 8 mm + 0,5 ppm / V 15 mm + 0,5 ppm
Postproceso	Estático (Fase) con observaciones largas	Hz 3 mm + 0,1 ppm / V 3,5 mm + 0,4 ppm
	Estático y estático rápido (Fase)	Hz 3 mm + 1 ppm / V 5 mm + 0,5 ppm

Nota: Adaptado de (Leica Geosystems, 2016)

Siendo Hz: horizontal; V: Vertical

Figura 12. Antena GNSS Leica Viva GS14.



Para las demás mediciones que requirieron el uso de antenas GNSS, se utilizaron equipos de la marca CHCNAV. En el caso de la estación base, se empleó el modelo iBase (ver **Figura 13**), y para el receptor móvil, se utilizó el modelo i89 (ver **Figura 14**). Las características de ambos modelos se detallan en el **Cuadro 3**.

Cuadro 3. Precisión de la antena CHCNAV iBase y receptor móvil CHCNAV i89 según su modo de trabajo.

Especificaciones de precisión para la antena iBase	
Modo de trabajo	Precisión
Tiempo real cinemático (RTK)	H 8 mm + 1 ppm / V 15 mm + 1 ppm
Postproceso cinemático (PPK)	H 3 mm + 1 ppm / V 5 mm + 1 ppm
Postproceso estático	H 2,5 mm + 0,5 ppm / V 5 mm + 0,5 ppm
Especificaciones de precisión para el receptor móvil i89	
Modo de trabajo	Precisión
Tiempo real cinemático (RTK)	H 8 mm + 1 ppm / V 15 mm + 1 ppm
Postproceso cinemático (PPK)	H 3 mm + 1 ppm / V 5 mm + 1 ppm
Alta precisión estático	H 2,5 mm + 0,1 ppm / V 3,5 mm + 0,4 ppm
Estático y estático rápido	H 2,5 mm + 0,5 ppm / V 5 mm + 0,5 ppm

Nota: Adaptado de (CHCNAV, 2024b, 2024a)

Siendo H: horizontal; V: Vertical

Figura 13. Antena GNSS CHCNAV iBase.



Figura 14. Receptor Móvil GNSS CHCNAV i89.



2.4.1.3 Nivel de precisión

Para las mediciones en altimetría fue necesario utilizar un nivel de precisión, en este caso de la marca Ruide, modelo DSZ2, igual al mostrado en la **Figura 15**, junto a sus accesorios como el trípode y la estadia. Este nivel cuenta con precisión kilométrica de 1,0 mm (Ruide, s. f.).

Figura 15. Nivel de precisión Ruide DSZ2.



2.4.1.4 Sistema de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS)

El equipo utilizado en la adquisición de las imágenes fotogramétricas fue un RPA de la marca DJI, modelo Phantom 4 Pro-Plus, el cual se ilustra en la **Figura 16**. Esta aeronave conserva todas sus características de fábrica, excepto el receptor GNSS, que fue reemplazado por uno de la marca Emlid, modelo Reach M+, de banda simple (Emlid, s. f.). Las especificaciones técnicas de la cámara de este RPA se presentan en el **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Especificaciones de cámara del RPAS DJI Phantom 4 Pro-Plus.

RPAS	Sensor	Lente
Phantom 4 Pro-Plus	1" CMOS 20 MP	FOV 84° 35 mm de formato equivalente: 24 mm Apertura: f/2.8

Nota: Adaptado de (DJI, s. f.-b)

Figura 16. RPAS DJI Phantom 4 Pro-Plus.



En caso de ser necesario se dispone de un segundo RPA de la marca DJI, modelo Air 2S, este cuenta con todas sus características de fábrica sin ninguna modificación tal como se muestra en la **Figura 17**, las características técnicas de este se muestran en el **Cuadro 5**.

Cuadro 5. Especificaciones de cámara del RPAS DJI Air 2S.

RPAS	Sensor	Lente
Air 2S	1" CMOS 20 MP	FOV 88° 35 mm de formato equivalente: 22 mm Apertura: f/2.8

Nota: Adaptado de (DJI, s. f.-a)

Figura 17. RPAS DJI Air 2S.

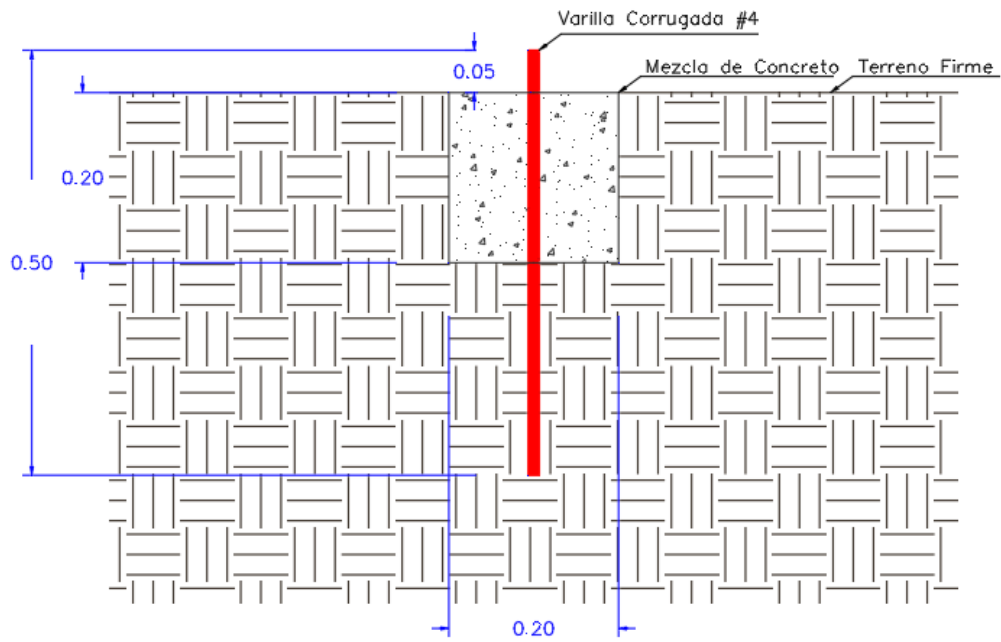


2.4.1.5 Identificador de puntos

Antes de iniciar con la colocación de los puntos de control y de chequeo, es necesario realizar dos poligonales de control que permitan dar coordenadas espaciales a dichos puntos. Dado que se trabajó cerca del derecho de vía ferroviario en operación, donde el terreno está sujeto a vibraciones provocadas por el paso del material rodante, se decidió implantar los puntos de las poligonales de forma cementada. Se implantaron 10 mojones cementados, utilizando una varilla de acero corrugado #4, de aproximadamente 50 cm de longitud, como elemento de anclaje.

El diseño de estos “mojones” se muestra en la **Figura 18**. Por otro lado, en la **Figura 19** se presenta una de las varillas utilizadas para la implantación de los mojones, en donde se resaltan dos marcas, la primera a 2 cm de la punta indicando la parte que va a sobresalir sobre la mezcla de concreto, y la otra a 20 cm de la punta indicando hasta que parte enterrar la varilla en el suelo.

Figura 18. Diseño de mojonos para poligonal de apoyo.



Detalle de Mojonos

Cotas en metros (Sin Escala)

Figura 19. Varilla corrugada utilizada para los mojonos.



Con los mojonos ya colocados y para garantizar productos fotogramétricos precisos mediante RPAS, es fundamental la adecuada colocación de los puntos de control (GCP) y puntos de chequeo (CHP),

previamente mencionados en secciones anteriores. Estos puntos fueron instalados en el terreno cercano a la vía férrea utilizando varillas corrugadas de acero número 3, cortadas con una longitud aproximada de 20 cm. Esta medida permitió clavarlas firmemente en el suelo, minimizando el riesgo de desplazamiento y asegurando la estabilidad necesaria para obtener mediciones precisas, estas varillas se ilustran en la **Figura 20**.

Es importante destacar que, en uno de los extremos de la varilla, fue necesario realizar un desgaste para permitir su inserción en el ojal central de la lona (ver **Figura 22**). Esto garantizó la alineación precisa del centro de los puntos de control y de chequeo. La figura 17B ilustra este detalle con mayor claridad.

Figura 20. Varilla corrugada número 3 de 20 cm utilizada para los GCP y CHP (A) con desgaste en uno de sus extremos (B).



(A)



(B)

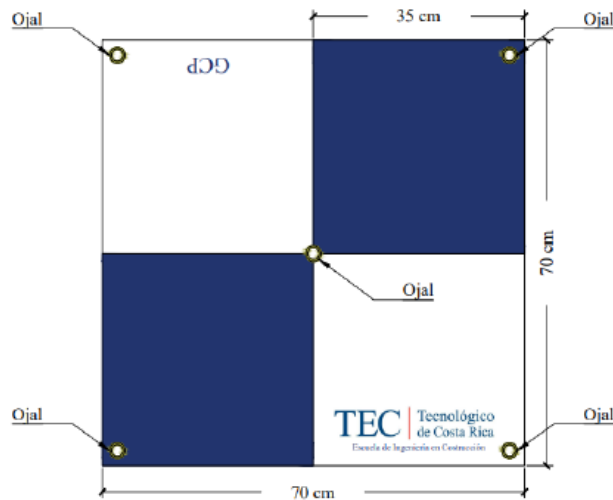
Sin embargo, el uso de varillas presenta un inconveniente, su ubicación en las fotografías tomadas por el RPAS puede ser difícil de identificar. Por esta razón, fue necesario emplear lonas como las mostradas en la **Figura 21**, permitiendo que los puntos sean claramente visibles en las imágenes y facilitando la localización precisa de su centro.

Figura 21. Lona para identificar puntos de terreno y puntos de chequeo.



Estas lonas tienen dimensiones de 70 cm por 70 cm e incluyen dos recuadros azules y dos blancos de 35 cm por 35 cm, lo que permite identificar el centro con mayor facilidad, como se ilustra en la **Figura 22**. Además, cada lona, o identificador de puntos, cuenta con una abertura en cada esquina, lo que permitió fijarlas al suelo mediante clavos y arandelas. Esto evita desplazamientos y asegura que el centro de la lona se mantenga alineado con la varilla.

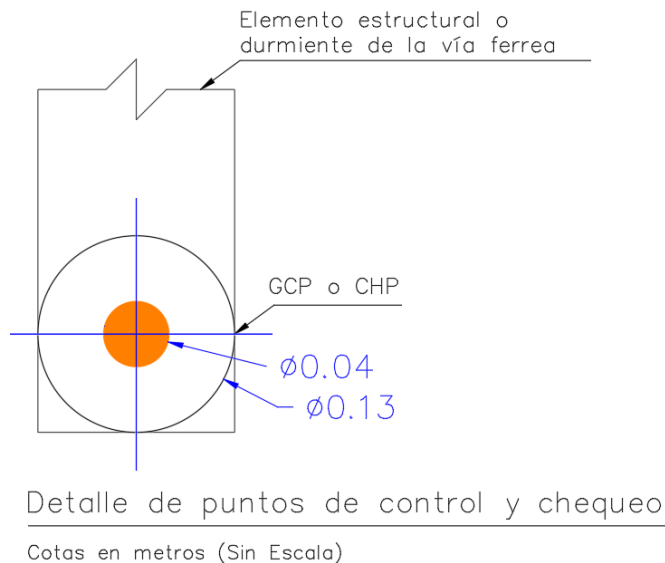
Figura 22. Dimensiones de lona para la identificación de los puntos de control de terreno y puntos de chequeo.



Nota: Tomado de (Lobo Rodríguez, 2023)

En ciertos casos, la accesibilidad a la vía férrea resultó limitada debido a la dificultad de desplazarse sobre la superestructura o por la necesidad de trasladar las lonas y otros equipos largas distancias. Ante esta situación, se optó por marcar los GCP y CHP directamente sobre elementos de la superestructura o en otros elementos estructurales, utilizando marcas con pintura. Estas marcas consistieron en un círculo blanco con un punto central de color naranja de menor tamaño, lo cual facilitó la identificación del centro durante el procesamiento fotogramétrico. Un ejemplo de este tipo de marcación se presenta en la **Figura 23**.

Figura 23. Puntos de control y de chequeo pintados en elementos de la vía férrea.



2.4.2 Programas Computacionales

Para la realización de estudios mediante fotogrametría, es fundamental utilizar diversos softwares tanto para el procesamiento de las imágenes capturadas por el RPAS como para el análisis de los datos obtenidos a través de las antenas GNSS, así como para mantener los datos en una serie de tablas y de manera ordenada que ayude en la comprobación y precisión de las diferentes mediciones. A continuación, se detallan los softwares empleados en la ejecución del proyecto.

2.4.2.1 Microsoft Excel

Este software está diseñado para la gestión y el análisis de datos. Permite realizar cálculos, generar gráficos y organizar la información de un estudio de forma clara y precisa. Además, ofrece la posibilidad de programar celdas para automatizar tareas específicas, optimizando así el flujo de trabajo (Microsoft, 2025).

2.4.2.2 Civil 3D

Autodesk Civil 3D es un software de diseño que permite abordar desafíos de ingeniería complejos en proyectos de infraestructura dentro de un entorno basado en modelos en 2D y en 3D. Permite facilitar y optimizar los procesos de documentación, incorporando herramientas avanzadas para la automatización de tareas. Además, mejora la colaboración y coordinación entre los distintos equipos de trabajo, permitiendo una gestión más eficiente del proyecto (Autodesk, 2025).

2.4.2.3 Quantum Gis

QGIS es una herramienta muy utilizada para el diseño cartográfico, que permite crear mapas de calidad en distintos formatos, ya sea para su uso en escritorio, dispositivos móviles, la nube o medios impresos. Su plataforma integra avanzadas funciones de digitalización, construcción y análisis, lo que facilita la manipulación y representación de datos geoespaciales de manera eficiente (QGis, 2025).

2.4.2.4 Agisoft Metashape

Este es un software independiente diseñado para el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales, permitiendo la generación de datos espaciales en 3D. Estos datos pueden ser utilizados en aplicaciones SIG, documentación de patrimonio cultural, producción de efectos visuales, proceso de inspección para infraestructura y para la realización de mediciones indirectas de objetos a diferentes escalas (Agisoft, 2024).

2.4.2.5 Dronelink

Este software es un importante planificador de misiones que permite crear y previsualizar vuelos automatizados desde la web o dispositivos móviles. Facilita la ejecución de misiones autónomas, permite la generación y ajuste de vuelos en tiempo real, y ofrece un panel de control unificado y personalizable para distintos RPAS. Además, combina modos de vuelo manual y autónomo, optimizando la captura de datos con herramientas de inspección, geo-rectificación y alineación de misiones. También permite organizar planes de vuelo, registrar vuelos y gestionar múltiples pilotos dentro de una misma cuenta, mejorando la precisión y eficiencia de las operaciones con RPAS (Dronelink, 2024).

2.4.2.6 Leica Geo Office

Este software, desarrollado por la empresa Leica, facilita la importación y combinación de datos provenientes de equipos de la misma marca. El software ofrece una amplia variedad de funciones, en este caso se empleó para el posprocesamiento PPK de los puntos de referencia obtenidos mediante antenas GNSS de Leica (Leica Geosystems, 2025).

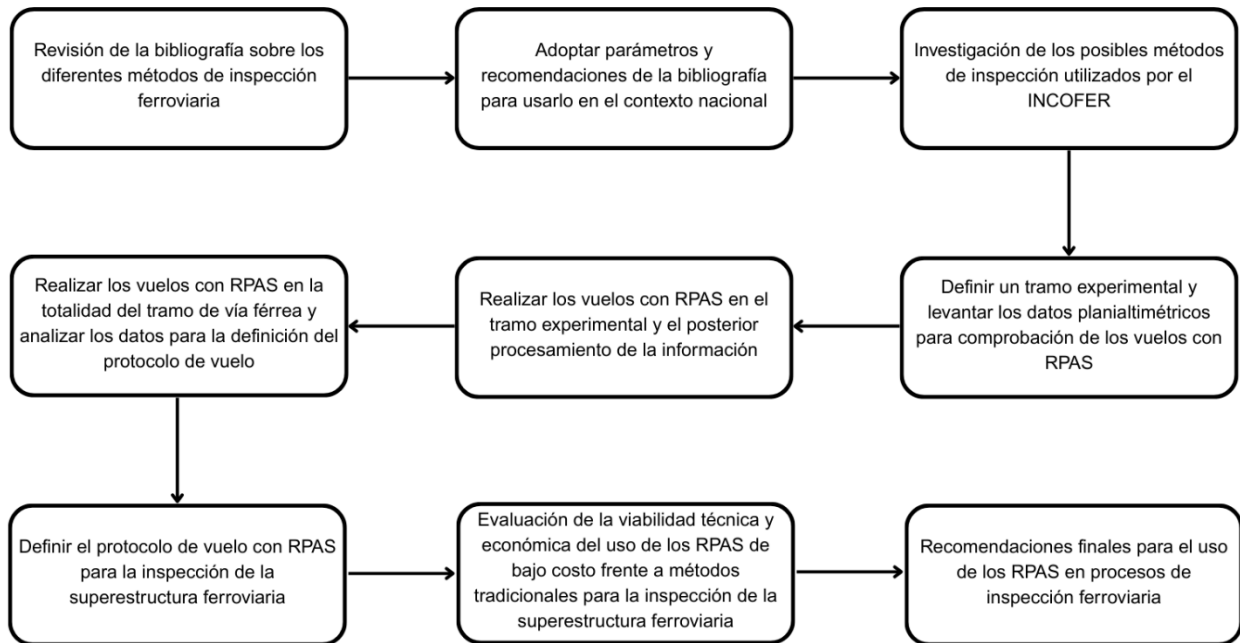
2.4.2.7 CHC Geomatics Office 2

Similar al caso anterior, este software permite editar, procesar y analizar los datos recabados por las antenas GNSS, permitiendo de manera sencilla el posprocesamiento de estos. Se destaca su uso en trabajos geodésicos, trayectorias de drones, puntos de control y proyectos de construcción e inspección en la obra civil (CHCNAV Geoespacial, 2024).

2.5 Análisis y procesamiento de información

Antes de implementar el uso de RPAS para la inspección de la superestructura ferroviaria en el tramo en estudio, es necesario llevar a cabo una serie de actividades previas que garanticen la precisión de los datos obtenidos durante los vuelos. Estas actividades permitirán contar con información confiable respecto a ubicaciones, elevaciones y demás parámetros necesarios para una inspección detallada de los distintos elementos de la superestructura ferroviaria. La **Figura 24** muestra la secuencia propuesta para el desarrollo de dichas actividades, las cuales se detallan a continuación.

Figura 24. Diagrama de flujo de la elaboración del proyecto.



2.5.1 Presentación de los resultados

La primera parte del trabajo, relacionado con la investigación de los procesos de inspección de la superestructura ferroviaria utilizando RPAS en distintas partes del mundo, se presentó a manera de resumen en la sección del marco teórico y en forma de matriz en la sección de resultados. En esta sección, se expone cómo diferentes autores recomiendan el uso de RPAS para las inspecciones ferroviarias, considerando los métodos empleados, las herramientas y los softwares utilizados, así como los parámetros de vuelo aplicados en este caso de estudio. Por otro lado, en la sección de antecedentes, se aborda de manera más general la evolución de los procesos de inspección de la superestructura ferroviaria a lo largo de los años, destacando la implementación de los RPAS en territorios con sistemas ferroviarios más desarrollados.

Los datos recolectados en el campo varían dependiendo del tipo de información que se registró. En el caso específico del levantamiento de los puntos de control y chequeo mediante la estación total y antenas GNSS, la información se presenta en una tabla que incluye los puntos correspondientes junto con sus

coordenadas precisas. Estos datos serán utilizados posteriormente para realizar comparaciones con los resultados obtenidos por el RPAS, de esta manera se facilita la visualización clara de los puntos y sus coordenadas, lo que permitirá una buena comprensión de los datos.

Dado que se presentaron diferencias entre los datos obtenidos con la estación total y los generados por el RPAS, estos fueron analizados y comparados en formato tabular, lo que permitió identificar la magnitud y los errores presentes en los datos planialtimétricos a lo largo del tramo ferroviario en estudio.

Los productos obtenidos mediante fotogrametría, específicamente ortofotos, nubes de puntos y modelos digitales de elevación, se presentan a través de figuras que ilustran el tramo de aproximadamente 500 metros seleccionado como modelo representativo para los 2 kilómetros en estudio.

A partir de los datos obtenidos en este segmento, se analizaron distintos parámetros de procesamiento en el software Agisoft Metashape. Estos parámetros pueden presentarse tanto en formato tabular como en lista, facilitando su interpretación.

El software genera informes detallados sobre cada procesamiento realizado. Dado que es necesario evaluar múltiples configuraciones, dichos informes se incluirán en los apéndices, organizados por los diferentes parámetros de vuelo analizados, hasta determinar la configuración óptima para la inspección de la superestructura ferroviaria.

En el caso de la evaluación técnica y económica de la propuesta de protocolo para el uso de RPAS en la inspección ferroviaria, se presentó una matriz de viabilidad técnica que permite visualizar de forma clara las diferencias entre la inspección de la superestructura ferroviaria mediante RPAS y los métodos tradicionales. No obstante, se constató que actualmente no se cuenta con un proceso formalmente establecido para llevar a cabo inspecciones a la superestructura ferroviaria por parte del INCOFER. Ante esta situación, se optó por complementar el análisis mediante una revisión de literatura, con el fin de sustentar que el uso de RPAS puede representar un ahorro en tiempo, costos operativos y recursos logísticos, en comparación con los enfoques tradicionales de inspección ferroviaria.

Finalmente, se presentan una serie de recomendaciones, organizadas en forma de lista, para guiar a la institución en la implementación y gestión de los RPAS en la inspección ferroviaria. Estas recomendaciones destacan los beneficios tanto para el INCOFER como para los usuarios, al contribuir a la conservación y operación eficiente del sistema ferroviario nacional.

2.5.2 Descripción del proceso de análisis

El desarrollo del trabajo implicó una serie de procesos destinados a comprender la aplicación de los RPAS en la inspección de la superestructura ferroviaria. Este proceso inició con una exhaustiva investigación bibliográfica sobre los métodos empleados en países con sistemas ferroviarios más robustos, seguida del trabajo de campo en el tramo de 2 kilómetros en estudio y culminando con la elaboración del protocolo técnico, basado en los parámetros del RPAS y su respectiva evaluación técnica y económica. En las siguientes secciones, se detallan estos procesos de manera más específica.

2.5.2.1 Primera Parte. Investigar las técnicas de inspección de la superestructura ferroviaria utilizando RPAS

Como primera etapa del desarrollo del proyecto, se llevó a cabo una amplia revisión bibliográfica de diversos autores sobre la inspección de la superestructura ferroviaria, así como sobre los métodos de inspección más tradicionales aplicados a este tipo de infraestructura de transporte público.

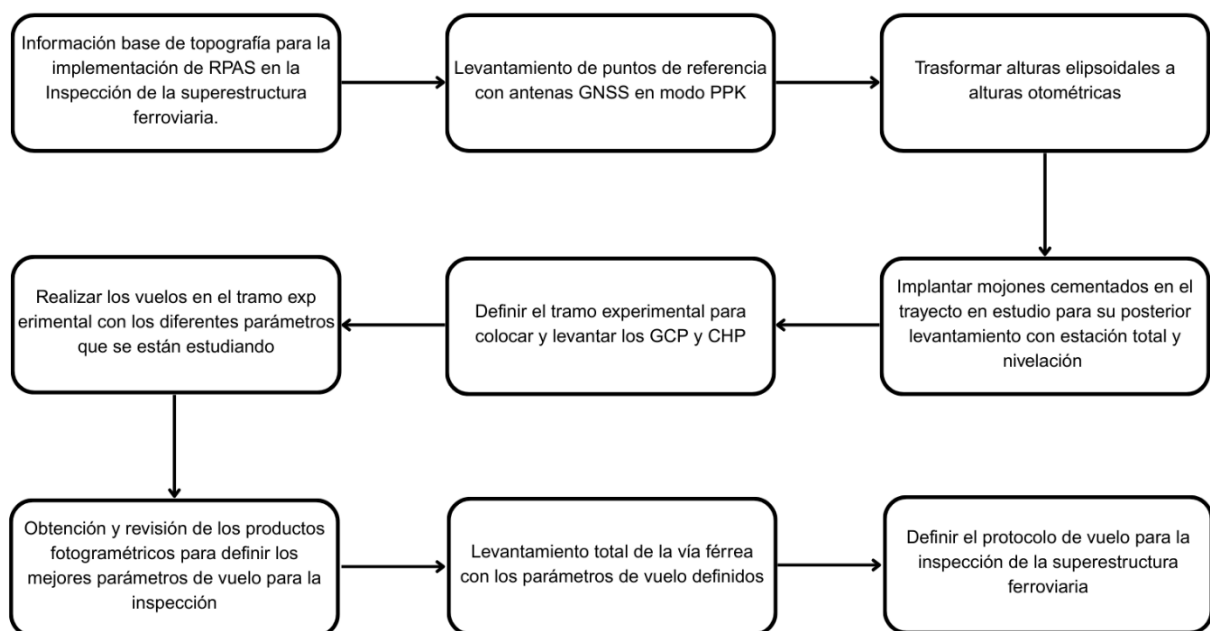
Además, fue fundamental conocer los elementos que componen a la superestructura ferroviaria para identificar sus secciones y determinar los elementos más críticos a considerar durante los vuelos. Esto permitió asegurar que dichos elementos pudieran ser visualizados de manera óptima en los productos fotogramétricos generados.

La revisión bibliográfica se llevó a cabo mediante la revisión de bases de datos especializadas, como IEEE Xplore, ScienceDirect, ASCE Library, MDPI, Frontiers y Google Académico, así como en repositorios académicos de distintas universidades. Adicionalmente, se consultaron libros especializados en sistemas ferroviarios para asegurar un respaldo teórico y técnico.

2.5.2.2 Segunda Parte. Diseño del protocolo de vuelo y captura de datos con RPAS

Con el fin de ilustrar de mejor manera esta sección, en la **Figura 25** se muestra cómo se abordó la parte de la elaboración del protocolo de vuelo, ya que esta es la sección que más trabajo conlleva a la hora que se realizó el proyecto.

Figura 25. Diagrama de flujo de para la elaboración del protocolo de vuelo.



Uno de los principales objetivos del proyecto es diseñar un protocolo de vuelo para la implementación de RPAS en la inspección de la superestructura ferroviaria. Los datos obtenidos con RPAS logró generar productos fotogramétricos de precisión considerando parámetros de altura, velocidad y traslape de las fotografías. De esta manera se pretende garantizar que los productos obtenidos posean la mejor calidad y precisión posible, logrando precisiones lo más cercanas posibles a los datos recolectados con estación total.

Para este proceso, fue fundamental llevar a cabo una revisión de los datos recopilados en un tramo experimental, con el fin de determinar los parámetros más adecuados para la implementación efectiva de los RPAS en la inspección de la superestructura ferroviaria.

Levantamiento del tramo experimental

De manera similar al trabajo realizado por Lobo Rodríguez (2023), se llevó a cabo un proceso de prueba utilizando como modelo un tramo experimental de entre 400 y 500 metros dentro del segmento de 2 kilómetros en estudio. Para ello, se implementaron tres puntos de referencia ubicados aproximadamente en la mitad del tramo, utilizando antenas GNSS en modo PPK. Estos puntos se utilizaron como base para definir una línea base central, desde la cual se establecieron dos poligonales abiertas de control, una en dirección hacia Oreamuno y otra hacia Paraíso. Esta configuración permitió cubrir todo el tramo ferroviario en estudio, asegurando un adecuado control planialtimétrico.

Para el levantamiento de los puntos de referencia, se colocó la base GNSS sobre un mojón con coordenadas conocidas y corregidas por medio de las estaciones geodésicas del Registro Nacional de Costa Rica. A partir de ahí, mediante una antena móvil, se recolectaron los datos de los tres puntos, los cuales fueron posteriormente postprocesados con el software *“Leica Geo Office”*.

Dado que cada uno de los mojones cementados requería su respectiva elevación ortométrica, las elevaciones de los puntos de referencia se corrigieron utilizando el modelo global de ondulación EGM2008, debido a que Costa Rica no dispone de un modelo más específico para representar la ondulación del geoide. Posteriormente, estos puntos sirvieron como apoyo para el levantamiento con estación total y nivel de precisión de los mojones cementados distribuidos a lo largo de las poligonales de control.

Con las coordenadas y elevaciones procesadas y corregidas de los puntos de referencia, se procedió a georreferenciar los diez mojones cementados distribuidos a lo largo del tramo de 2 kilómetros de vía férrea, utilizando repeticiones de ángulos de deflexión. En cada vértice se registraron cuatro lecturas angulares, cuyos promedios permitieron minimizar el error, asegurando así la calidad geométrica del trazado de la poligonal de control. Estos mojones funcionaron como base para la ubicación de los GCP y CHP, tanto en el tramo experimental como en el resto del segmento en estudio. Para la obtención de las coordenadas planimétricas de los mojones se utilizó una estación total, mientras que las elevaciones fueron determinadas mediante nivelación geométrica diferencial, utilizando un nivel de precisión.

Antes de iniciar con los vuelos, se procedió a seleccionar el tramo experimental, ubicado cerca del centro del segmento total de vía. Esta ubicación fue elegida para minimizar los errores, al encontrarse próxima

a los puntos de referencia ya establecidos. Además, el tramo cumplía con condiciones para ejecutar los vuelos de manera segura, ya que contaba con áreas despejadas y con elementos representativos como puentes y un paso a nivel, los cuales permiten evaluar el comportamiento de los productos fotogramétricos frente a este tipo de condiciones. Una vez definido el tramo experimental, se realizó la colocación de los GCP y CHP, así como la planificación de los vuelos utilizando el software Dronelink.

Los puntos de control y de chequeo fueron levantados utilizando una estación total, con el fin de asignarles coordenadas y elevaciones. El levantamiento se inició a partir de los puntos de referencia ubicados en el centro del tramo total. En aquellos sectores donde no se disponía de una visual directa desde los puntos de referencia, se trasladó el equipo hacia los mojones cementados próximos al tramo experimental, garantizando así la continuidad y precisión del levantamiento topográfico.

La implantación de los puntos de control y de chequeo en el tramo experimental se realizó considerando aspectos como la visibilidad directa desde el aire, fundamental para su correcta identificación durante el procesamiento fotogramétrico. Se utilizaron un total de cuatro GCP y cuatro CHP, distribuidos de forma alternada a ambos lados de la vía férrea, con una separación aproximada de 100 metros entre los GCP.

Los puntos de chequeo se colocaron intercaladamente entre los puntos de control, es decir, cada CHP se ubicó entre dos GCP consecutivos. Esto permitió una mejor distribución, colocando una varilla para localizar una lona o colocando los puntos con pintura en algún elemento de la vía férrea cada 50 metros, ya sea como punto de control o de chequeo, lo cual facilitó una aceptación planialtimétrica precisa respecto a los datos obtenidos por estación total.

Para validar los parámetros utilizados en el tramo experimental de entre 400 a 500 metros, se realizaron varias repeticiones de vuelo con diferentes combinaciones de estos, con el fin de determinar la configuración más adecuada. La implantación de los GCP y CHP se completó previamente a la ejecución de estos vuelos.

Los casos de vuelo utilizados se basaron en diferentes parámetros de recubrimiento o traslape de las fotografías, así como en la altura de vuelo del RPAS. Para definir la altura de vuelo, se tomaron como referencia los estudios realizados por (Cuypers et al., 2023) y (Ghassoun et al., 2021), en los cuales se emplearon alturas de entre 25 y 35 metros, respectivamente, en inspecciones de superestructuras ferroviarias. Además, se consideró una altura intermedia de 30 metros como punto de comparación.

En cuanto a los parámetros de traslape, se adoptaron los valores utilizados en el estudio de (Lobo Rodríguez, 2023). En el **Cuadro 6** se presentan los parámetros de vuelo empleados, incluyendo las distintas

alturas y porcentajes de traslape considerados, tomando en consideración que el equipo utilizado es el DJI AIR 2S, debido a problemas de compatibilidad entre el software Dronelink y el equipo DJI Phantom 4Pro-Plus.

Cuadro 6. Parámetros de vuelo para los vuelos con RPAS DJI AIR S2.

N° de vuelo	Porcentajes de recubrimiento		Altura de vuelo (m)	Velocidad (m/s)	Equipo Utilizado
	Frontal (%)	Lateral (%)			
1	75	65			DJI AIR 2S
2	80	70	25	2	DJI AIR 2S
3	85	75			DJI AIR 2S
4	75	65			DJI AIR 2S
5	80	70	30	2	DJI AIR 2S
6	85	75			DJI AIR 2S
7	75	65			DJI AIR 2S
8	80	70	35	2	DJI AIR 2S
9	85	75			DJI AIR 2S

En esta etapa, y luego de realizar el procesamiento de las fotos de cada uno de los nueve vuelos, se inició el análisis para determinar cuáles de los parámetros de vuelo establecidos en el **Cuadro 6** ofrecen los mejores resultados, generando productos fotogramétricos que brinden un equilibrio entre precisión y resolución, para de esta manera aplicarlo al resto del tramo en estudio.

Levantamiento completo de la superestructura de la vía férrea

Finalizado el proceso de revisión en el tramo experimental, se seleccionó la combinación de parámetros de vuelo que ofreció la mejor precisión para la inspección de la superestructura ferroviaria. Posteriormente, se procedió con el levantamiento total de la vía férrea en el tramo de estudio, el cual abarca aproximadamente 2 kilómetros.

Con el fin de garantizar la precisión del levantamiento topográfico en toda la extensión del trayecto ferroviario, se implementaron puntos de control (GCP) y de chequeo (CHP) siguiendo la misma metodología aplicada en el tramo experimental. La georreferenciación de estos puntos se basó en dos poligonales de control establecidas mediante la medición de ángulos de deflexión, las cuales proporcionaron una red de apoyo geométrico a lo largo del segmento de estudio.

Los vértices de ambas poligonales de control fueron determinados utilizando una estación total y un nivel de precisión, partiendo desde tres puntos de referencia ubicados en la zona central del tramo ferroviario. Estos puntos fueron previamente establecidos y postprocesados mediante antenas GNSS en modo PPK. Para obtener las elevaciones ortométricas de los vértices de la poligonal, se realizó una nivelación geométrica diferencial utilizando un nivel de precisión, dividiendo el procedimiento en dos segmentos, uno en dirección hacia Oreamuno y otro hacia Paraíso.

Una vez definidas y niveladas ambas poligonales, se procedió a la colocación de los puntos de control y de chequeo a lo largo del trayecto. La georreferenciación de estos puntos se basó en los vértices de la poligonal, asegurando una adecuada precisión planialtimétrica para el posterior procesamiento de los productos fotogramétricos.

Para la colocación de los GCP, se consideró que la ubicación de estos este despejada, al igual que en el tramo experimental, ya que es fundamental que estos se puedan identificar sin problema en las imágenes capturadas por el RPAS. Esto es crucial para el posterior procesamiento fotogramétrico en el software de Agisoft. Asimismo, se seleccionaron ubicaciones cercanas a la ferrovía, tomando en consideración que estos no sean desplazadas de su posición original, ya que, en caso de movimiento, el punto debería ser levantado nuevamente.

La distancia entre los puntos de control se mantuvo conforme a la metodología aplicada en el tramo experimental. De manera similar, los puntos de chequeo fueron ubicados en áreas con buena visibilidad, permitiendo su correcta identificación tras el procesamiento de datos y facilitando la evaluación de posibles errores en los resultados obtenidos.

Con la poligonal base de control y los puntos de control y chequeo ya levantados, se procedió a la planificación y programación de los vuelos con el RPAS. Para ello, se utilizó la aplicación Dronelink, dividiendo el recorrido en tramos de entre 400 a 500 metros. Esta segmentación se realizó considerando tanto la autonomía del RPAS como la capacidad de procesamiento de las imágenes capturadas.

Los puntos de control fueron importados a la aplicación mediante archivos *.kml*, lo que permitió diseñar los planes de vuelo de la manera más apegada posible al trazado de la vía y a la ubicación de los puntos previamente levantados. Un aspecto clave en esta fase fue que cada vuelo capturara al menos un punto en común entre ellos, asegurando la continuidad y precisión en el levantamiento de los datos a lo largo de los distintos tramos.

Una vez finalizada la planificación de los vuelos, se procedió a su ejecución a lo largo de la vía férrea, capturando las imágenes necesarias, las cuales fueron almacenadas en la memoria SD del RPAS.

Posteriormente, se realizó el procesamiento de los datos en el software fotogramétrico, obteniendo los diferentes productos, como ortofotos, nubes de puntos y modelos digitales de elevación.

A partir de este análisis, y revisando los resultados obtenidos entre el tramo experimental y la totalidad de la vía férrea en estudio, se definieron los parámetros óptimos de altura, traslapes y velocidad para la captura de imágenes con RPAS y así definir el protocolo técnico para la inspección de la superestructura ferroviaria.

2.5.2.3 Tercera Parte. Evaluación técnica y económica de la propuesta de protocolo

Para cumplir con este objetivo, se llevaron a cabo reuniones y comunicaciones por medio de correo electrónico con el fin de recopilar información sobre los procesos actuales de inspección de la superestructura ferroviaria por parte de la institución a cargo, así como para indagar la existencia de protocolos técnicos de inspección formalmente establecidos.

A partir de este punto, se procedió con una revisión bibliográfica exhaustiva orientada a recopilar información sobre la aplicación de vehículos aéreos no tripulados (RPAS) en la inspección de la superestructura ferroviaria. Esta revisión incluyó la revisión de estudios académicos, artículos científicos y casos documentados, con el fin de identificar las ventajas, limitaciones y buenas prácticas asociadas al uso de esta tecnología. Asimismo, se buscaron antecedentes relacionados con los costos operativos de implementación, considerando variables como el tiempo requerido para la inspección, la cantidad de personal involucrado y los recursos tecnológicos necesarios. Esta información se empleó para sustentar el análisis comparativo de la viabilidad técnica y económica del protocolo propuesto.

Con esta revisión, se elaboró una matriz comparativa de la viabilidad técnica respecto a los métodos tradicionales frente al protocolo propuesto con RPAS. En esta matriz se evaluaron criterios como la precisión de los resultados, la cobertura de la inspección, la capacidad de detección de fallas y la repetitividad del proceso, entre otros. En el ámbito económico, se discute los posibles costos asociados según las referencias, tal como ya se mencionó. Cada criterio fue ponderado con base en la información recopilada en la revisión bibliográfica y en las consultas realizadas con expertos en el área.

Finalmente, se realizó una serie de recomendaciones de los resultados obtenidos en la matriz comparativa, con el fin de determinar la viabilidad del protocolo en términos de eficiencia y relación costo-beneficio. Se identificaron los principales factores que podían influir en su implementación, así como las posibles limitaciones que podrían presentarse. A partir de este análisis, se establecieron conclusiones

dirigidas al INCOFER sobre la integración del protocolo en futuras inspecciones, resaltando su impacto en la optimización del proceso y en la reducción de costos operativos.

Capítulo 3: Resultados y análisis

3.1 Comparación de técnicas de inspección ferroviaria.

Como parte de los resultados de esta investigación, se llevó a cabo una comparación de las principales técnicas utilizadas para inspeccionar las vías férreas. El objetivo de esta comparación es tener una visión más clara de las alternativas que están disponibles hoy en día, tanto métodos más tradicionales como soluciones más avanzadas, como el uso de RPAS, satélites o métodos de procesamiento de imágenes.

Además, así es posible destacar los resultados y procedimientos usados en regiones con sistemas ferroviarios más desarrollados, y de esta manera tomarlos como referencia para adaptar o implementar ciertos parámetros en el contexto de nuestro país. Esto proporciona una base más amplia para determinar qué métodos podrían resultar más eficientes, ágiles y eficaces en la inspección y posterior mantenimiento de nuestras vías, así como en la detección de defectos.

En el **Cuadro 7**, se resumen las principales características de cada técnica utilizada en los estudios analizados, considerando aspectos como la resolución, el tipo de aplicación, sus ventajas y desventajas, y el lugar donde fueron aplicadas, en caso de que se mencione. Esto permite contar con una referencia comparativa de los distintos métodos empleados para la inspección de vías férreas, facilitando así la identificación de aquellos factores que podrían adaptarse o aplicarse al contexto nacional.

Cuadro 7. Comparación de métodos de inspección ferroviaria.

Técnica	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones	Resolución / Precisión	Región / País del Estudio	Fuente
Ultrasonidos (Detector de fallas)	Alta capacidad de detectar defectos internos en rieles, sin intervención en tráfico	Requiere equipo pesado o de contacto, más complejo de implementar	Roturas, grietas, corrosiones internas	Alta pero limitado al punto de contacto	China	Li et al. 2023

Técnica	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones	Resolución / Precisión	Región / País del Estudio	Fuente
Vehículos de inspección de vías (trenes, TGV, Iris)	Alta velocidad, sin intervención directa en la línea	Carga pesada, costoso, limitado a redes principales	Líneas de alta velocidad, mantenimiento predictivo	Alta pero destinado a evaluación dinámica	China	Li et al. 2023
Robots de inspección de rieles	Alta resolución, ágiles, más económicos que equipos en trenes	Limitado a redes más pequeñas o de difícil acceso	Líneas aisladas o de difícil acceso	Alta pero más lenta que métodos con equipos en trenes	China	Li et al. 2023
Sistema de monitoreo remoto por satélite (MOMIT)	Alta cobertura, sin intervención en infraestructura	Resolución limitada, más útil para deformaciones o daños en entorno	Monitorización multiescala de toda la red	Moderada, insuficiente para detectar defectos específicos en riel	China	Li et al. 2023
Fotogrametría con RPAS	Alta resolución espacial (GSD = 1,17 mm), bajo costo, sin interrumpir tráfico	Dependiente de condiciones de luz, estabilidad en vuelo	Localización de riel, calibrado de posiciones, evaluación de anchos de vía	Alta, tanto en resolución como en georreferenciado (Altura \approx 25.8 m)	Bélgica (Infrabel), Francia (SNCF)	Cuypers et al. 2023
RPAS con Contraste Local Weber-like	Alta tasa de detección de defectos en la superficie (93-94%)	Necesita estabilidad en el vuelo, sensibilidad a luz o sombra en imágenes	Detección de defectos discretos en riel	Alta, pero más adecuada para daños en la superficie (Altura \approx 30 m)	China	Wu et al. 2018
RPAS + Fotogrametría con GSD de 1 mm (AeroInspekt)	Alta precisión, sin interrumpir operaciones, georreferenciación precisa	Dependencia de condiciones climáticas y planificación avanzada	Medición automática de posición de rieles, delineación de vías, modelado 3D	GSD = 0.9 mm; precisión de medición \pm 3 mm (XY), \pm 8 mm (Z) a una altura de vuelo de 20 m	Francia	Ghassoun et al. 2021

Técnica	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones	Resolución / Precisión	Región / País del Estudio	Fuente
Fotogrametría oblicua con RPAS y sistemas LiDAR	Captura tridimensional detallada, detección de grietas, desplazamientos, estructuras rocosas	Alto costo de sensores, procesamiento intensivo, planificación compleja	Inspección de puentes, túneles, montañas y masas rocosas	Precisión milimétrica (grietas de 0.2 a 1.0 mm detectables) No se detalla la altura de vuelo	Taiwán	Chen et al. 2024
RPAS con algoritmo FERET	Automatización de inspección estructural, detección visual cm a cm, bajo costo	Dependiente de calibración geométrica, sensible a estructuras no estandarizadas	Verificación de conexiones, travías, alineación de vías y rieles	Resolución estructural de 1 cm a una altura de vuelo de 10 m	Indonesia	Mardiana et al. 2020
RPAS para vigilancia ferroviaria	Disuasión de robos, inspección de cables, monitoreo en tiempo real, vuelos nocturnos (BVLOS)	Dependencia de autonomía, requerimientos legales específicos	Supervisión de proyectos, detección de intrusiones, protección de activos ferroviarios	Alta resolución, cámaras 4K y sensores multiespectrales	Polonia (PKP), Bélgica (Infrabel), Francia (SNCF), Alemania (DB)	Lesiak 2020
Inspección visual	Método simple y económico; no requiere tecnología avanzada; puede realizarse diariamente	Subjetivo, depende de la experiencia del inspector; puede pasar por alto defectos ocultos	Detección de fisuras visibles, desgaste de rieles, alineación, y mal estado de sujeciones	Baja precisión; dependiente del ojo humano	-	Lima De Paiva (2016)
Inspección objetiva puntual	Proporciona mediciones precisas en puntos críticos; ideal para zonas de alto desgaste	Cobertura limitada; requiere equipo especializado; planificación de puntos de inspección	Medición de desgaste del riel, ancho de vía, calidad de balasto	Alta precisión localizada	-	Lima De Paiva (2016)

Técnica	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones	Resolución / Precisión	Región / País del Estudio	Fuente
Inspección objetiva continua (coches de auscultación)	Mediciones en tiempo real a lo largo de la vía; detección temprana de fallas no visibles	Costoso; requiere equipos especializados y personal técnico calificado	Evaluación dinámica de geometría, rigidez del balasto, alineación, respuesta estructural	Alta precisión y cobertura continua	-	Lima De Paiva (2016)
RPAS y Deep Learnign (YOLO) para la detección de anclajes	Automatización de detección, alta precisión, útil en terrenos complejos o zonas inaccesibles	Dependencia de modelos basados en datos y condiciones de luz	Monitoreo de infraestructura ferroviaria en zonas montañosas, detección de anclajes defectuosos o ausentes	Alta (precisión del modelo entre 91% y 97%), a una altura de vuelo de 35 m y velocidades de 1,1 a 1,9 m/s	España	Gómez et al. 2022

Revisando el **Cuadro 7**, fue posible tomar una decisión sobre que parámetros utilizar en el contexto de nuestro país, en este caso queda descartado el uso de ciertos softwares más sofisticados y onerosos por la inversión que representan, sin embargo, hay que dejar en claro que estas técnicas pueden ser aplicadas en estudios posteriores para revisar su viabilidad en el sistema ferroviario nacional.

Por otro lado, estudios como los realizados por (Ghassoun et al., 2021) y (Mardiana et al., 2020) fueron revisados para obtener a que altura de vuelo realizar sus estudios, sin embargo en este caso, las altura fueron de 20 metros y de 10 metros respectivamente, alturas relativamente bajas que pueden generar conflictos con ciertos obstáculos que están presentes en el tramo entre Oreamuno y Plaza Paraíso, por tal motivo no se tomaron en cuenta estas alturas para realizar vuelos de prueba en el tramo experimental.

Para sustentar el uso de RPAS de bajo costo en tareas de inspección ferroviaria, se tomaron como referencia los trabajos desarrollados por Cuyppers et al. (2023), Wu et al. (2018) y Gómez et al. (2022), los cuales obtuvieron buenos resultados en sus estudios. En el caso de Cuyppers, se tomó en consideración la altura de vuelo a aproximadamente 25 metros, ya que de esta manera se pudo localizar de manera precisa elementos como los rieles y durmientes, así como la detección de anomalías en la vía. Wu, por su parte, reportó un desempeño efectivo en la detección superficial de defectos utilizando RPAS a una altura de 30 metros, con muy buenos resultados. Finalmente, se adoptaron velocidades de vuelo entre 1,9 m/s y 2 m/s y

una altura más de 35 metros para el tramo experimental, en concordancia con los parámetros utilizados en los estudios de Gómez et al. (2022) y Lobo Rodríguez (2023), Tomando como base los estudios realizados por estos autores y sus buenos resultados se procedió a realizar todo el procedimiento para aplicarlo al sistema ferroviario de Costa Rica con RPAS de bajo costo, cuyos resultados obtenidos se detallan en la siguiente sección.

3.2 Estudio topográfico y fotogramétrico de la vía férrea

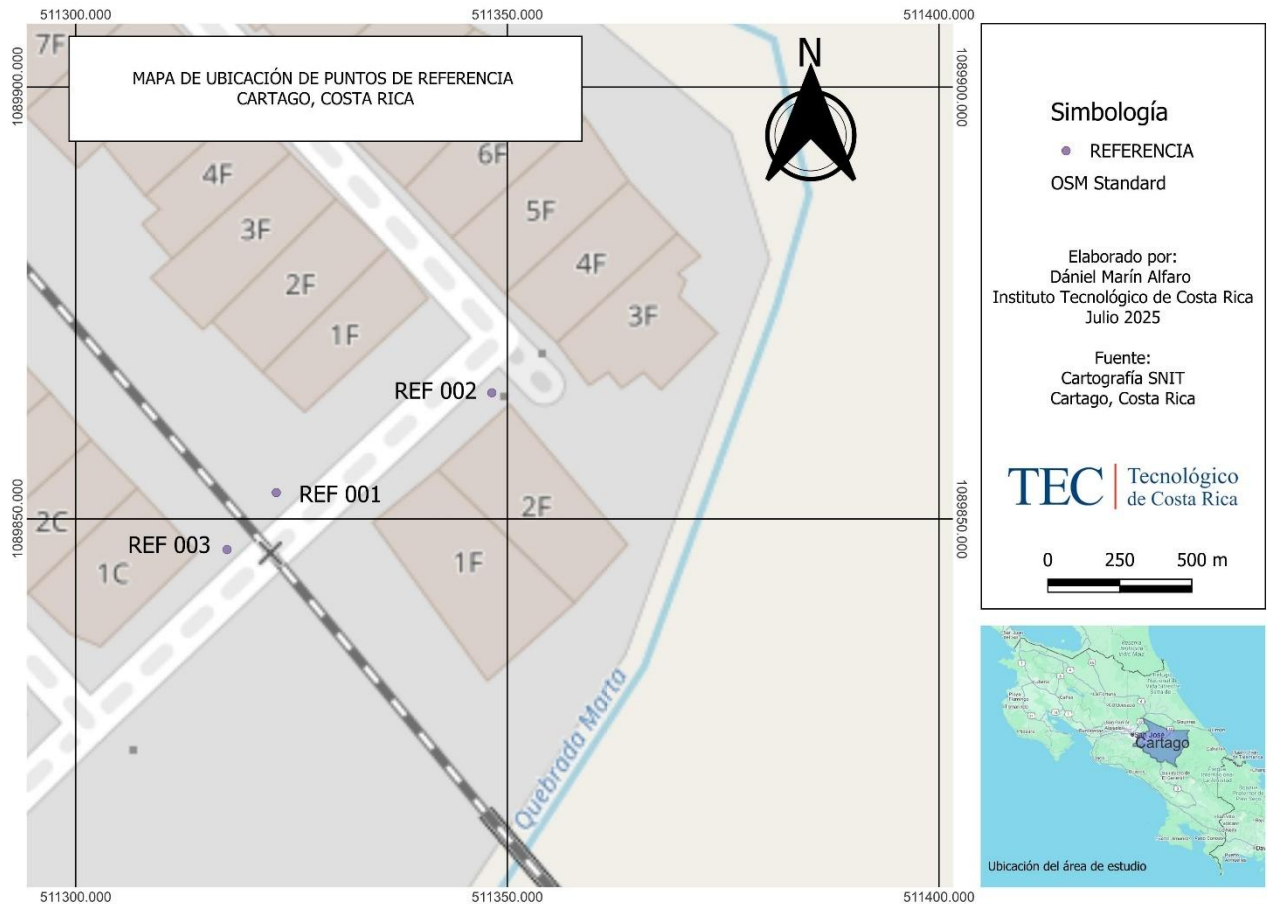
Antes de iniciar los estudios mediante RPAS de la superestructura ferroviaria, es necesario realizar un levantamiento topográfico de la vía, con el fin de garantizar y validar la calidad de los productos fotogramétricos.

Primeramente, se implantaron los tres puntos de referencia (ver **Figura 26**), aproximadamente a la mitad del tramo de 2 kilómetros de vía en estudio, como base para asignar coordenadas espaciales a los vértices de la poligonal de control. En este caso se usó una línea base de referencias y un punto extra en caso de ser requerido. Las coordenadas y elevaciones obtenidas permitieron definir adecuadamente la geometría de la poligonal de control, la cual da referencia para los siguientes procesos de georreferenciación y análisis espacial. Los datos de coordenadas post-procesadas y elevaciones ortométricas de los puntos de referencia se muestran en el **Cuadro 8**.

Cuadro 8. Puntos de referencia establecidos en la vía férrea.

Puntos de Referencia					
Punto	Norte	Este	Altura elipsoidal	Ondulación Geoidal	Altura Ortométrica
REF 001	1089853,037	511323,251	1404,470	15,560	1388,910
REF 002	1089863,508	511346,768	1404,007	15,560	1388,447
REF 003	1089846,439	511317,531	1404,209	15,560	1388,649

Figura 26. Ubicación de los puntos de referencia.



Con los puntos de referencia ya levantados y sus datos corregidos, se procedió a dividir el tramo de vía férrea en dos secciones de aproximadamente 1 kilómetro cada una. El tramo en dirección noroeste, hacia la estación de Oreamuno, se denominó **Tramo 1** (ver **Figura 27**), mientras que el tramo en dirección sureste hacia la estación de plaza Paraíso se denominó **Tramo 2** (ver **Figura 28**).

Una vez definidos los tramos, se implantó la poligonal de control. En primer lugar, se implantaron 10 mojones cementados distribuidos a lo largo de los 2 kilómetros de vía, y posteriormente se llevó a cabo el levantamiento de la información correspondiente a estos puntos, estos datos se muestran en el **Apéndice 1** y **Apéndice 2** respectivamente.

En cuanto a la elevación de los mojones cementados que conforman la poligonal de control, esta se determinó mediante nivelación geométrica diferencial. Este método fue seleccionada debido a su precisión para mediciones altimétricas en distancias cortas. A diferencia de las mediciones con GNSS, que entregan

alturas elipsoidales sujetas a correcciones por modelos geoidales, la nivelación diferencial permite obtener directamente la elevación ortométrica con mejor exactitud y menor incertidumbre.

El proceso se desarrolló utilizando como punto de partida el mojón REF 003, cuya elevación sirvió como base para el cálculo de todas las cotas a lo largo de los 10 puntos de la poligonal. Los resultados del levantamiento se resumen en el **Cuadro 9**. En cuanto a la calidad del cierre de las poligonales, se obtuvieron diferencias de 0,141 m en el eje Norte y 0,214 m en el eje Este para el punto POL1, y de 0,126 m en el eje Norte y 0,103 m en el eje Este para el punto POL10. Los datos totales de la nivelación diferencial se muestran en el **Apéndice 3**.

Cuadro 9. Datos del levantamiento para los 10 mojones de la poligonal de control.

Puntos de la Poligonal	Norte	Este	Elevación
POL1	1090394,782	510423,051	1411,228
POL2	1090343,221	510511,511	1409,916
POL3	1090305,733	510598,443	1407,909
POL4	1090178,460	510839,087	1400,436
POL5	1090050,009	511107,358	1395,833
POL6	1089981,330	511208,143	1393,887
REF 002	1089863,508	511346,768	1388,447
REF 003	1089846,439	511317,531	1388,649
POL7	1089675,929	511469,980	1383,794
POL8	1089464,211	511644,801	1376,600
POL9	1089418,893	511698,945	1374,548
POL10	1089168,146	512145,209	1373,788

Las estaciones de la poligonal ubicados en el terreno se muestran en la **Figura 27** para el tramo 1 y en la **Figura 28** para el tramo 2.

Figura 27. Ubicación de los mojones en el tramo 1.

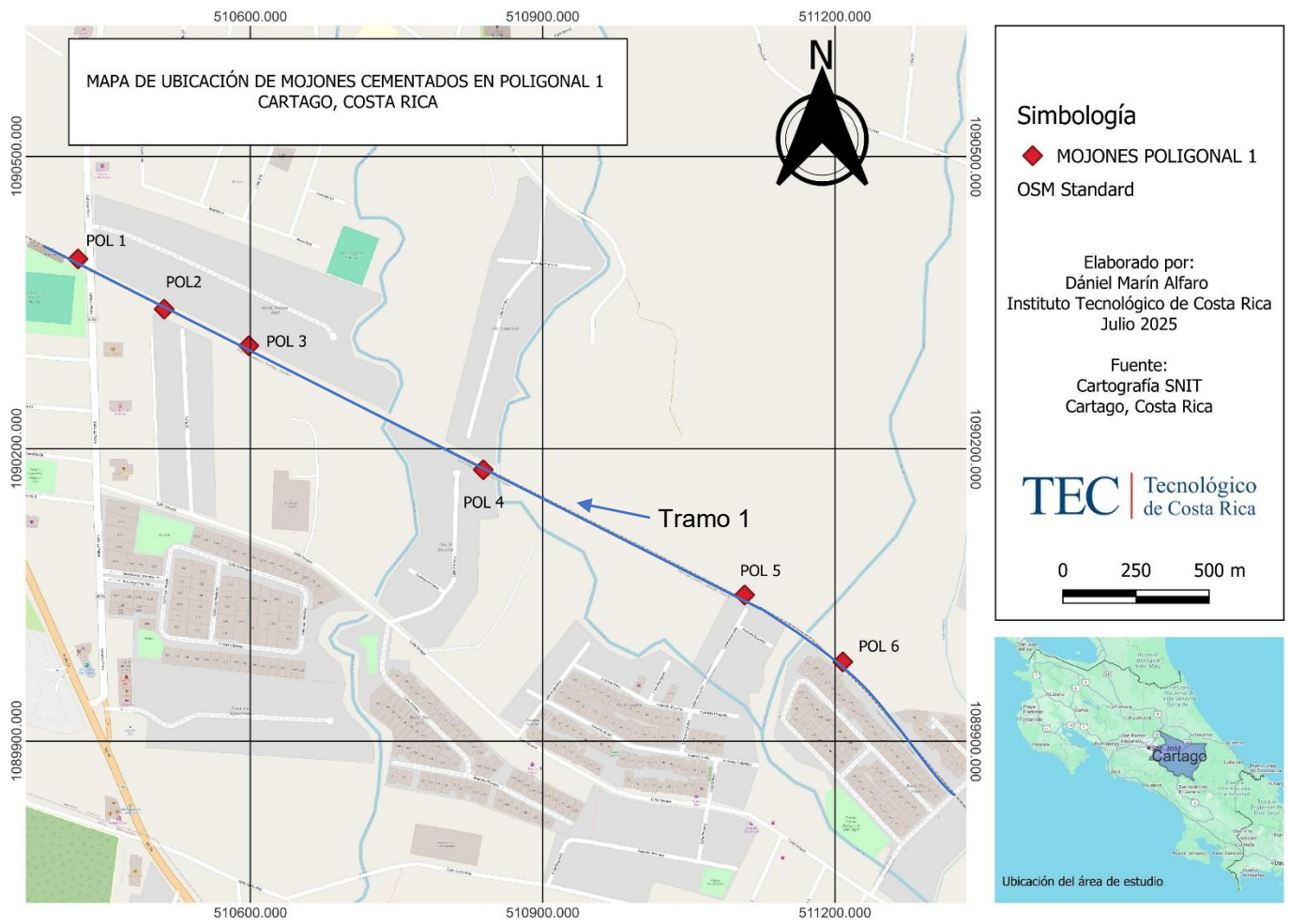
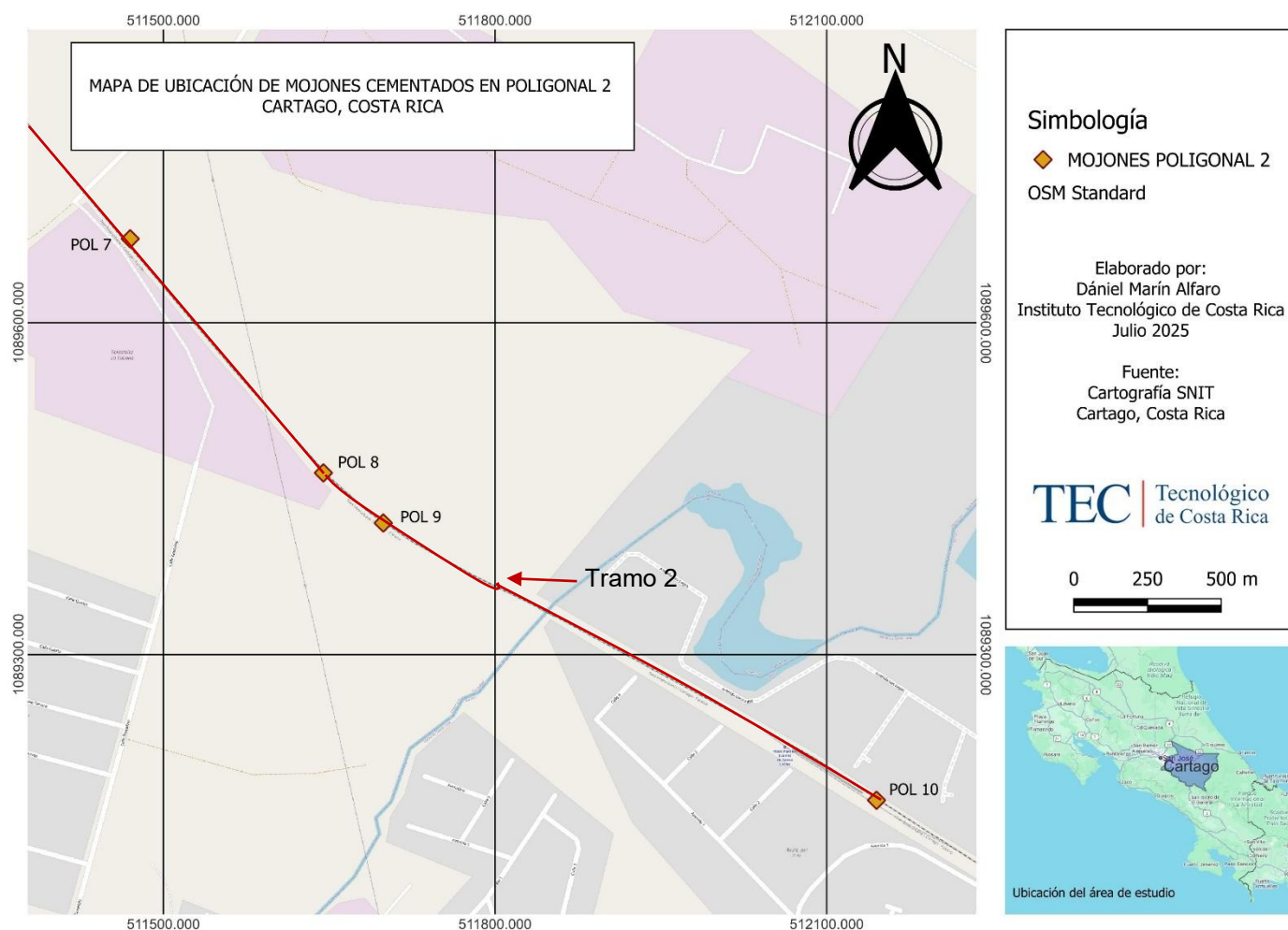


Figura 28. Ubicación de los mojones en el tramo 2.



3.3 Estudio experimental con RPAS

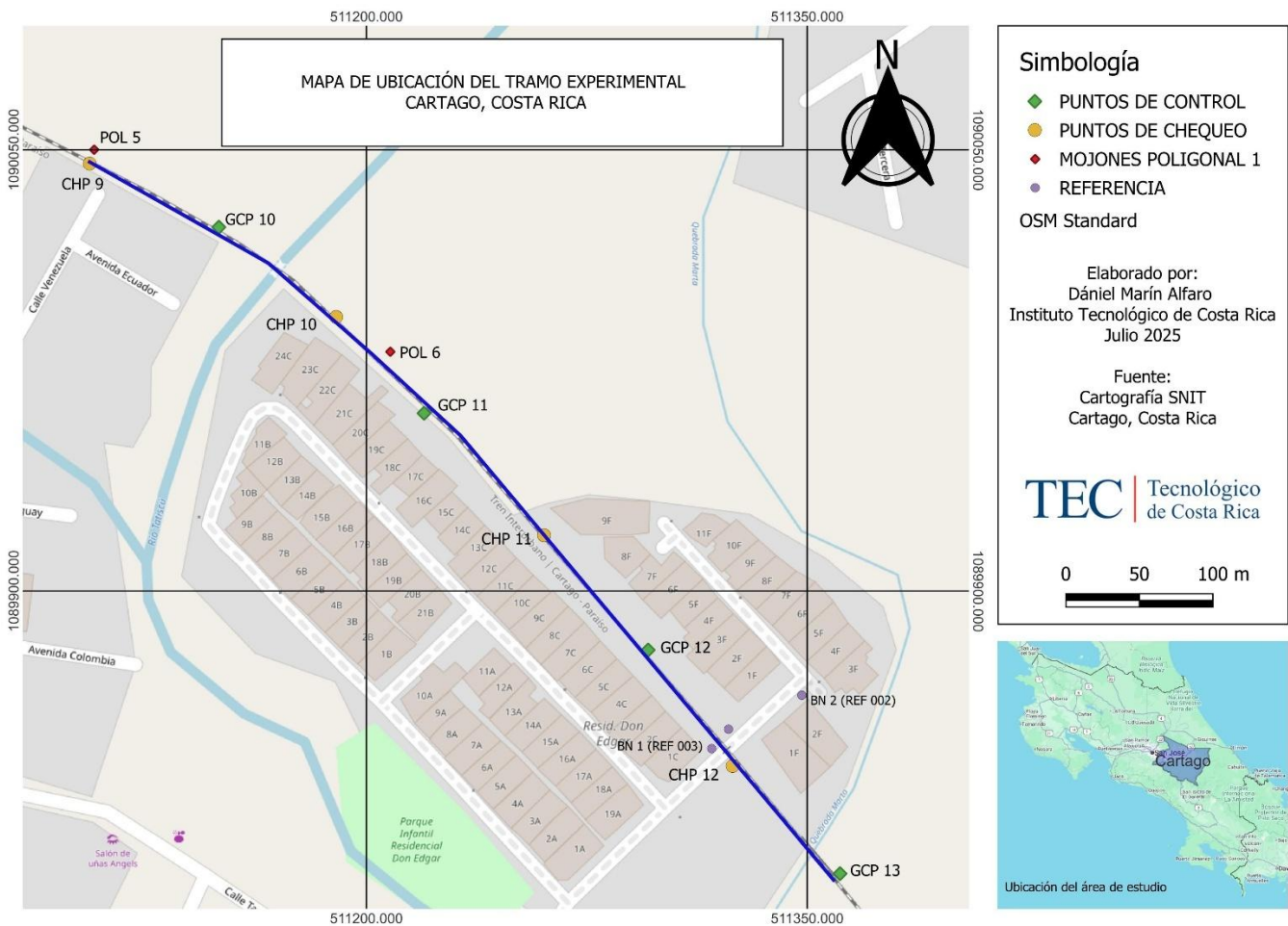
Con los datos topográficos bases ya disponibles para la ejecución de los vuelos con RPAS, se procedió a definir un tramo experimental de entre 400 a 500 metros de longitud. En este tramo se pondrán a prueba los distintos parámetros de vuelo que se detallan en el **Cuadro 6**, los cuales son, traslapes de las fotografías, las diferentes alturas de vuelo y la velocidad del RPAS, que en este caso es de 2 m/s para todos los vuelos.

El tramo experimental tiene como objetivo identificar cuáles parámetros proporcionan la mejor calidad de captura de datos para realizar inspecciones mediante RPAS. Una vez definidos los parámetros óptimos, estos se aplicarán en la totalidad de los 2 kilómetros de vía férrea en estudio, permitiendo así una evaluación completa de los resultados.

La ubicación del tramo experimental se muestra en la **Figura 29** remarcada con la línea azul, con sus diferentes puntos de control y de chequeo, así como los mojones ubicados en esa zona. Se seleccionó un sector cercano al punto medio del tramo general, dado que en esta zona se encuentran los puntos de referencia, lo que contribuye a minimizar posibles fuentes de error derivadas de trabajar en áreas más alejadas de dichos puntos.

Adicionalmente, este tramo fue elegido por diferentes características, entre las cuales destacan la presencia de una curva, desniveles del terreno, dos puentes y un cruce a nivel, elementos que permiten evaluar el desempeño del levantamiento en diferentes escenarios propios de una vía férrea en operación.

Figura 29. Tramo experimental por utilizar.

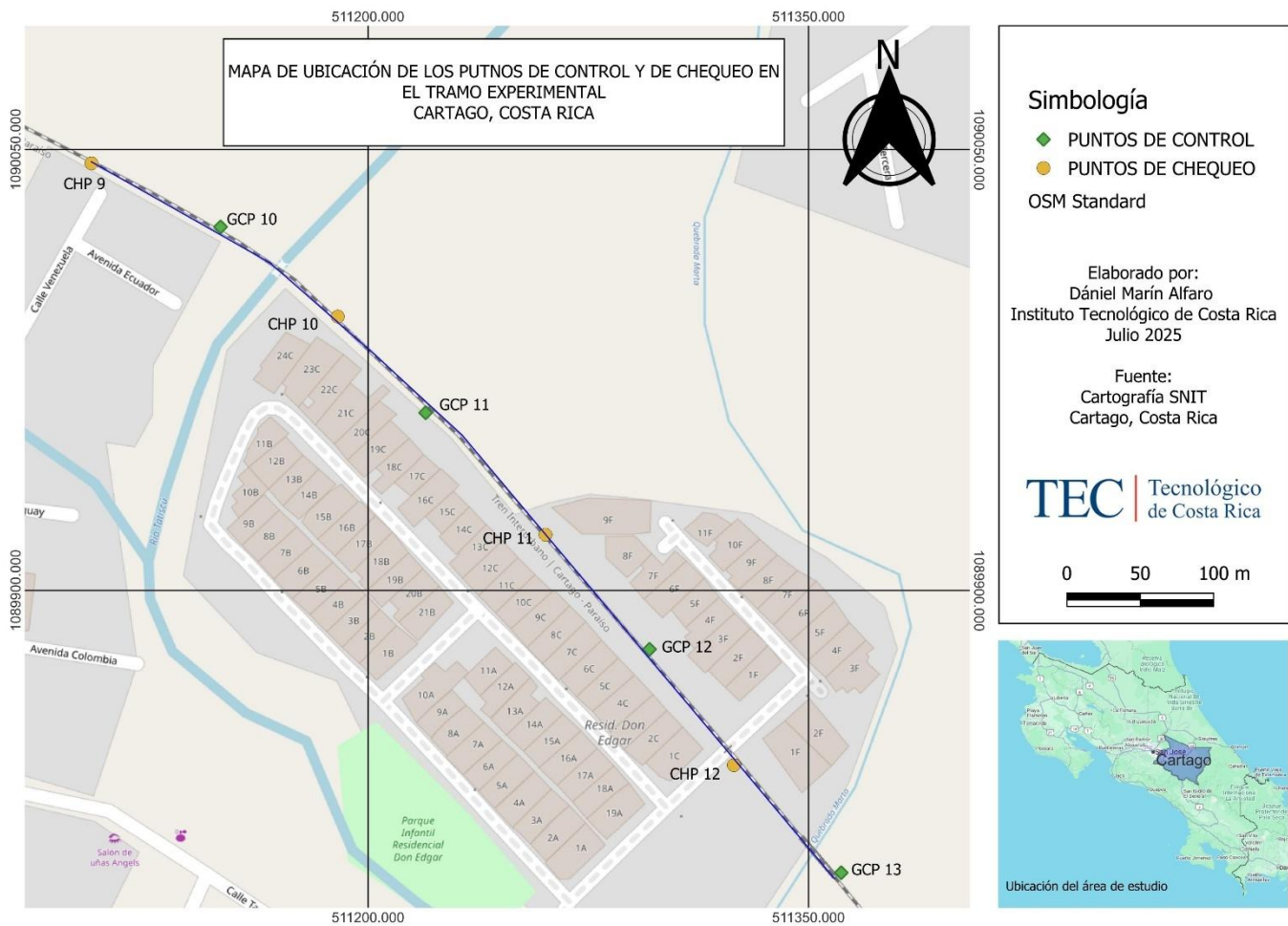


Los puntos de control y de chequeo (GCP y CHP respectivamente) mostrados en la **Figura 29** se levantaron por medio de estación total, con el fin de utilizarlos en los procesamientos de los vuelos en el tramo experimental. En el **Cuadro 10** se muestran los valores de las coordenadas planimétricas, así como las elevaciones ortométricas de este tramo. La ubicación de estos puntos se muestra en la **Figura 30**.

Cuadro 10. Coordenadas de los puntos de control y de chequeo en el tramo experimental.

Punto	Estación Total		Nivelación
	Este	Norte	Elevación
CHP9	511105,837	1090045,302	1395,734
CHP10	511189,717	1089993,177	1394,698
CHP11	511260,467	1089918,944	1391,643
CHP12	511324,629	1089840,549	1388,539
GCP10	511149,789	1090023,684	1395,596
GCP11	511219,635	1089960,438	1393,889
GCP12	511295,892	1089879,965	1389,983
GCP13	511361,198	1089803,946	1386,696

Figura 30. Ubicación de puntos de control y de chequeo en el tramo experimental.



Uno de los parámetros a considerar al realizar fotogrametría con RPAS es la resolución espacial asociada a cada altura de vuelo. En el **Cuadro 11** se presentan los valores del GSD estimados por el software de procesamiento Agisoft, los cuales también puede ser obtenidos por medio de la ecuación 1. Se observa que, conforme aumenta la altura de vuelo del equipo, también lo hace el valor del GSD. Esto implica una disminución en el nivel de detalle captado por las imágenes, por lo que este aspecto debe ser considerado cuando se requiere identificar elementos pequeños o detalles finos de la superestructura ferroviaria.

Cuadro 11. Valores de resolución espacial para cada altura de vuelo.

Altura de vuelo (m)	GSD (cm/pix)
25	0,722
30	0,801
35	0,984

La generación de los distintos productos fotogramétricos, necesarios para la inspección de la superestructura ferroviaria, fue uno de los procesos más demorados del proyecto. Esto se debió al tiempo requerido tanto para el procesamiento de las fotografías capturadas por el RPAS y la colocación de los puntos de control y de chequeo en el software Agisoft. La duración de los diferentes procesamientos se presenta en el **Cuadro 12**, donde se puede observar que, en general, a mayor cantidad de fotografías, mayor es el tiempo para completar el procesamiento.

A la hora de realizar los vuelos con el RPAS, es evidente que a menor es la altura de vuelo, mayor es la cantidad de fotografías capturadas por el equipo, lo que conlleva a que los procesamientos sean más demorados, caso contrario en alturas mayores, donde el procesamiento se realiza de manera más rápida.

Cuadro 12. Tiempo de procesamiento de productos fotogramétricos en los vuelos en el tramo experimental.

Nº de vuelo	Altura de vuelo (m)	Traslapes (frontal, lateral) (%)	Cantidad de fotos	Nube de puntos (h:min:s)	MDE (h:min:s)	Ortomosaico (h:min:s)	Total (h:min:s)
1		75, 65	123	01:06:30	00:05:59	00:07:00	01:19:29
2	25	80, 70	155	01:17:01	00:06:27	00:08:06	01:31:34
3		85, 75	204	03:01:22	00:05:57	00:09:40	03:16:59
4		75, 65	104	00:57:53	00:04:49	00:05:17	01:07:59
5	30	80, 70	120	01:15:37	00:04:27	00:05:29	01:25:33
6		85, 75	169	02:08:53	00:05:05	00:07:25	02:21:23
7		75, 65	89	00:50:13	00:03:52	00:04:33	00:58:38
8	35	80, 70	111	01:08:02	00:03:52	00:05:20	01:17:14
9		85, 75	148	02:18:20	00:04:09	00:06:12	02:28:41

Mediante el software de procesamiento utilizado se obtuvieron las coordenadas de cada uno de los puntos de chequeo ubicados en el tramo experimental. Como ejemplo, se utilizaron los datos correspondientes al vuelo número 3. En el **Cuadro 13**, es posible comparar las coordenadas obtenidas mediante levantamiento clásico con aquellas generadas por medio del RPAS. Los parámetros de vuelo correspondientes al vuelo número 3 se presentaron en el **Cuadro 12**. La totalidad de los datos recolectados durante los vuelos en el tramo experimental se encuentran disponibles en el **Apéndice 7**.

A partir de la información recopilada mediante el levantamiento clásico y el generado con RPAS, se procedió al cálculo de los errores entre ambos conjuntos de datos. Estas diferencias reflejan la precisión de cada método en la obtención de coordenadas. Los resultados se presentan en el **Cuadro 14**, donde se detallan las diferencias planialtimétricas de cada punto. Cabe destacar que los valores positivos o negativos indican la dirección del error dentro del sistema de proyección cartográfica utilizado, en este caso **CRTM05**.

Cuadro 13. Coordenadas de los puntos de chequeo obtenidas por topografía terrestre y el procesamiento del vuelo 3.

CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,847	1090045,284	1395,720
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,735	1089993,187	1394,666
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,462	1089918,941	1391,597
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,632	1089840,560	1388,566

Cuadro 14. Diferencias entre las coordenadas de los puntos de chequeo en el vuelo 3.

CHP	Diferencias		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	0,010	-0,018	-0,014
10	0,018	0,010	-0,032
11	-0,005	-0,003	-0,046
12	0,003	0,011	0,027

En la siguiente sección se detallan las diferencias obtenidas en planimetría y altimetría, con el fin de identificar cuál de todos los vuelos presenta mejores resultados en los distintos parámetros evaluados. Esto permitirá definir los parámetros del protocolo de vuelo más adecuado para llevar a cabo la inspección de la superestructura ferroviaria con el uso de RPAS.

3.3.1 Análisis de diferencias en planimetría

Con las diferencias ya calculados entre las coordenadas obtenidas mediante el procesamiento en Agisoft con aquellas obtenidas por topografía terrestre, se procedió a determinar los errores lineales correspondientes a cada punto de chequeo ubicado en el tramo experimental. Estos errores se presentan en el **Cuadro 15**.

Por otro lado, en el **Cuadro 16** se muestran las medidas descriptivas asociadas, las cuales son fundamentales para analizar cuáles parámetros de vuelo ofrecen los mejores resultados en términos de consistencia y precisión relativa de los datos para aplicarlos en la inspección de la superestructura ferroviaria.

Cuadro 15. Diferencias lineales en puntos de chequeo para el tramo experimental

CHP	Diferencias lineales (m)								
	Número de Vuelo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	0,016	0,053	0,021	0,016	0,016	0,019	0,038	0,031	0,023
10	0,036	0,028	0,020	0,015	0,024	0,020	0,014	0,014	0,033
11	0,017	0,045	0,006	0,008	0,010	0,018	0,010	0,017	0,019
12	0,014	0,006	0,012	0,021	0,008	0,013	0,007	0,009	0,002

Cuadro 16. Medidas descriptivas de los errores lineales obtenidos en el tramo experimental

Medidas Descriptivas	Número de vuelo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Máximo	0,036	0,053	0,021	0,021	0,024	0,020	0,038	0,031	0,033
Mínimo	0,014	0,006	0,006	0,008	0,008	0,013	0,007	0,009	0,002
Rango	0,022	0,047	0,015	0,013	0,017	0,007	0,030	0,022	0,030
Promedio	0,021	0,033	0,015	0,015	0,015	0,018	0,017	0,018	0,019
Desviación Estándar	0,010	0,021	0,007	0,005	0,007	0,003	0,014	0,010	0,013

En el **Cuadro 16** se observa que los vuelos 4 y 6 presentan las menores desviaciones estándar, 5 mm y 3 mm, respectivamente, lo cual indica una buena consistencia en las diferencias lineales registrados en los puntos de chequeo. Además, el rango de diferencias en el vuelo 6 es el más bajo entre todos los vuelos, de 7 mm en este caso, lo que refuerza su estabilidad métrica y la calidad de los valores.

Sin embargo, a pesar de la buena precisión obtenida en los vuelos 4 y 6, ambos fueron ejecutados a una altura de 30 metros y como se observa en el **Cuadro 11**, resulta en un mayor GSD. Es importante señalar que el GSD está inversamente relacionado con la resolución espacial de las imágenes, es decir, un GSD mayor implica una menor resolución y menor nivel de detalle, lo que puede dificultar la identificación de ciertos componentes de la superestructura ferroviaria.

Por esta razón, se selecciona los parámetros usados en el vuelo número 3, realizado a una altura de 25 metros, el cual presenta un GSD menor, por ende, una mayor resolución espacial. Esto permite obtener imágenes con mayor nivel de detalle, lo cual es fundamental para la inspección de elementos críticos. Si bien este vuelo presenta una desviación estándar de 7 mm, ligeramente superior a la de los vuelos 4 y 6, esta diferencia (de aproximadamente 2 mm) se considera despreciable dentro del rango de tolerancia aceptado para levantamientos fotogramétricos con RPAS, manteniendo un equilibrio adecuado entre precisión y detalle.

Además, el vuelo número 3 presentó valores bajos y con precisiones relativas de los datos consistentes en varias medidas, incluyendo un rango de diferencia reducido y un promedio de diferencia lineal cercano a los 15 mm tanto en el eje Este como en el eje Norte. Si bien otros vuelos mostraron diferencias planimétricas ligeramente menores, los errores obtenidos en este caso se mantienen dentro del margen considerado aceptable para trabajos de fotogrametría con RPAS, como menciona Wenhao, (2001), quien señalan que la precisión en fotogrametría de puede oscilar entre $\pm(5 \text{ mm y } 35 \text{ mm})$, dependiendo de factores como la resolución del sensor y las condiciones del vuelo. Por tanto, este vuelo representa una alternativa

técnica balanceada entre precisión y resolución espacial, siendo adecuado para inspecciones detalladas de elementos que por su tamaño se consideran críticos en la superestructura ferroviaria.

3.3.2 Análisis de diferencias en altimetría

En el caso del análisis altimétrico, las diferencias se obtuvieron restando las cotas de elevación determinadas en campo mediante métodos de topografía terrestre (nivelación diferencial) a las cotas generadas a partir de los productos fotogramétricos procesados en el software Agisoft Metashape. A diferencia del análisis planimétrico, en el que fue necesario calcular el error lineal entre coordenadas, en este caso se utilizaron directamente las diferencias de elevación entre ambos conjuntos de datos. Los resultados obtenidos se presentan en el **Cuadro 17**, mientras que el **Cuadro 18** muestra las medidas descriptivas correspondientes para esta sección del análisis.

Cuadro 17. Errores altimétricos en puntos de chequeo para el tramo de experimental.

Diferencias altimétricas (m)									
CHP	Número de Vuelo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	0,032	0,030	0,014	0,037	0,012	0,006	0,017	0,080	0,046
10	0,004	0,012	0,032	0,020	0,012	0,032	0,030	0,030	0,011
11	0,011	0,003	0,046	0,006	0,027	0,034	0,045	0,038	0,038
12	0,006	0,042	0,027	0,018	0,014	0,022	0,015	0,011	0,024

Cuadro 18. Medidas descriptivas de los errores altimétricos obtenidos en el tramo experimental.

Medidas	Número de vuelo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Descriptivas									
Máximo	0,032	0,042	0,046	0,037	0,027	0,034	0,045	0,080	0,046
Mínimo	0,004	0,003	0,014	0,006	0,012	0,006	0,015	0,011	0,011
Rango	0,028	0,039	0,032	0,030	0,015	0,028	0,030	0,069	0,035
Promedio	0,013	0,021	0,030	0,020	0,016	0,024	0,027	0,040	0,030
Desviación Estándar	0,013	0,018	0,013	0,012	0,007	0,013	0,014	0,029	0,016

En el caso de las diferencias altimétricas obtenidas a partir de los valores generados directamente por el software de procesamiento Agisoft y de la consistencia y precisión relativa de los datos realizado se observa que el vuelo número 5 es el que presenta el valor más bajo de desviación estándar, con un valor de

7 mm, así como un rango de 15 mm. Estos valores reflejan una alta precisión altimétrica, lo que en principio lo convertiría en el mejor vuelo en términos de precisión altimétrica.

Sin embargo, al igual que en el análisis planimétrico, se considera también el tamaño del GSD, es decir, el nivel de detalle por píxel obtenido a partir de la altura de vuelo. En este sentido, el vuelo número 3, realizado a una altura de 25 metros, ofrece una resolución espacial superior respecto a los vuelos realizados a 30 metros, como es el caso del vuelo 5.

Aunque el vuelo 3 presenta una desviación estándar un poco mayor, en este caso de 13 mm, este valor sigue siendo aceptado para estudios con fotogrametría, donde se esperan precisiones de ± 5 mm a 35 mm según Wenhao, (2001). Por otro lado, el vuelo 3 mantiene un equilibrio favorable entre precisión y consistencia, con un rango de 32 mm indicando estabilidad en la calidad del modelo altimétrico generado.

Por estas razones, y tomando en consideración una mejor resolución y detalle en la imagen para observar los elementos de la superestructura ferroviaria, se considera que el vuelo número 3 representa la mejor opción, tanto en planimetría como en altimetría, indispensable para una inspección técnica de la superestructura ferroviaria.

3.3.3 Levantamiento total del tramo en estudio

Una vez analizados los datos obtenidos en el tramo experimental, se procedió con el levantamiento fotogramétrico completo de la vía férrea en estudio, empleando los parámetros definidos para el vuelo número tres, según lo indicado en la sección anterior. El levantamiento total se realizó mediante cinco vuelos adicionales, más el correspondiente al tramo experimental, alcanzando así una totalidad de seis vuelos. Las coordenadas completas de los puntos de control y de chequeo se presenta en el **Apéndice 8**.

Cabe destacar que a lo largo del trazado ferroviario en estudio se identificaron diversos obstáculos de altura, como árboles y líneas de transmisión eléctrica de alta tensión. Si bien estos elementos no representaron una interferencia para la ejecución de los vuelos con los parámetros establecidos, constituyen un factor relevante a considerar en futuras aplicaciones de sistemas RPAS en otros tramos. En estos casos, podría ser necesario ajustar la altura de vuelo, por ejemplo, a 30 metros, lo cual conllevaría una posible disminución en la resolución de las imágenes obtenidas, pero manteniendo aún muy buenas precisiones para poder utilizar los productos fotogramétricos según sea necesario.

Con el objetivo de facilitar la ejecución de los vuelos en campo, se emplearon dos métodos para marcar los puntos de control y de chequeo, en algunas zonas se utilizaron lonas, como se muestra en la

Figura 21, mientras que en otras se optó por puntos pintados directamente sobre elementos de la superestructura, como el ilustrado en la **Figura 23**.

En los casos donde se utilizaron lonas, el proceso requirió un tiempo aproximado de 15 minutos para su colocación y 10 minutos adicionales para su retiro posterior a la finalización del vuelo. Por lo tanto, cada tramo en el que se emplearon lonas demandó alrededor de 35 minutos en total para su levantamiento. Por otro lado, cuando se utilizaron puntos pintados previamente, el proceso fue más ágil, ya que no fue necesario desplazarse sobre la vía férrea para colocar marcadores. En estos casos, el procedimiento consistió únicamente en preparar el RPAS y ejecutar el vuelo, lo que tomó aproximadamente 10 minutos por tramo, los cuales tenían una longitud alrededor de 400 a 500 metros debido a la autonomía que presenta los RPAS de bajo costo.

Considerando que, de los seis tramos, únicamente dos se ejecutaron con lonas y los cuatro restantes con puntos pintados, el tiempo total estimado para levantar los aproximadamente 2 kilómetros de vía férrea en estudio fue de alrededor de tres horas y treinta minutos. En este dato no se contempla que los GCP y CHP ya habían sido establecidos y georreferenciados en días previos a los vuelos.

Con los vuelos ya realizados, se procedió al procesamiento de las fotografías capturadas por la aeronave. Durante esta etapa, se colocaron los distintos marcadores correspondientes a los puntos de chequeo y de control, lo que permitió generar los tres productos fotogramétricos esperados, en este caso la nube de puntos, el modelo digital de elevación y la ortofoto. En el **Cuadro 19**, se presenta la duración individual de cada vuelo, así como el tiempo total requerido para unir los datos adquiridos de todos los vuelos en el programa fotogramétrico, tomando en consideración que la nube de puntos correspondiente a todo el tramo en estudio se generó a partir de la combinación de los modelos individuales ya procesados, y no desde un procesamiento completamente nuevo, el tiempo total requerido para su generación fue de dieciséis horas, diecinueve minutos y nueve segundos.

Cuadro 19. Tiempo de procesamiento de todo el tramo de vía férrea.

Número de Vuelo	Cantidad de fotografías	Nube de puntos (h:min:s)	MDE (h:min:s)	Ortomosaico (h:min:s)	Total (h:min:s)
1	213	02:01:40	00:06:03	00:09:05	02:16:48
2	214	01:34:34	00:07:12	00:09:21	01:51:07
Tramo Experimental	204	03:01:22	00:05:57	00:09:40	03:16:59
3	213	02:06:38	00:06:54	00:08:25	02:21:57
4	106	00:47:57	00:03:53	00:04:26	00:56:16
5	207	01:33:30	00:05:37	00:08:02	01:47:09
Unión de vuelos	1157	02:00:00	00:29:53	01:19:00	03:48:53
Suma					16:19:09

Con el objetivo de verificar la precisión de los vuelos a lo largo de todo el tramo en estudio, se analizaron los errores tanto lineales como altimétricos en los puntos de chequeo distribuidos a lo largo de los 2 kilómetros de vía en términos de consistencia y precisión relativa de los datos. En el **Cuadro 20** se presentan estas diferencias por cada uno de los puntos de chequeo, mientras que en el **Cuadro 21** se muestran las medidas descriptivas correspondientes a la totalidad del trayecto, permitiendo evaluar la congruencia de los datos obtenidos con respecto al tramo experimental.

Cuadro 20. Errores obtenidos en los puntos de chequeo en la totalidad del trayecto de vía férrea.

CHP	Diferencia absoluta		Error lineal	Error altimétrico
	Este (m)	Norte (m)	(m)	(m)
1	0,020	0,013	0,024	0,049
2	0,005	0,003	0,006	0,048
3	0,015	0,004	0,015	0,018
4	0,032	0,001	0,032	0,017
5	0,003	0,004	0,005	0,004
6	0,001	0,002	0,002	0,005
7	0,000	0,003	0,003	0,001
8	0,004	0,005	0,006	0,003
9 (Tramo experimental)	0,010	0,018	0,021	0,014
10 (Tramo experimental)	0,018	0,010	0,020	0,032
11 (Tramo experimental)	0,005	0,003	0,006	0,046
12 (Tramo experimental)	0,003	0,011	0,012	0,027

CHP	Diferencia absoluta		Error lineal (m)	Error altimétrico (m)
	Este (m)	Norte (m)		
13	0,078	0,071	0,105	0,000
14	0,007	0,030	0,031	0,023
15	0,007	0,023	0,024	0,013
16	0,003	0,019	0,020	0,025
17	0,023	0,005	0,024	0,075
18	0,016	0,005	0,017	0,026
19	0,002	0,000	0,002	0,023
20	0,006	0,006	0,008	0,025
21	0,007	0,003	0,007	0,033
22	0,001	0,011	0,011	0,016
23	0,027	0,013	0,030	0,091

Cuadro 21. Medidas descriptivas de los errores altimétricos obtenidos en el trayecto total de vía férrea.

Medidas Descriptivas	Diferencia absoluta		Diferencia	Diferencia
	Este (m)	Norte (m)	Lineal (m)	Altimétrica (m)
Máximo	0,078	0,071	0,105	0,091
Mínimo	0,000	0,000	0,002	0,000
Rango	0,078	0,071	0,104	0,091
Promedio	0,013	0,011	0,019	0,027
Desviación Estándar	0,017	0,015	0,021	0,023

En el caso de las diferencias lineales a lo largo de toda la vía férrea, se evidencia un incremento de hasta tres veces en la desviación estándar, según los valores obtenidos en el tramo experimental presentado en el **Cuadro 16**. Esta variación puede deberse a diversos factores, como la presencia de obstáculos en diferentes secciones de la vía, lo cual puede generar valores atípicos que afectan los resultados. Además, se observa un leve incremento en el promedio, aunque esta variación es de apenas 4 mm. Esto sugiere que, a lo largo de los 2 kilómetros de vía férrea analizados, las precisiones en los puntos de chequeo se mantienen dentro de un rango aceptable para estudios fotogramétricos, según lo menciona Wenhao, (2001).

Por otro lado, en lo referente a los errores altimétricos, se presentó un aumento en la desviación estándar de 1 cm, pasando de 0,013 m en el tramo experimental según se muestra en el **Cuadro 18** a 0,023

m en el análisis de la totalidad del tramo en estudiado, mostrado en el **Cuadro 21**. No obstante, el promedio presentó una reducción de 3 mm, lo que indica que los valores promedio se mantienen en rangos muy similares a los del tramo experimental y dentro de los parámetros aceptados en estudios fotogramétricos.

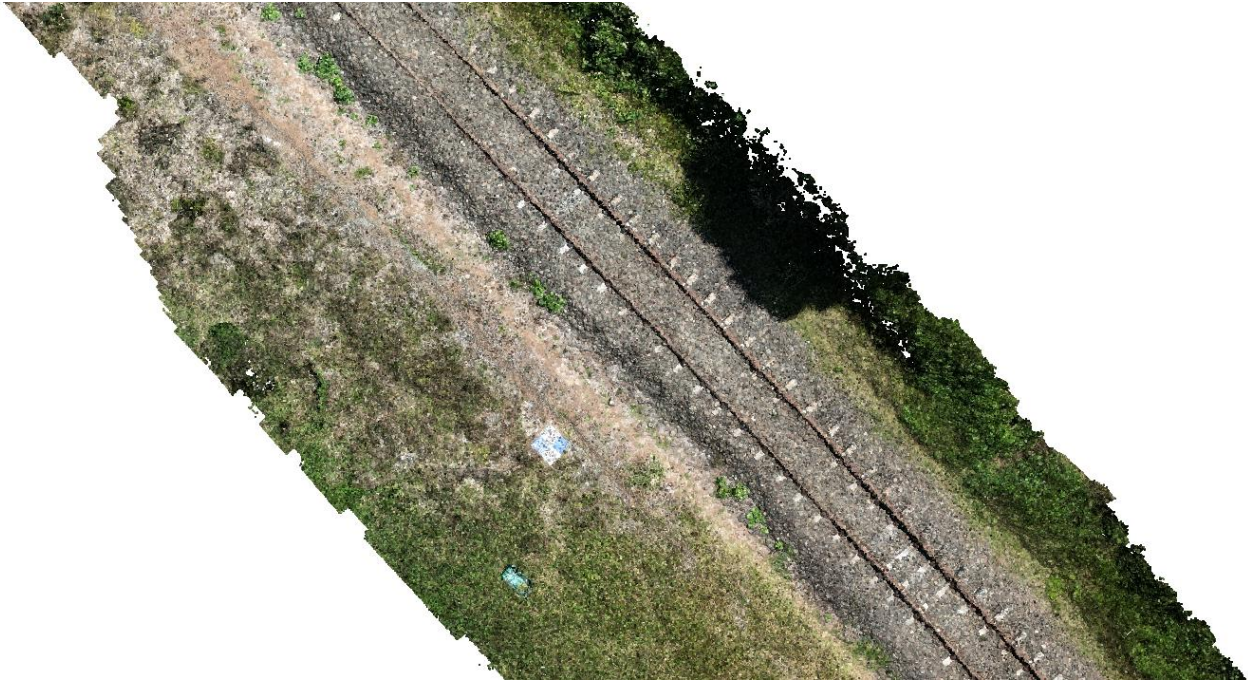
3.3.4 Construcción de productos fotogramétricos

Para este punto, y una vez procesada toda la información recopilada por la totalidad de los vuelos, se obtuvo una nube de puntos compuesta por 651.391.061 puntos. Esta cifra corresponde al resultado después de aplicar un proceso de limpieza, eliminando elementos que no forman parte del objeto de estudio, como edificaciones, estaciones u otras estructuras adyacentes, el detalle de la nube de puntos sin filtrar se muestra en la **Figura 31**. En contraste, la **Figura 32** resalta una sección del área de interés específica para este análisis con la nube de puntos ya filtrada, centrada en la superestructura de la vía férrea. En el **Apéndice 9** se muestran la totalidad de los productos generados para cada uno de los 6 vuelos, incluidos el vuelo del tramo experimental.

Figura 31. Nube de puntos sin filtrar elementos no deseados.

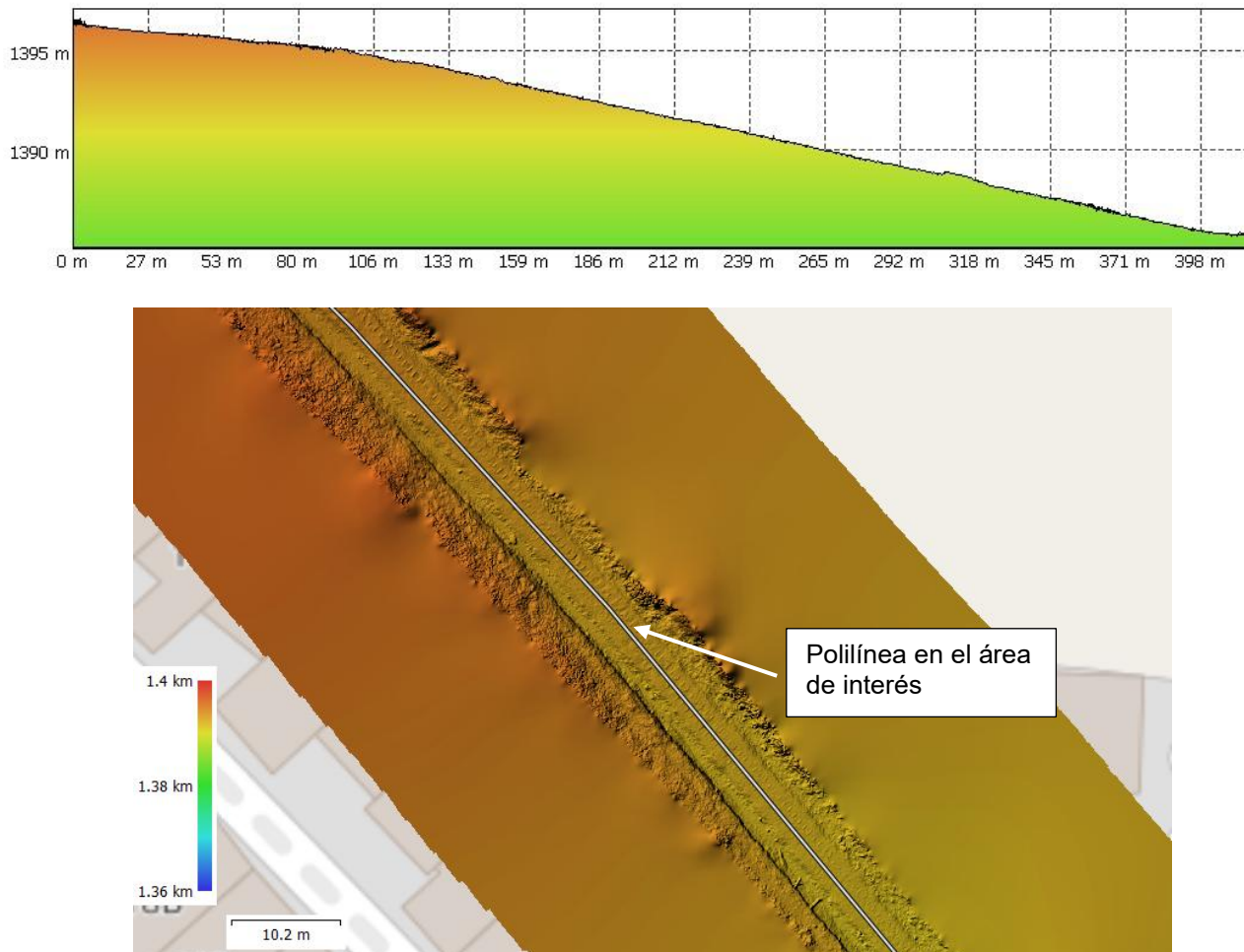


Figura 32. Detalle de la superestructura ferroviaria en la nube de puntos filtrada.



A partir de la nube de puntos procesada, se generó un Modelo Digital de Superficie (DSM) de la vía férrea. La utilidad de este producto depende del filtrado aplicado a la nube de puntos, ya que, si no se realiza este proceso, el software continuará considerando elevaciones correspondientes a elementos externos como techos de estructuras o vegetación, lo cual puede distorsionar los valores reales del terreno y de la superestructura ferroviaria. El DSM puede ser especialmente útil para identificar deformaciones en componentes como el balasto o los rieles, así como para revisiones del alineamiento vertical. A través de la generación de perfiles longitudinales, es posible analizar estas variaciones, como se observa en la **Figura 33**, donde se muestra un perfil obtenido a partir de una polilínea trazada sobre el área de interés en el modelo generado para el tramo experimental.

Figura 33. Perfil del balasto y extracto del DSM en el tramo experimental.



Por último, se obtuvo la ortofoto, uno de los productos más importantes para llevar a cabo la inspección de la superestructura ferroviaria. Esta imagen georreferenciada permite no solo visualizar con claridad los distintos elementos que conforman la vía férrea y, así como evaluar su estado físico, teniendo en cuenta que esto depende directamente de la resolución espacial alcanzada, sino también realizar mediciones con un alto grado de precisión. Tal como se detalló en la sección anterior sobre los errores planialtimétricos, los márgenes de error obtenidos fueron mínimos y se encuentran dentro de los rangos aceptables en fotogrametría con RPAS, lo que otorga una alta confiabilidad a las mediciones derivadas de este producto.

Gracias a estas características, la ortofoto permite comparar cambios a lo largo del tiempo en la vía férrea, localizar con exactitud los elementos que presenten daños o deterioro, realizar revisiones de anchos de vía, alineamiento horizontal, separación de los durmientes, entre otros, y de esta manera planificar

acciones de mantenimiento de manera eficiente. En la **Figura 34** se muestra una sección de la ortofoto generada, la cual presenta un GSD de 0,723 cm/píxel.

Figura 34. Sección de la ortofoto generada en el tramo de estudio.



Es importante destacar que el uso de estos productos puede complementarse con software especializado o programas computacionales capaces de identificar automáticamente elementos como rieles y durmientes. Esta integración permite agilizar significativamente los procesos de inspección de la superestructura ferroviaria, contribuyendo a que las labores de mantenimiento sean más rápidas, precisas y eficientes.

3.4 Definición de protocolo de vuelo

A partir de la planificación de la inspección realizada con RPAS, considerando tanto las especificaciones del equipo utilizado como las características del tramo de ferrovía en estudio, se definieron una serie de parámetros de vuelo destinados a garantizar una adecuada resolución espacial en los productos fotogramétricos, así como a salvaguardar la seguridad de las operaciones en campo.

En el **Cuadro 22** se definen los parámetros de vuelo utilizados en el procedimiento que ayudaron a llevar a cabo de forma más efectiva la inspección de la superestructura ferroviaria con RPAS de bajo costo.

La tabla incluye información como la altura de vuelo, el traslape de las fotografías y la velocidad de vuelo, así como otros valores críticos que se deben considerar al planificar y ejecutar los vuelos. Esto permite optimizar tanto el levantamiento de información en campo como el procesamiento posterior de los datos, y así obtener la mejor calidad de los resultados finales con un RPAS de bajo costo.

Cuadro 22. Definición del protocolo de vuelo para la inspección con RPAS.

Parámetro	Valor		Justificación / Observaciones
	Recomendado	Unidad	
Altura de vuelo sobre la vía férrea	25	Metros	Elegida entre la resolución obtenida y parámetros de precisión.
Velocidad de vuelo del RPAS	2 (7,2)	m/s (km/h)	Se obtienen imágenes de alta calidad, evitando distorsiones.
Traslape Frontal	85	%	Asegura una correcta superposición en la dirección del vuelo.
Traslape Lateral	75	%	Asegura una correcta superposición entre las líneas de vuelo.
Resolución GSD (Tamaño de píxel)	0.723	cm/pix	Obtenido en base a los parámetros utilizados, depende del tipo de cámara y alturas de vuelo. Importante para poder visualizar los elementos mas pequeños de la superestructura ferroviaria.
Equipo utilizado / Tipo de Cámara	DJI AIR 2S	-	Sensor de 1" CMOS de 20 MP de alta resolución (como mínimo según Amami et al., (2022)).
Orientación de la cámara	Nadir (90°)	Grados	Perpendicular al terreno para minimizar distorsiones y garantizar una buena superposición de las fotos.

Parámetro	Valor Recomendado / Usado	Unidad	Justificación / Observaciones
Tiempo estimado de vuelo	25	Minutos	Autonomía total del RPAS, puede verse limitado a condiciones ambientales (no hace alusión al tiempo de vuelo de cada tramo de vía férrea)
Número de pasadas	2	Líneas	Depende del ancho de vía (en lugares más amplios como patios de maniobras se pueden llegar a requerir más pasadas)
Modo de vuelo	Planificado (automático)	-	Mayor precisión en los vuelos y mejor calidad en la toma de fotografías.
Cobertura del tramo	400-500	Metros	Permite un manejo más seguro y un control de la duración de la batería (tiempos estimados de entre 7 a 10 minutos por tramo).
Condiciones climáticas ideales	Viento < 20 km/h y sin lluvia	-	Una alta velocidad del viento puede afectar la estabilidad del RPAS (no utilizar en condiciones de lluvia ya que puede dañar el equipo)

El uso una altura de 25 metros se fundamenta en la necesidad de alcanzar un equilibrio entre la resolución de las imágenes capturadas y la precisión obtenida en los puntos de chequeo. Esta altitud ha demostrado dar buenos resultados en el tramo de vía férrea con el equipo utilizado, así como en estudios, ayudando a generar productos cartográficos de alta calidad y con buena definición. Sin embargo, operar a este nivel puede implicar ciertos riesgos operativos, especialmente en entornos con obstáculos verticales como árboles de gran altura, postes o infraestructuras adyacentes a la vía férrea, los cuales podrían comprometer la seguridad del vuelo.

En función de lo anterior, se propone en caso de ser necesario una altura de vuelo de 30 metros, siempre que se mantengan constantes los demás parámetros establecidos en el **Cuadro 22**. Esta modificación permite una mayor seguridad operativa evitando posibles obstáculos presentes en el entorno. Aunque esta variación puede conllevar una ligera pérdida en la calidad de las imágenes fotográficas, los resultados muestran que las precisiones siguen siendo altamente aceptables, lo cual garantiza la utilidad de los productos generados para tareas de inspección detallada de la superestructura ferroviaria.

3.4 Viabilidad técnica y económica.

La evolución tecnológica ha permitido optimizar diversos procesos mediante la incorporación de nuevas herramientas que los hacen más eficientes y versátiles. Uno de los campos donde estos avances han cobrado relevancia es en la inspección y el mantenimiento de infraestructura ferroviaria, es con el uso de los RPAS, ya que es una alternativa innovadora para apoyar estos procesos, especialmente en redes con limitaciones operativas o sin protocolos de inspección establecidos.

Con las nuevas tecnologías es importante evaluar de forma estructurada la viabilidad de implementar un sistema de inspección basado en RPAS de bajo costo como complemento a las prácticas actuales del INCOFER, el cual carece de procedimientos formales y documentación técnica o económica sobre la inspección de la superestructura ferroviaria.

Para evaluar la parte técnica del uso de los RPAS para la inspección de la superestructura ferroviaria se crearon una serie de criterios para verificar si el método es aplicable a la hora de realizar una inspección ferroviaria de calidad, ya sea como un método más establecido o incluso como un complemento a los procesos actuales, estos criterios se describen de mejor manera a continuación:

- Resolución de las imágenes: La capacidad del RPAS utilizado permite visualizar detalles en la superestructura ferroviaria, Entre más alta la resolución, mejores pueden ser los procesos de inspección ya que se puede detallar con más calma cada tramo de vía a analizar, mientras que con inspección visual tradicional depende exclusivamente de la percepción humana o cámaras montadas en vehículos de inspección.
- Autonomía de vuelo y cobertura por misión: La autonomía depende de la capacidad y el tipo de RPAS utilizado, sin embargo, en uno de bajo costo puede rondar los 25 a 30 minutos, dependiendo de las condiciones climáticas, con este tiempo disponible es posible realizar hasta dos misiones que abarquen 500 metros cada una, por lo tanto, cada batería puede abarcar aproximadamente un kilómetro de vía férrea que posteriormente estará sujeto a las inspecciones en oficina.

- **Altura de vuelo y seguridad operativa:** Una altura correcta de vuelo puede generar productos fotogramétricos de alta calidad para realizar la inspección, en este caso se recomienda los 25 metros como una altura que ofrece equilibrio entre resolución y precisión, con la opción de aumentar a 30 metros en caso de obstáculos, sin perjudicar la precisión, pero perdiendo alrededor de un 10% en resolución.
- **Precisión de la georreferenciación:** Aunque los RPAS de bajo costo como el utilizado en la elaboración del protocolo no disponen de sistemas RTK, esto se puede solventar por medio de la colocación de puntos de control y de chequeo a lo largo de los tramos a inspeccionar, esto aumenta la precisión de los productos generados, ayudando de esta manera al monitoreo y dar de manera precisa el lugar de los hallazgos vistos en los productos fotogramétricos.
- **Capacidad de detección de fallos visibles:** Por medio de los RPAS fue posible obtener imágenes de alta definición con la que se produjeron productos que pueden ser de utilidad para las inspecciones de la superestructura de la vía férrea, si bien es cierto con estos productos es posible observar problemas de manera visual, se puede complementar con algoritmos de detección automática, esto haría que los procesos sean aún más ágiles.
- **Interferencia con el tráfico ferroviario:** Este es uno de los aspectos más relevantes, ya que la realización de los vuelos no interfiere con el tráfico ferroviario. Aunque en el contexto nacional actual esto no representa una gran dificultad, debido a que el tren no opera en horarios de baja demanda, sin embargo, a futuro se espera que el servicio funcione durante todo el día, el uso de RPAS se presenta como una alternativa viable. Esto se debe a que no es necesario detener el paso del tren, además las alturas de vuelo no interfieren con el paso de los equipos ferrocarrileros.
- **Tiempo necesario para cubrir un tramo:** Con el equipo utilizado se puede cubrir alrededor de 1 kilómetro en aproximadamente 15 minutos, capturando las fotografías necesarias con los parámetros ya establecidos en el protocolo, esto supera por mucho hacer una caminata por medio de inspección visual, sin embargo, métodos como los vagones de auscultación pueden ser igual de ágiles, pero estos dependen de una gran cantidad de recursos para poderlos hacer trabajar.
- **Riesgo para el personal:** Esta es una característica muy importante, ya que la operación de la aeronave se realiza de manera remota, es decir, no requiere que el personal encargado de las inspecciones tenga que ingresar a las vías férreas, de esta manera se evita posibles riesgos o exposición a condiciones que pueden ser peligrosas.

- Requerimientos logísticos: Este es otro factor muy importante, a la hora de realizar las misiones con un equipo de tamaño contenido, no es necesario una gran logística para realizar los vuelos, si es recomendable tener más de una batería, sin embargo, en una pequeña mochila se puede transportar lo necesario lo necesario con una cuadrilla de personal reducida.
- Tiempo de procesamiento de datos: Este factor es el que mayor impacto puede tener en cuestiones de tiempo, ya que para procesar la información obtenida por el RPAS puede llevar un tiempo considerable, por ejemplo, para los parámetros de vuelo dictados en el protocolo técnico se tuvieron duraciones de procesamiento de casi 1 hora hasta aproximadamente las 3 horas y 45 minutos, esto depende mucho del tramo y de la cantidad de fotografías, sin embargo el promedio de duración de procesamiento ronda las 2 horas y 20 minutos por tramos de aproximadamente 500 metros, aun así, la información procesada puede ser utilizada en muchas ocasiones para revisar de manera más exhaustiva.

Estos criterios o factores más adelante se muestran en formato de cuadro para ilustrarlo de manera más clara, ha estos factores que afectan a la viabilidad técnica del uso de los RPAS en la inspección de la superestructura ferroviaria se les asigno un criterio de calificación de alta, media o baja, esto en función del grado de desempeño, seguridad, eficiencia y trazabilidad de los procesos de inspección, a continuación, se detallan de manera más justificada estos criterios de calificación.

- Alta: En este caso se asigna cuando el RPAS presenta una ventaja técnica significativa respecto a los métodos tradicionales, tomando en cuantos elementos como la precisión, eficiencia operativa, calidad de los productos generados o incluso la reducción de riesgos del personal.
- Media: Este se otorga cuando el RPAS ofrece un desempeño muy similar a los métodos tradicionales, tomando en consideración aspectos que limiten la operación, tales como mayor tiempo de procesamiento o la presencia de factores ambientales.
- Baja: Se utiliza en el momento en que el RPAS no aporte mejoras significativas o incluso hay desventajas frente a los métodos tradicionales en ese criterio en específico, aplicándose en caso de que el uso del RPAS sea muy limitado.

Con los criterios de viabilidad técnica previamente definidos y los parámetros de evaluación técnica claramente establecidos, se presenta el **Cuadro 23**, el cual muestra estos factores de manera más detallada. Esto permite sustentar de forma más sólida la justificación del uso de RPAS en la inspección de la superestructura ferroviaria.

Cuadro 23. Viabilidad técnica del uso de RPAS en la inspección de la superestructura ferroviaria.

Criterio	Equipo Utilizado (RPAS DJI Air 2S)	Método tradicional	Evaluación técnica	Justificación técnica
1. Resolución de imágenes	GSD = 0,723 cm/píxel brindando imágenes nítidas y georreferenciadas	Limitada a percepción humana o cámaras de trenes especializados	Alta	El RPAS utilizado permite capturar imágenes con una buena resolución, permitiendo detectar los elementos principales de la vía férrea. En métodos tradicionales, esto depende de la percepción humana o equipos costosos montados en trenes.
2. Autonomía y cobertura por vuelo	25–30 min por batería, cobertura de aproximadamente 1 kilometro	Caminata 1–2 km/h; tren con mayor alcance, pero logística compleja	Alta	El dron cubre aproximadamente 1 kilómetros por batería en unos 25-30 minutos. En comparación, caminar la vía es lento y extenuante y puede ser un riesgo para el personal, por otro lado, el tren requiere programación y logística compleja.
3. Altura de vuelo y seguridad operativa	25 metros para brindar un equilibrio entre precisión y calidad de las fotografías. Opción de aumentar a 30 metros en caso de obstáculos	Exposición directa del personal a la vía	Alta	Volar a 25 metros, o en caso de necesidad a 30 metros evita obstáculos y mejora la seguridad, brindando productos de calidad. La inspección caminada o sobre la vía implica riesgos físicos y exposición a condiciones adversas.
4. Precisión de georreferenciación	±10 cm sin RTK en equipo utilizado, mejorado con puntos de control	No georreferenciada	Media	Con puntos de control, el dron logra una precisión aceptable en términos fotogramétricos, suficiente para inspección. Métodos tradicionales no siempre ofrecen georreferenciación.

Criterio	Equipo Utilizado (RPAS DJI Air 2S)	Método tradicional	Evaluación técnica	Justificación técnica
5. Capacidad de detección de fallos visibles	Alta, sin embargo, elementos o fallos pequeños de la vía férrea no se llegan a ilustrar de buena manera	Alta pero sujeta a fatiga visual y experiencia	Media	El dron permite revisar imágenes en detalle y aplicar detección automatizada, perdiendo un poco la calidad en elementos de tamaño reducido. La inspección visual depende del ojo humano, afectado por fatiga o condiciones del entorno.
6. Interferencia con el tráfico ferroviario	Nula, operación aérea segura	Requiere interrupciones o coordinación compleja	Alta	El RPAS no interfiere con operaciones ferroviarias. Métodos tradicionales pueden requerir interrupciones o coordinación especial, afectando la continuidad operativa.
7. Tiempo por tramo estándar	7–10 min por cada 500 metros aproximadamente	1–1.5 horas caminando; 5–10 min tren + logística	Alta	El dron recorre 500 metros en 7-10 minutos. A pie, el mismo tramo puede rondar una hora dependiendo del nivel de detalle con se realice la inspección, por otro lado, un tren de inspección requiere menos tiempo, pero más coordinación previa.
8. Riesgo para el personal	Mínimo, operación remota	Alto, exposición física directa	Alta	El operador permanece en una zona segura sin necesidad de caminar sobre la vía. La inspección visual implica riesgos por exposición directa a la infraestructura.

Criterio	Equipo Utilizado (RPAS DJI Air 2S)	Método tradicional	Evaluación técnica	Justificación técnica
9. Requerimientos logísticos	Mochila con dron y tablet, bajo requerimiento	Vehículos especiales, cuadrillas, cierres de vía férrea	Alta	El equipo RPAS cabe en una mochila y puede operarse con una sola persona y asistente. Métodos tradicionales requieren cuadrillas, vehículos y posibles cierres de vía férrea.
10. Tiempo de procesamiento de datos	En el software Agisoft, con 2 horas y 20 minutos en promedio por bloque (210 fotos aproximadamente) ; productos detallados y georreferenciados	Sin procesamiento digital; observación directa o con sensores; menor trazabilidad y repetibilidad	Alta	El uso de Agisoft Metashape permitió generar ortomosaicos precisos a partir de las fotografías de cada tramo, en un rango de tiempo en promedio de 2 horas y 20 minutos. Aunque el RPAS requiere tiempo de procesamiento posterior, la calidad de los productos obtenidos permite análisis visuales precisos, georreferenciados y repetibles. A diferencia de esto, los métodos tradicionales dependen de la observación en campo, con menor capacidad de auditoría, trazabilidad o repetición sistemática.

En cuanto a la viabilidad económica del uso de los RPAS para la inspección de la superestructura ferroviaria y tomando en consideración el contexto actual del INCOFER, donde no existen procesos formales ni documentación técnica ni económica sobre inspecciones a la superestructura ferroviaria que realizan, la incorporación de los RPAS como herramienta de inspección representa una alternativa económicamente viable, accesible y estratégica. Esta tecnología ofrece una vía para sistematizar las labores de monitoreo sin la necesidad de una infraestructura robusta ni protocolos complejos.

El dron utilizado en este estudio, un DJI Air 2S, es considerado de bajo costo, pero con características de uso profesional. El precio de un modelo similar a este puede rondar los \$1,000 y \$1,300 USD, permitiendo

su adquisición incluso en contextos institucionales con presupuestos limitados. A diferencia de métodos tradicionales, el RPAS puede ser operado por una sola persona, lo que puede llegar a reducir significativamente los costos de recurso humano, transporte, viáticos y logística asociada.

Por otra parte, la generación de productos fotogramétricos requiere de software especializado como Agisoft Metashape, cuya licencia estándar ronda los \$170 USD en una versión estándar, sin embargo, hay versiones más costosas las cuales se podrían tramitar entre varias instituciones para de esta manera reducir costos y que cada una de ellas puedan realizar sus diferentes trabajos. Esta inversión se ve rápidamente compensada por la calidad y utilidad de los productos obtenidos, que permiten análisis detallados, georreferenciados y trazables a través del tiempo, fundamentales para la toma de decisiones en mantenimiento preventivo y planificación de intervenciones.

Además, diversos autores como Cuypers et al. (2023), Wu et al. (2018) y Gómez (2021) respaldan esta perspectiva, señalando que el uso de drones en tareas de inspección no solo mejora la eficiencia operativa y la seguridad del personal, sino que también conlleva una reducción significativa de los costos operativos, especialmente en comparación con métodos tradicionales que requieren trenes de auscultación o inspección caminada con múltiple personal en campo y con un movimiento muy grande de equipos necesarios. Aunque los estudios no se proporcionan cifras concretas, coinciden en que la inversión inicial en drones se amortiza rápidamente gracias al ahorro acumulado en tiempo, personal y transporte.

Asimismo, el uso de drones elimina la necesidad de interrumpir el tráfico ferroviario, lo cual tiene un valor económico indirecto pero muy importante al evitar afectaciones en el servicio y pérdida de ingresos para la institución, esto en caso de que el INCOFER futuro opere en todo momento y no solo en las mañanas y tardes. Esta característica operativa representa una ventaja económica clave frente a métodos que requieren cierre parcial o total de las vías para poder ser inspeccionadas.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- La revisión bibliográfica permitió identificar las diferentes técnicas de inspección utilizando RPAS o UAV, donde se destaca el uso de las ortofotos, modelos digitales de superficies y algoritmos que ayudan a la detección automática de defectos en diferentes secciones de la superestructura ferroviaria, permitiendo adoptar prácticas para poder aplicarlas al contexto nacional, considerando diferentes aspectos como la topografía de la región, el tipo de estructura ferroviaria y posibles obstáculos presentes en el trayecto en estudio.
- Tras la comparación de las diferentes técnicas utilizando RPAS para la inspección de la superestructura ferroviaria, se pudo determinar que el uso de la fotogrametría, combinado con georreferenciación indirecta por medio de puntos de control con procesamientos en softwares especializados presenta una alternativa viable y eficiente para el INCOFER al no poseer técnicas estandarizadas de inspección. Esta técnica permite la generación de productos fotogramétricos de alta calidad con GSD de aproximadamente 0.723 cm/pix permitiendo detectar las secciones de mayor importancia en la superestructura del ferrocarril.
- A pesar de que la institución no cuente con procesos de inspección formales, ciertos aspectos de la bibliografía consultada pudieron ser utilizados en el contexto de la infraestructura nacional, tomando como base las alturas de vuelo de entre 25 a 35 metros, así como las velocidades de vuelo para obtener fotografías claras y sin distorsiones, así como el uso de puntos de control y de chequeo para mejorar la precisión de los productos obtenidos.
- Se desarrolló un procedimiento en un tramo experimental que permitió identificar que combinación óptima de parámetros de vuelo brinda mejor precisión para la obtención de la información de la superestructura ferroviaria, tomando como base los productos fotogramétricos. Por medio de la revisión de los errores lineales y altimétricos en los puntos de chequeo y con las diferentes combinaciones de parámetros de vuelo se ha identificado que el que brinda los mejores resultados, haciendo un equilibrio entre precisiones y resolución es el vuelo número 3, en donde se tiene una misión de vuelo a una altitud de 25 metros, con una velocidad de 2 m/s y traslapes frontal y lateral de 85% y 75% respectivamente.

- Con los parámetros de vuelo establecidos en el tramo experimental, se procedió a aplicarlo en la totalidad de la vía férrea, donde se pudo evidenciar que la cantidad de fotografías no influye directamente en la calidad o en las precisiones de los datos, sin embargo se ve afectado en los tiempos de procesamiento, donde se puede llegar a tener tiempos en promedio de 2 horas con 20 minutos, sin embargo, los procesamientos son procesos que no involucran gran intervención de los humanos, por tal motivo se podría dejar realizando en horas de descanso sin afectar las horas de trabajo.
- Con el estudio de los datos obtenidos, se pudo constatar que es viable poder realizar misiones a alturas de 30 metros para poder evadir posibles obstáculos, sin perjudicar la precisión de la información, sin embargo, se llega a perder cierta calidad de la resolución espacial de los productos fotogramétricos, pasado de un GSD de 0.723 cm/pix a 25 de altura a un GSD de 0.801 cm/pix a 30 metros.
- Aunque a las horas que se realizaban los vuelos con RPAS no se tenía presencia de material rodante sobre las vías férreas, este método presenta la gran ventaja de que no interfiere con el tráfico del ferrocarril, por lo tanto, no es necesario cerrar los tramos de vía férrea cuando se requieren hacer vuelos para su posterior inspección.
- En el protocolo de vuelo planteado se incluyen los parámetros básicos de vuelo como altura de vuelo, traslapes de las fotografías y velocidad del RPAS, pero además se incluyen el modelo de equipo utilizado, tiempos estimados de vuelo, así como autonomía de vuelo, el número de pasadas, que para este caso es de 2 pasadas por tramo, entre otros que son importantes a tomar en consideración.
- La inspección mediante RPAS demostró ser técnicamente viable, destacando su capacidad para capturar imágenes georreferenciadas que permiten una revisión preliminar de los elementos de la superestructura ferroviaria. Aunque no es parte del alcance de este trabajo realizar un análisis exhaustivo para detectar fallas puntuales, en las ortofotos fue posible identificar detalles como fijaciones faltantes, vegetación invasiva en la zona del balasto o separaciones irregulares de durmientes. Esto respalda el uso de RPAS como una herramienta complementaria juntos a otros métodos en las etapas iniciales del proceso de inspección de la superestructura ferroviaria, reduciendo la necesidad de desplazamientos constantes del personal al sitio.
- El protocolo usando RPAS representa una alternativa eficiente en términos operativos, ya que la cobertura de aproximadamente 1 km por batería en un tiempo estimado de 25–30 minutos, sumado a la mínima interferencia con el tráfico ferroviario, posiciona esta técnica como una solución segura,

rápida y de bajo riesgo para el personal técnico, en contraste con los métodos caminados o con trenes que requieren mayor logística y coordinación.

- El protocolo propuesto constituye una herramienta eficaz para detectar deformaciones generales, evaluar la linealidad de la vía férrea e identificar elementos faltantes en la superestructura, por lo tanto, es un buen complemento para reforzar las inspecciones directas u otros métodos especializados cuando se requiere un análisis detallado. Sin embargo, los productos generados permiten ubicar con precisión la posición del posible defecto, lo que facilita intervenir de manera focalizada y optimizar las labores de mantenimiento.
- Los tiempos de procesamiento fotogramétrico y la trazabilidad de los productos generados con RPAS aportan un valor técnico adicional significativo. El software Agisoft permitió obtener ortomosaicos de alta precisión con un tiempo de procesamiento promedio de 2 h 20 min por bloque, generando productos que pueden ser revisados la cantidad de veces que sea necesario. Esto representa una mejora sustancial frente a los métodos tradicionales, donde la información no es georreferenciada ni sistemáticamente documentada para posteriores análisis comparativos.
- La adquisición y operación de RPAS de bajo costo similar al DJI Air 2S se presenta como una solución económicamente factible para el contexto institucional del INCOFER, dado que su precio de entre \$1,000 y \$1,300 USD es accesible y su operación puede ser realizada por un par de personas. Esto reduce sustancialmente los costos asociados a personal, viáticos y transporte en comparación con los métodos tradicionales de inspección que demandan cuadrillas completas y equipos pesados.
- El respaldo de diversos autores reafirma la viabilidad del uso de RPAS en tareas de inspección ferroviaria, coincidiendo en que esta tecnología no solo mejora la eficiencia operativa y reduce riesgos al personal, sino que también representa una alternativa económicamente sostenible frente a métodos tradicionales. Aunque no se cuantifica el ahorro, sí destacan que la inversión en drones se amortiza rápidamente gracias a la reducción acumulada de costos en logística, personal y tiempos de inspección, lo que fortalece la validez de su implementación en contextos institucionales como el del INCOFER.

Recomendaciones

- Una de las desventajas de la fotogrametría es que se captura información que no es necesaria, esto hace que haya una etapa de limpieza de las nubes de puntos para poder contar con productos de mejor calidad, por lo tanto, sería de suma importancia que la institución llegue a aplicar de diferentes

herramientas computacionales que ayuden a depurar las nubes de puntos tales como machine learning, inteligencia artificial, entre otros, tal como ya se aplica según la bibliografía consultada.

- Si bien el RPAS utilizado permitió identificar diversos elementos de la superestructura, la resolución obtenida limita la observación detallada de componentes muy pequeños o con desgastes más centralizados. Por lo tanto, se recomienda que el departamento de inspecciones del INCOFER llegue a emplear equipos con cámaras de mayor resolución y capacidad de acercamiento, a fin de mejorar la precisión en la identificación de posibles anomalías y de esta manera dar un mejor uso de la metodología y equipos.
- Se recomienda al INCOFER capacitar a su personal en metodologías de inspección de la superestructura ferroviaria, con el fin de contar con un sistema de ferrocarril seguro y eficiente para los usuarios, así como para los trabajadores que transitan por ellas.
- El uso de mejores tecnologías podría ser de gran ayuda para los procesos de inspección del INCOFER, si bien es cierto el costo sería mayor, contar con equipos como los que utilizan tecnología LIDAR pueden ser una gran opción en el caso de realizar inspecciones en las vías férreas.
- Se recomienda al departamento de topografía del INCOFER la colocación de puntos de control para que los productos fotogramétricos sean de mayor calidad en términos de precisión, de esta manera se puede contar con productos que a través del tiempo pueden dar mucha información del comportamiento de la vía férrea.
- Se le recomienda al INCOFER adoptar el uso de drones de bajo costo como herramienta de inspección complementaria o principal, considerando su eficiencia técnica, baja interferencia con las operaciones ferroviarias y capacidad de reducir significativamente los riesgos para el personal en campo. Además, este sistema puede optimizar las labores de control de limpieza, detección de obstrucciones y verificación del estado de drenajes, contribuyendo a un mantenimiento preventivo más eficiente y a la prolongación de la vida útil de la superestructura.
- Se le recomienda al departamento de mantenimiento mantener el protocolo lo más estandarizado posible para evitar que los resultados presenten variaciones muy grandes que pueden afectar la calidad de los productos obtenidos.
- Se recomienda al INCOFER tener el derecho de vía lo más limpio posible de obstáculos, sobre todo de gran altura, que puedan interferir con los vuelos de los RPAS, para evitar la necesidad de volar a alturas mayores que perjudiquen la calidad de los productos en términos de resolución.

- Se recomienda que el INCOFER archive los productos generados por los RPAS, con el objetivo de crear una base de datos georreferenciada de ortofotos, modelos en tercera dimensión, entre otros, que sirva como histórico técnico para la toma de decisiones futuras y para análisis comparativos a lo largo del tiempo.
- Es recomendable que la institución promueva una cultura de innovación tecnológica en inspecciones, reforzando internamente la importancia de adoptar tecnologías ágiles, económicas y seguras, como los RPAS, especialmente en instituciones con recursos limitados o sin protocolos establecidos como el INCOFER.
- Debido al cierre de la institución en los años 90 y la ausencia de planos de las vías férreas, se le recomienda al INCOFER utilizar esta tecnología para poder realizar nuevos planos de las distintas líneas de vía férrea que ayuden a tener actualizados estos tramos con información reciente.

Referencias

- Abdelmalik, B., Abdelhak, A., Anouaressadate, A., Tarik, B., Bachir, A., & Amor, G. (2024). Detection of crack in railhead by using eddy current array probe. *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*, 5(3), e12927-e12927. <https://doi.org/10.54021/seesv5n3-129>
- Agisoft. (2024). *Agisoft Metashape: Agisoft Metashape*. <https://www.agisoft.com/>
- Amami, M. M., El-Turki, A. M., Rustum, A. I., El-Amaari, I. M., & Jabir, T. A. (2022). Topographic Surveying using Low-Cost Amateur Drones & 4K Ultra-High-Definition Videos. *Open Access Research Journal of Science and Technology*, 4(2), 072-082. <https://doi.org/10.53022/oarjst.2022.4.2.0040>
- Aquino Jave, M. U. (s.f). *Riel y Sus Tipos | PDF | Transporte ferroviario | Tren*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/234391900/Riel-y-Sus-Tipos>
- Arain, A., Mehran, S., Shaikh, M. Z., Kumar, D., Chowdhry, B. S., & Hussain, T. (2024). Railway track surface faults dataset. *Data in Brief*, 52, 110050. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110050>
- ARESEP. (2022, septiembre 21). *Incofer debe mejorar planes de mantenimiento*. <https://aresep.go.cr/noticias/incofer-debe-mejorar-planes-mantenimiento/>
- Arriola Valverde, S., Ferencz Appel, A., & Renato-Rimolo-Donadio, R. (2018). Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados. *Investiga.TEC*, 31, Article 31.
- Autodesk. (2025). *Autodesk Civil 3D 2025 | Obtener precios y comprar el software Civil 3D*. <https://www.autodesk.com/mx/products/civil-3d/overview>
- Çeçen, F., & Aktaş, B. (2022). Progressive failure analysis of partially pre-stressed concrete railway sleepers. *Journal of Innovative Transportation*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.53635/jit.1112773>
- CHCNAV. (2024a). *I89 Compact eficiente pocket-sized visual IMU-RTK*. https://geospatial.chcnav.com/dam/jcr:78a61a59-6db4-44e0-9d65-c6d5f24fcd/fd/i89_DS_EN.pdf

CHCNAV. (2024b). *iBase GNSS Receiver*. https://geospatial.chcnav.com/dam/jcr:d04e24b5-46b3-4770-bc1c-50a35c330eef/iBase_DS_EN.pdf

CHCNAV Geoespacial. (2024). *CGO2: Software avanzado de posprocesamiento GNSS | CHCNAV*. <https://geospatial.chcnav.com/es/products/chcnav-CGO>

Comunicación INCOFER. (2025, julio 8). 1,7 millones de personas transportadas en tren durante el primer semestre de 2025. *INCOFER*. <https://www.incofer.go.cr/17-millones-de-personas-transportadas-en-tren-durante-el-primer-semester-de-2025/>

Cordero-Quirós, J. A. (2018). *Diseño de un sistema de cuantificación automática de biomasa basado en procesamiento de imágenes y fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/10429>

Cuypers, S., De Winter, H., Bassier, M., & Vergauwen, M. (2023). PLANIMETRIC RAIL POSITIONING USING UAV PHOTOGRAMMETRY: TOWARDS AUTOMATED AND SAFE RAILWAY INFRASTRUCTURE MONITORING. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-1-W2-2023*, 589-596. ISPRS Geospatial Week 2023 - 2–7 September 2023, Cairo, Egypt. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-589-2023>

Dahal, B., & Mishra, D. (2020). Discrete Element Modeling of Permanent Deformation Accumulation in Railroad Ballast Considering Particle Breakage. *Frontiers in Built Environment*, 5. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00145>

Dearden, R., Tye, A., & Marchant, A. (2014, marzo 19). *User guide for the Corroded Asset Failure: Ferrous map* [Publication - Report]. British Geological Survey. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/506391/>

DJI. (s. f.-a). *Support for DJI Air 2S*. DJI. Recuperado 28 de febrero de 2025, de <https://www.dji.com/global/support/product/photo>

DJI. (s. f.-b). *Support for Phantom 4 Pro*. DJI. Recuperado 28 de febrero de 2025, de <https://www.dji.com/global/support/product/photo>

Dronelink. (2024). *Dronelink | Product*. Dronelink. <https://www.dronelink.com/product>

- Emlid. (s. f.). *RTK GNSS module for UAV mapping*. Emlid. Recuperado 28 de febrero de 2025, de <https://emlid.com/reach/>
- Freitas Machado, M. (2023). IMPORTÂNCIA DO SISTEMA FERROVIÁRIO PARA O DESENVOLVIMENTO DO BRASIL. *Revista Científica Semana Acadêmica*, 11(232), 1-16. <https://doi.org/10.35265/2236-6717-232-12486>
- Gantry Rail. (s. f.). *Sistemas de sujeción, mordazas y calzos* | www.gantryrail.com. Recuperado 15 de marzo de 2025, de <https://gantryrail.com/es/suministros-de-materiales/sistemas-de-sujecion-mordazas-y-calzos/>
- Geomax. (2023). *Manual Total Station WinCE Series Zoom40 Series*. https://geomax-positioning.com/-/media/files/geomax/downloads/products/total%20stations/zoom40%20series/updated%20sheets/zoom40/geomaxzoom40ds8675121121enlr.ashx?sc_lang=en&hash=A192F2603E651C3BF9D1881A4894A147
- Ghassoun, Y., Gerke, M., Khedar, Y., Backhaus, J., Bobbe, M., Meissner, H., Tiwary, P. K., & Heyen, R. (2021). Implementation and Validation of a High Accuracy UAV-Photogrammetry Based Rail Track Inspection System. *Remote Sensing*, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/rs13030384>
- Gill, A., & Smoczyński, P. (2021). Optimization of Safety System Structures in Railway Transport. *Sustainability*, 13(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/su131910700>
- Gong, W., Akbar, M. F., Jawad, G. N., Mohamed, M. F. P., & Wahab, M. N. A. (2022). Nondestructive Testing Technologies for Rail Inspection: A Review. *Coatings*, 12(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/coatings12111790>
- Gordillo Salinas, V. M., Ángeles Hernández, J. M., González Sánchez, A., & Ontiveros Capurata, R. (2020). *Uso de tecnología geoespacial en la nivelación de tierras con propósito de diseño y trazo de riego superficial: Metodología*. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2206>
- Gudiño, R. (2019, mayo 6). *Definen diseño de nuevos trenes de Incofer*. <https://www.larepublica.net/noticia/definen-diseno-de-nuevos-trenes-de-incofer>

- Guo, Y., Marikine, V., & Jing, G. (2022). 14—Railway ballast. En R. Calçada & S. Kaewunruen (Eds.), *Rail Infrastructure Resilience* (pp. 295-317). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821042-0.00021-6>
- Guth, P. L., Van Niekerk, A., Grohmann, C. H., Muller, J.-P., Hawker, L., Florinsky, I. V., Gesch, D., Reuter, H. I., Herrera-Cruz, V., Riazanoff, S., López-Vázquez, C., Carabajal, C. C., Albinet, C., & Strobl, P. (2021). Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. *Remote Sensing*, 13(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/rs13183581>
- Gwyn, D. (2022). Railways. En E. C. Casella, M. Nevell, & H. Steyne (Eds.), *The Oxford Handbook of Industrial Archaeology* (p. 0). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199693962.013.26>
- Holcim. (s. f.). *Durmientes de concreto*. Recuperado 15 de marzo de 2025, de <https://www.holcim.cr/durmientes-de-concreto>
- Insa Franco, R., Salvador Zuriaga, P., Martínez Fernández, P., Villalba Sanchis, I., & García Román, C. (2016). *Una introducción al ferrocarril. Volumen I: Elementos constituyentes de la superestructura: Vol. Volumen I* (Primer Edición). Universitat Politècnica de València.
- Isazade, N. (2023). *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL RESEARCH, EDUCATION & TRAINING CENTER*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7934139>
- Kaewunruen, S., Ngamkhanong, C., Sengsri, P., & Ishida, M. (2020). On Hogging Bending Test Specifications of Railway Composite Sleepers and Bearers. *Frontiers in Built Environment*, 6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.592014>
- Kaewunruen, S., Osman, M. H., & Hao Cheng Eric, W. (2019). Risk-Based Maintenance Planning for Rail Fastening Systems. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 5(3), 04019007. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0001012>
- L.B. Foster. (s. f.). *Productos ferroviarios Allegheny*. L.B. Foster. Recuperado 15 de marzo de 2025, de <https://lbfoster.com/es-mx/rail/rail-products/allegheny-rail-products>

- Leica Geosystems. (2016). *Leica Viva GS14 Data Sheet*. https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_viva_gs14_ds.ashx?la=eses&hash=C840E94A3FF586AA980BB12F7D59C026
- Leica Geosystems. (2025). *Leica Geo Office—Un software de oficina integrado*. <https://leica-geosystems.com/es-es/rugbycl/archive-data/software/leica-geo-office>
- Lesiak, P. (2020). Inspection and Maintenance of Railway Infrastructure with the Use of Unmanned Aerial Vehicles. *Problemy Kolejnictwa - Railway Reports*, 64(188), Article 188. <https://doi.org/10.36137/1883E>
- LET. (s. f.). *Rieles Ferroviarios*. Recuperado 15 de marzo de 2025, de <https://let.com.mx/376-2/>
- Li, J., Doh, S. I., & Manogaran, R. (2023). Detection and Maintenance for Railway Track Defects: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1140(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1140/1/012011>
- Lima De Paiva, C. E. (2016). *Super e infraestrutura de ferrovias Critérios para protejo*. Elsevier Editora Ltda.
- Lin, K., Zhou, L., Juul Jensen, D., & Zhang, X. (2023). Dislocation Mechanisms and Local Strength with a View towards Sleeper Screw Failures. *Crystals*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/cryst13040656>
- Lobo Rodríguez, L. A. (2023). *Propuesta de diseño geométrico para la calle Las Parcelas a partir de información base de topografía generada con vehículos aéreos no tripulados de bajo costo*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Mardiana, S., Hamdani, D., Chaniago, M. B., Wahyu, A. P., Heryono, H., & Suhendri, S. (2020). Sistem Informasi Pemeriksaan Jalur Kereta Api Menggunakan Drone dan Teknik Image Processing. *Journal of Information Technology*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.47292/joint.v2i1.18>
- Márquez, F. P. G. (2006). Coste del Ciclo de Vida en Elementos de la Infraestructura Ferroviaria. *X Congreso de Ingeniería de Organización*. <http://adingor.es/congresos/web/articulo/detalle/a/858>

- Masat, M., & Kaya, M. (2019). The Use of Unmanned Aerial Vehicle Equipped with Auto-Pilot System in Railway Security. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.474674>
- Microsoft. (2025). *Software de hojas de cálculo gratuito online: Excel | Microsoft 365*. <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/excel>
- Mohamad Ali Ridho, B. K. A., & Kaewunruen, S. (2021). Failure investigations into interspersed railway tracks exposed to flood and washaway conditions under moving train loads. *Engineering Failure Analysis*, 129, 105726. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105726>
- Monje Álvarez, C. A. (2011). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA Y CUALITATIVA Guía didáctica*. Universidad Surcolombiana.
- Mora-Felix, Z. D., Sanhouse-Garcia, A. J., Bustos-Terrones, Y. A., Loaiza, J. G., Monjardin-Armenta, S. A., & Rangel-Peraza, J. G. (2020). Effect of photogrammetric RPAS flight parameters on plani-altimetric accuracy of DTM. *Open Geosciences*, 12(1), 1017-1035. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0189>
- Moreira, T. B. R., Santos, A. R. D., Brito, A. J. S., Zandonadi, C. U., Bindeli, G. M., Moreira, T. R., Guerra Filho, P. A., & Ferrari, J. L. (2024). *RPAS (Remotely Piloted Aircraft System)—Conceitos e Legislação* (1.ª ed.). CAUFES. <https://doi.org/10.29327/5433585>
- Mukhtiar, N., Khuwaja, K., Tocut, D. P., & Tarca, I. (2023). An Experimental Study on the Railway Track Surface Fault Detection with Automation. *2023 17th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/EMES58375.2023.10171771>
- OACI, I. C. A. O. (2015). *Manual on remotely piloted aircraft systems (RPAS)(Doc 10019 AN/507)*.
- Ojeda, J. M. P., Huatangari, L. Q., Calderon, B. A. C., Tineo, J. L. P., Panca, C. Z. A., & Pino, M. E. M. (2024). Estimation of the Physical Progress of Work Using UAV and BIM in Construction Projects. *Civil Engineering Journal*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-02-02>
- Pizarro, I. (2024). *Productos Topográficos con Vehículos Aéreos no Tripulados*. Tecnológico de Costa Rica. https://tecdigital.tec.ac.cr/dotlrn/classes/CO/CO3301/S-2-2023.CA.CO3301.1/file-storage/view/presentaciones%2FTema_5-Productos_Topogr%C3%A1ficos_con_Veh%C3%ADculos_A%C3%A9reos_no_Tripulados.pdf

- Previtali, M., Barazzetti, L., & Roncoroni, F. (2024). Orthophoto generation with gaussian splatting: Mitigating reflective surface artifacts in imagery from low-cost sensors. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2-W8-2024*, 371-378. ISPRS TC II
8th International ISPRS Workshop LowCost 3D - Sensors, Algorithms, Applications - 12–13 December 2024, Brescia, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-371-2024>
- QGis. (2025). *Spatial without Compromise · QGIS Web Site*. <https://qgis.org/>
- RFFSA, R. F. F. S. A. (1978). *Registro do estado das Linhas. IVR 4. Instruções Gerais*.
- Romanos, P., Lovatto, M., & Rossi, B. D. (2018, septiembre). *Criterios y recomendaciones para selección de software aplicativos para drones*. X Congreso de AgrolInformática (CAI) - JAIIO 47 (CABA, 2018). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/70985>
- Ruide. (s. f.). *Auto Level*. Recuperado 28 de febrero de 2025, de https://www.ruideinstrument.com/en/product_details.html?short_url=RAL2AutoLevel
- S., D., B., D., Reddy, D. V. S., V, M. D., & M., J. (2024). Detection of fault in Railway track using Image processing and Fuzzy logic. *2024 Second International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ICETITE)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ic-ETITE58242.2024.10493504>
- Šestáková, J., Pultznerová, A., & Mečár, M. (2022). The maintenance of the railway superstructure and its influence on the track geometry of regional line. *Acta Technica Jaurinensis*, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00664>
- Tauseef, Md., P, T. M., Sravani, K., R, L., & Sankalp Reddy, T. S. (2024). Secure Skies: Developing a Remotely Piloted Aerial System with Defense Mechanisms. *2024 5th International Conference on Circuits, Control, Communication and Computing (I4C)*, 125-130. <https://doi.org/10.1109/I4C62240.2024.10748448>
- Teppati Losè, L., Chiabrandò, F., & Maschio, P. (2023). DIRECT GEOREFERENCING APPROACHES FOR CLOSE-RANGE AND UAV PHOTOGRAMMETRY IN THE BUILT HERITAGE DOMAIN. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*,

XLVIII-M-2-2023, 1557-1564. 29th CIPA Symposium “Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage. Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future” - 25–30 June 2023, Florence, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1557-2023>

Vázquez, P. (2023). *Juez concede suspensión del traslado de balasto para el Tren Maya- Grupo Milenio*. <https://www.milenio.com/estados/juez-concede-suspension-traslado-balasto-tren-maya>

Wenhao, F. (2001). The specific character of limit errors in close range photogrammetry. *Geo-spatial Information Science*, 4(3), 50-56. <https://doi.org/10.1007/BF02826924>

Wolf, P., & Ghilani, C. (2016). *Topografía* (14 edición). Alfaomega Grupo Editor.

Wu, Y., Qin, Y., Wang, Z., & Jia, L. (2018). A UAV-Based Visual Inspection Method for Rail Surface Defects. *Applied Sciences*, 8(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/app8071028>

Задорожній, Ю. В., Zadorozhniy, Y., Смірнова, І. В., & Smirnova, I. (2024). *Використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу земель сільськогосподарського призначення*. <https://doi.org/10.31521/978-617-7149-78-0-87>

Apéndices

Apéndice 1. Ángulos y Coordenadas del tramo 1.

TRAMO 1											
PI	Lado	Mediciones de ángulos	Mediciones de distancias	Distancia Promedio	Angulo Promedio		Azimut	Proyecciones		COORDENADAS	
					Valor	Sentido		Este	Norte	Este	Norte
BN 2										511346,768	1089863,508
	BN 2 - BN 1						180°0'0"				
BN1										511317,531	1089846,439
	BN 1 - POL 6	81°14'09"	173,669	173,670	81°14'13"	Derecho	320°57'36"	-109,388	134,891		
		81°14'18"	173,67								
		81°14'16"	173,669								
		81°14'10"	173,67								
POL 6										511208,143	1089981,330
	POL 6 - POL 5	16°41'11"	121,961	121,961	16°41'15"	Izquierdo	304°16'21"	-100,785	68,680		
		16°41'14"	121,961								
		16°41'20"	121,961								
		16°41'19"	121,961								
POL 5										511107,358	1090050,009
	POL 5 - POL 4	8°41'3"	297,438	297,437	8°41'13"	Izquierdo	295°35'8"	-268,271	128,451		
		8°41'16"	297,437								
		8°41'16"	297,436								
		8°41'19"	297,437								
POL 4										510839,087	1090178,460
	POL 4 - POL 3	2°17'26"	272,227	272,228	2°17'17"	Derecho	297°52'25"	-240,644	127,273		
		2°17'15"	272,228								
		2°17'15"	272,227								
		2°17'13"	272,228								
POL 3										510598,443	1090305,733
	POL 3 - POL 2	4°32'46"	94,671	94,671	4°32'46"	Izquierdo	293°19'39°	-86,932	37,488		
		4°32'49"	94,671								
		4°32'43"	94,671								
		4°32'46"	94,671								
POL 2										510511,511	1090343,221
	POL 2 - POL 1	6°54'36"	102,39	102,390	6°54'33"	Derecho	300°14'12"	-88,46	51,561		
		6°54'31"	102,39								
		6°54'30"	102,39								
		6°54'35"	102,39								
POL 1										510423,051	1090394,782

Apéndice 2.

Ángulos y coordenados del tramo 2.

TRAMO 2											
PI	Lado	Mediciones de ángulos	Mediciones de distancias	Distancia Promedio	Angulo Promedio		Azimut	Proyecciones		COORDENADAS	
					Valor	Sentido		Este	Norte	Este	Norte
BN 2										511346,768	1089863,508
							180°0'0"				
BN1										511317,531	1089846,439
	BN 1 - POL 7	101°31'14"	228,973	228,723	101°31'20"	Izquierdo	138°12'3"	152,449	-170,510		
		101°31'19'	228,973								
		101°31'24"	228,973								
		101°31'22"	227,973								
POL 7										511469,980	1089675,929
	POL 7 - POL 8	2°15'05"	274,567	274,567	2°15'6"	Derecho	140°27'9"	174,822	-211,718		
		2°15'04"	274,567								
		2°15'09"	274,566								
		2°15'08"	274,566								
POL 8										511644,801	1089464,211
	POL 8 - POL 9	10°31'21"	70,607	70,607	10°31'23"	Izquierdo	129°55'46"	54,144	-45,319		
		10°31'24"	70,607								
		10°31'22"	70,607								
		10°31'24"	70,607								
POL 9										511698,945	1089418,893
	POL 9 - POL 10	10°35'56"	511,884	511,884	10°35'55"	Izquierdo	119°19'51"	446,263	-250,747		
		10°35'58"	511,885								
		10°35'50"	511,884								
		10°35'57"	511,884								
POL 10										512145,209	1089168,146

Apéndice 3.

Datos de la nivelación diferencial para el tramo 1.

Tramo 1					
Estación	(+)	AI	(-)	Cota	Cota Ajustada
BN1	3,725	1392,374		1388,649	1388,649
		1392,374			
PC1	2,587	1394,827	0,133	1392,241	1392,240
		1394,828			
POL6	3,116	1397,003	0,940	1393,888	1393,887
		1397,004			
POL5	2,570	1398,403	1,169	1395,835	1395,833
		1398,405			
PC2	3,213	1400,965	0,651	1397,754	1397,752
		1400,967			
POL4	3,590	1404,026	0,528	1400,439	1400,436
		1404,029			
PC3	3,931	1407,613	0,344	1403,685	1403,682
		1407,616			
PC4	1,989	1409,231	0,370	1407,246	1407,242
		1409,235			
POL3	3,328	1411,237	1,322	1407,913	1407,909
		1411,241			
POL2	2,212	1412,128	1,320	1409,921	1409,916
		1412,133			
POL1	0,928	1412,156	0,900	1411,233	1411,228
		1412,161			
POL2	0,976	1410,893	2,238	1409,923	1409,917
		1410,899			
POL3	1,357	1409,265	2,984	1407,915	1407,908
		1409,272			
PC5	0,308	1407,551	2,022	1407,250	1407,243
		1407,558			
PC6	0,285	1403,967	3,868	1403,690	1403,682
		1403,975			
POL4	0,542	1400,976	3,533	1400,442	1400,434
		1400,984			
PC7	0,522	1398,270	3,227	1397,757	1397,748
		1398,279			

Estación	(+)	AI	(-)	Cota	Cota Ajustada
POL5	1,060	1396,891	2,439	1395,840	1395,831
		1396,900			
POL6	0,720	1394,605	3,005	1393,895	1393,885
		1394,615			
PC8	0,138	1391,420	3,323	1391,292	1391,282
		1391,430			
BN1			2,770	1388,660	1388,649
SUMA	37,097		37,086		
C	12				
ERROR	0,011				
DIF. BN1	0,011				
Verif. Pagina	0,011=0,011				
Factores de Corrección por parada					
Descripción	Parada	F. Corrección			
F. Correc 1	1	0,00055			
F. Correc 2	2	0,00110			
F. Correc 3	3	0,00165			
F. Correc 4	4	0,00220			
F. Correc 5	5	0,00275			
F. Correc 6	6	0,00330			
F. Correc 7	7	0,00385			
F. Correc 8	8	0,00440			
F. Correc 9	9	0,00495			
F. Correc 10	10	0,00550			
F. Correc 11	11	0,00605			
F. Correc 12	12	0,00660			
F. Correc 13	13	0,00715			
F. Correc 14	14	0,00770			
F. Correc 15	15	0,00825			
F. Correc 16	16	0,00880			
F. Correc 17	17	0,00935			
F. Correc 18	18	0,00990			
F. Correc 19	19	0,01045			
F. Correc 20	20	0,01100			

Apéndice 4.

Datos de la nivelación diferencial para el tramo 2.

Tramo 2					
Estación	(+)	AI	(-)	Cota	Cota Ajustada
BN1	0,150	1388,799		1388,649	1388,649
		1388,799			
PC1	1,159	1386,001	3,957	1384,842	1384,842
		1386,001			
POL7	0,969	1384,763	2,206	1383,795	1383,794
		1384,764			
PC2	0,140	1382,065	2,838	1381,926	1381,925
		1382,066			
PC3	0,679	1380,173	2,570	1379,496	1379,494
		1380,175			
POL8	0,795	1377,395	3,573	1376,602	1376,600
		1377,397			
POL9	0,038	1374,586	2,846	1374,551	1374,548
		1374,589			
PC4	0,052	1371,218	3,420	1371,169	1371,166
		1371,221			
PC5	1,407	1370,635	1,989	1369,232	1369,228
		1370,639			
PC6	2,869	1372,641	0,863	1369,776	1369,772
		1372,645			
PC7	2,508	1374,556	0,592	1372,053	1372,048
		1374,561			
POL10	0,795	1374,583	0,768	1373,793	1373,788
		1374,588			
PC8	0,580	1372,631	2,531	1372,057	1372,051
		1372,637			
PC9	0,859	1370,641	2,849	1369,788	1369,782
		1370,647			
PC10	2,081	1371,302	1,419	1369,228	1369,221
		1371,309			
PC11	3,884	1375,041	0,145	1371,164	1371,157
		1375,048			
POL9	2,980	1377,523	0,497	1374,551	1374,543
		1377,531			

Estación	(+)	AI	(-)	Cota	Cota Ajustada
POL8	3,626	1380,220	0,929	1376,602	1376,594
		1380,228			
PC12	3,089	3,089	0,730	1379,498	1379,489
		1382,587			
PC13	2,872	1384,798	0,652	1381,935	1381,926
		1384,807			
POL7	2,657	1386,449	1,005	1383,802	1383,792
		1386,459			
PC14	2,622	1388,862	0,209	1386,250	1386,240
		1388,872			
BN1			0,212	1388,660	1388,649
SUMA	36,811		36,800		
C	12				
ERROR	0,011		Ver. Pagina	0,011=0,011	
DIF. BN1	0,011				

Factores de Corrección por parada		
Descripción	Parada	F. Corrección
F. Correc 1	1	0,00050
F. Correc 2	2	0,00100
F. Correc 3	3	0,00150
F. Correc 4	4	0,00200
F. Correc 5	5	0,00250
F. Correc 6	6	0,00300
F. Correc 7	7	0,00350
F. Correc 8	8	0,00400
F. Correc 9	9	0,00450
F. Correc 10	10	0,00500
F. Correc 11	11	0,00550
F. Correc 12	12	0,00600
F. Correc 13	13	0,00650
F. Correc 14	14	0,00700
F. Correc 15	15	0,00750
F. Correc 16	16	0,00800
F. Correc 17	17	0,00850
F. Correc 18	18	0,00900
F. Correc 19	19	0,00950
F. Correc 20	20	0,01000
F. Correc 21	21	0,01050
F. Correc 22	22	0,01100

Apéndice 5.

Informes de procesamiento de vuelos en el tramo experimental.

Vuelo 1 (25 75 65)

Reporte de Procesamiento

19 May 2025



Datos del levantamiento

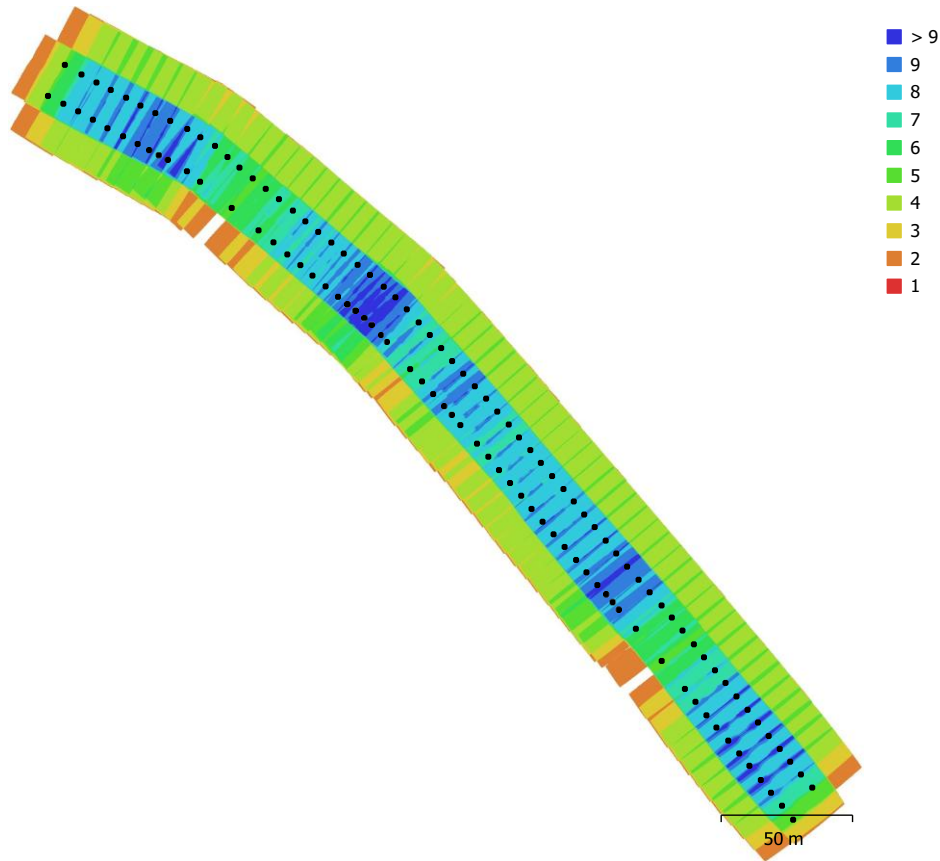


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 123	Imágenes alineadas: 123
Altitud media de vuelo: 29.8 m	Puntos de paso: 164,799
Resolución en terreno: 6.75 mm/pix	Proyecciones: 412,998
Área cubierta: 0.0222 km ²	Error de reproyección: 0.772 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

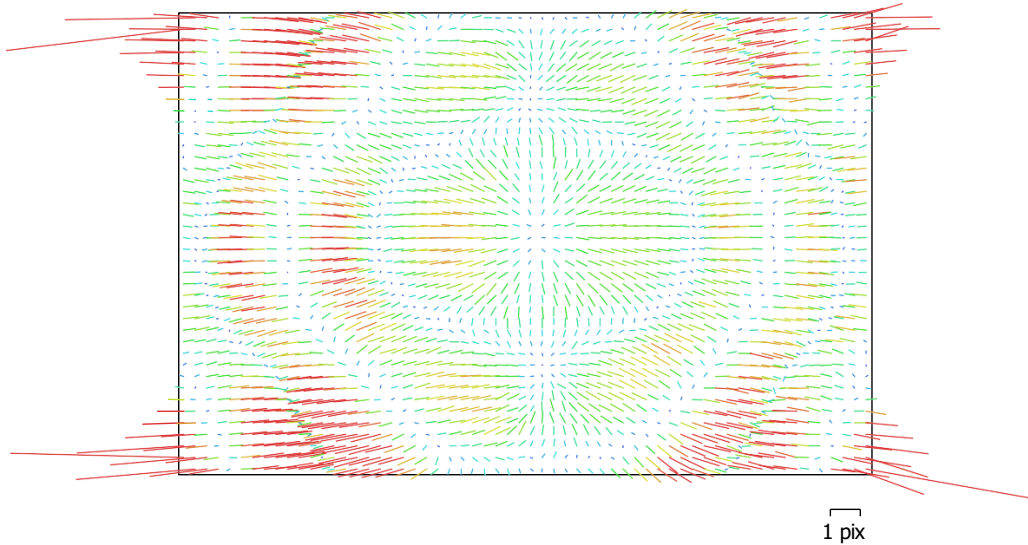


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

123 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3956.21	8.7	1.00	-0.14	0.87	-0.98	0.96	0.36	0.15	-0.67
Cx	28.8556	0.17		1.00	-0.10	0.14	-0.12	-0.13	0.15	0.07
Cy	8.28313	0.25			1.00	-0.85	0.83	0.31	0.14	-0.42
K1	-0.0984581	0.00044				1.00	-0.99	-0.20	-0.17	0.66
K2	0.106361	0.00098					1.00	0.07	0.17	-0.64
K3	0.00852489	0.00031						1.00	-0.04	-0.24
P1	0.000418963	6.5e-06							1.00	-0.09
P2	-0.000110515	1.1e-05								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

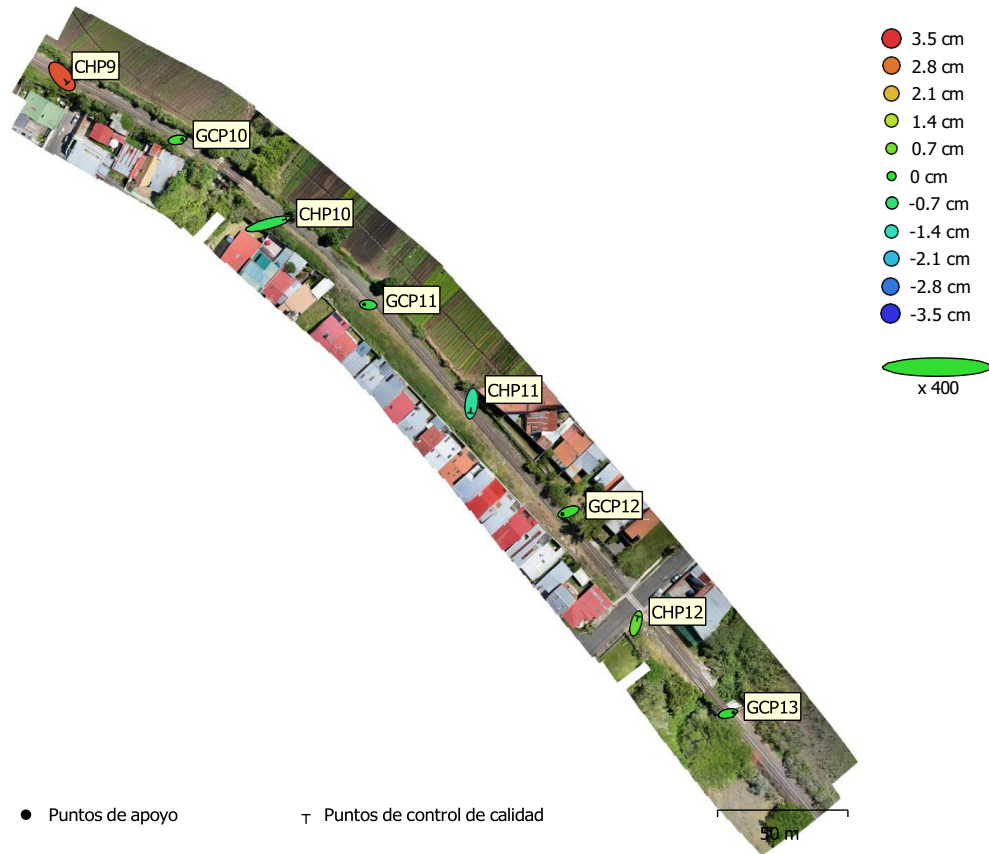


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.948943	0.222298	0.13843	0.974633	0.984414

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.81787	1.32404	1.7038	2.24894	2.82146

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP13	0.991523	0.193437	-0.0196567	1.01041	1.184 (9)
GCP12	-1.11779	-0.377747	0.12442	1.18644	0.789 (8)
GCP11	-0.761914	0.0752606	-0.218659	0.796234	1.217 (10)
GCP10	0.888185	0.109049	0.113897	0.902073	1.100 (8)
Total	0.948943	0.222298	0.13843	0.984414	1.097

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP12	0.393311	1.3063	0.554153	1.47248	1.685 (8)
CHP11	-0.198914	-1.73307	-1.09046	2.05724	0.916 (8)
CHP10	3.46111	0.91505	-0.35185	3.59728	1.511 (7)
CHP9	1.02226	-1.21038	3.16097	3.53578	0.953 (6)
Total	1.81787	1.32404	1.7038	2.82146	1.325

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

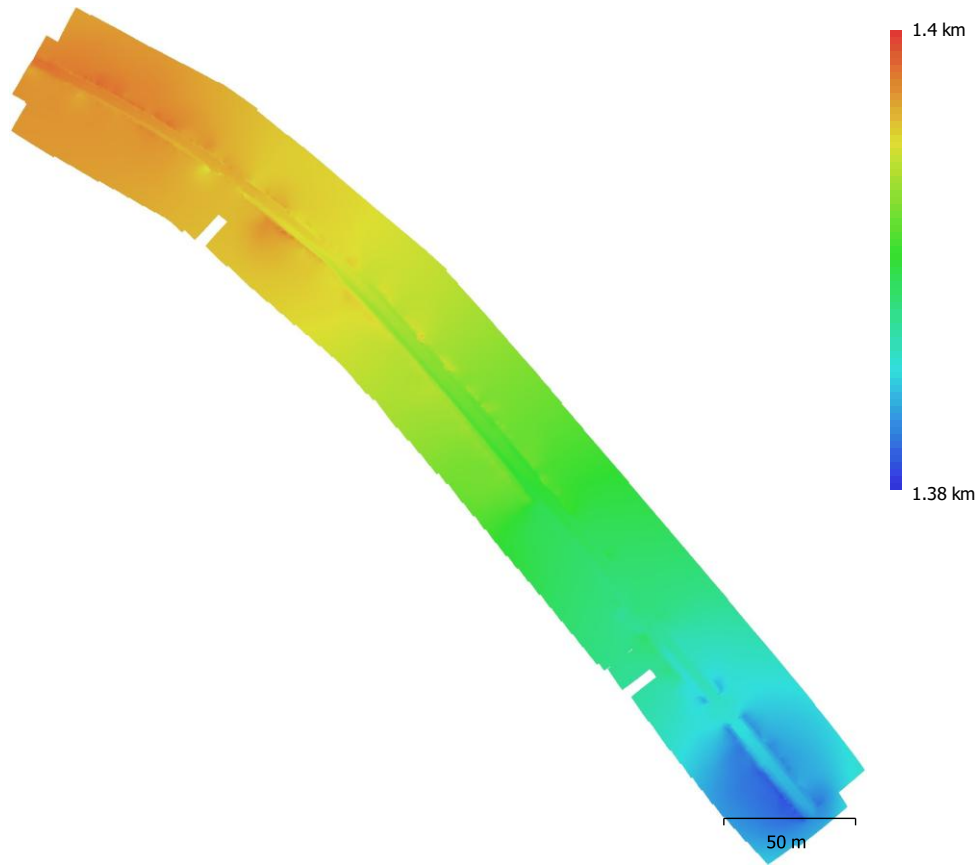


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 6.75 mm/pix
Densidad de puntos: 2.2 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	123
Cámaras orientadas	123
Marcadores	10
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	164,799 de 170,802
RMS error de reproyección	0.349822 (0.772058 pix)
Error de reproyección máximo	1.59243 (31.762 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.49353 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	2.51999

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	1 minuto 44 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.19 GB
Tiempo de orientación	1 minuto 6 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	71.15 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	6 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	10.84 MB

Mapas de profundidad

Número	123
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	21 minutos 51 segundos
Uso de memoria	7.63 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	2.78 GB

Nube de puntos densa

Puntos	118,139,192
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	21 minutos 51 segundos
Uso de memoria	7.63 GB

Parámetros de generación de la nube densa	
Tiempo de procesamiento	38 minutos 39 segundos
Uso de memoria	10.57 GB
Parámetros de clasificación de puntos de terreno	
Angulo máximo (deg)	45
Distancia máxima (m)	1
Tamaño de célula (m)	50
Tiempo de clasificación	44 minutos 39 segundos
Uso de memoria durante la clasificación	12.55 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	8.45 GB
MDE	
Tamaño	72,445 x 74,742
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	5 minutos 59 segundos
Uso de memoria	342.62 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	1.05 GB
Ortomosaico	
Tamaño	48,072 x 48,288
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	7 minutos 0 segundos
Uso de memoria	5.35 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	4.21 GB
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Vuelo 2 (25 80 70)

Reporte de Procesamiento

19 May 2025



Datos del levantamiento

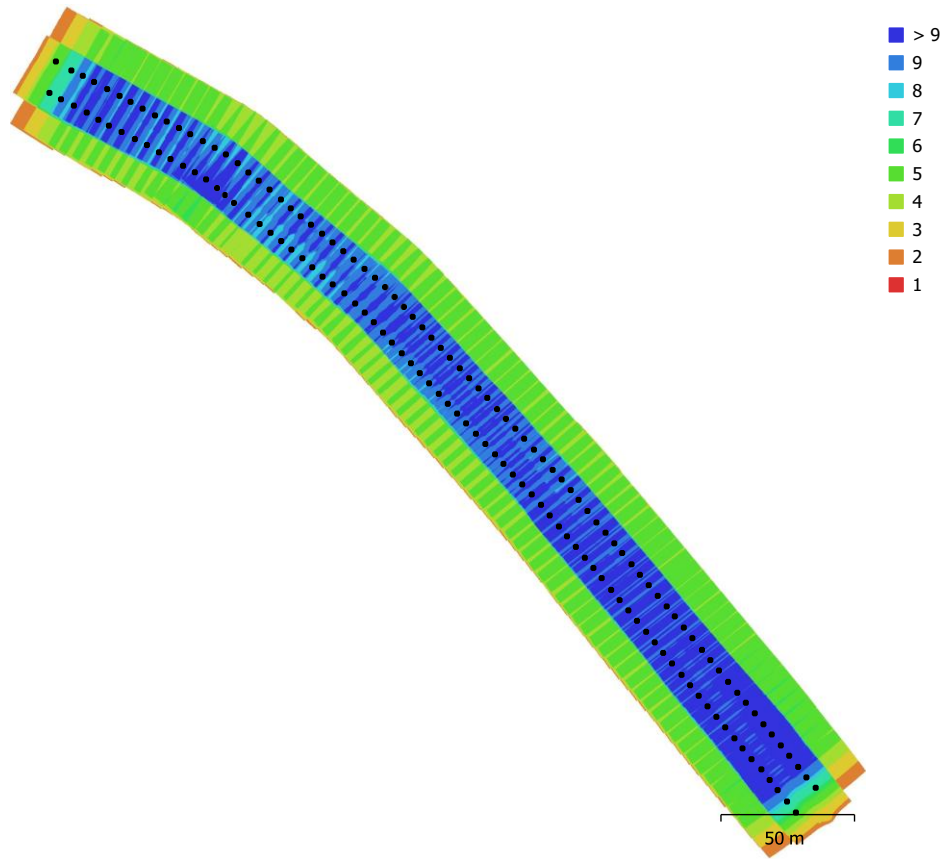


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 155	Imágenes alineadas: 155
Altitud media de vuelo: 27.6 m	Puntos de paso: 212,462
Resolución en terreno: 6.34 mm/pix	Proyecciones: 561,000
Área cubierta: 0.0203 km ²	Error de reproyección: 0.773 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

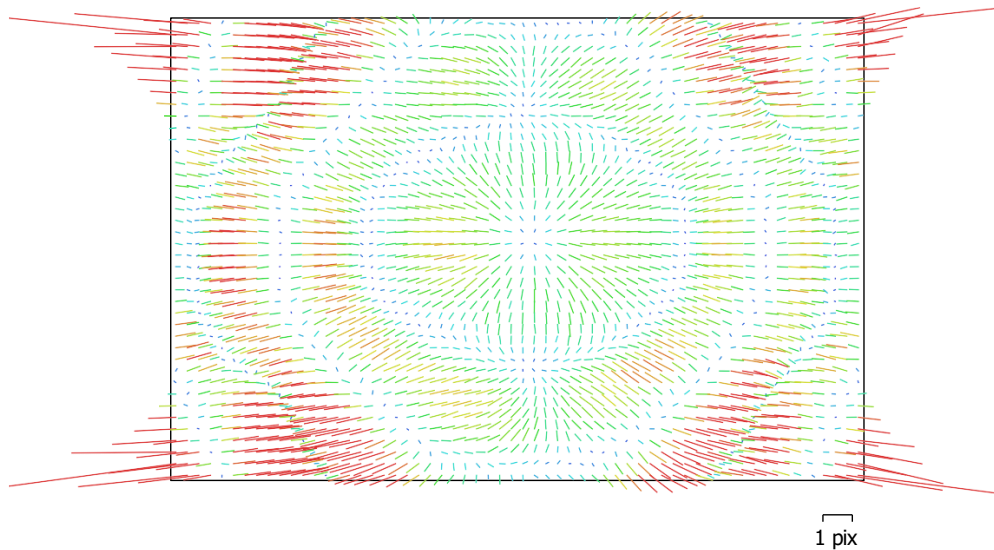


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

155 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3905.92	7.5	1.00	-0.18	0.89	-0.98	0.96	0.54	0.18	-0.67
Cx	26.9383	0.14		1.00	-0.14	0.16	-0.14	-0.21	0.13	0.10
Cy	7.47855	0.21			1.00	-0.87	0.85	0.48	0.18	-0.45
K1	-0.0940526	0.00037				1.00	-0.99	-0.39	-0.21	0.66
K2	0.0954853	0.00077					1.00	0.27	0.21	-0.64
K3	0.0124299	0.00027						1.00	-0.01	-0.36
P1	0.000534369	5.2e-06							1.00	-0.10
P2	-5.22726e-05	9.1e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

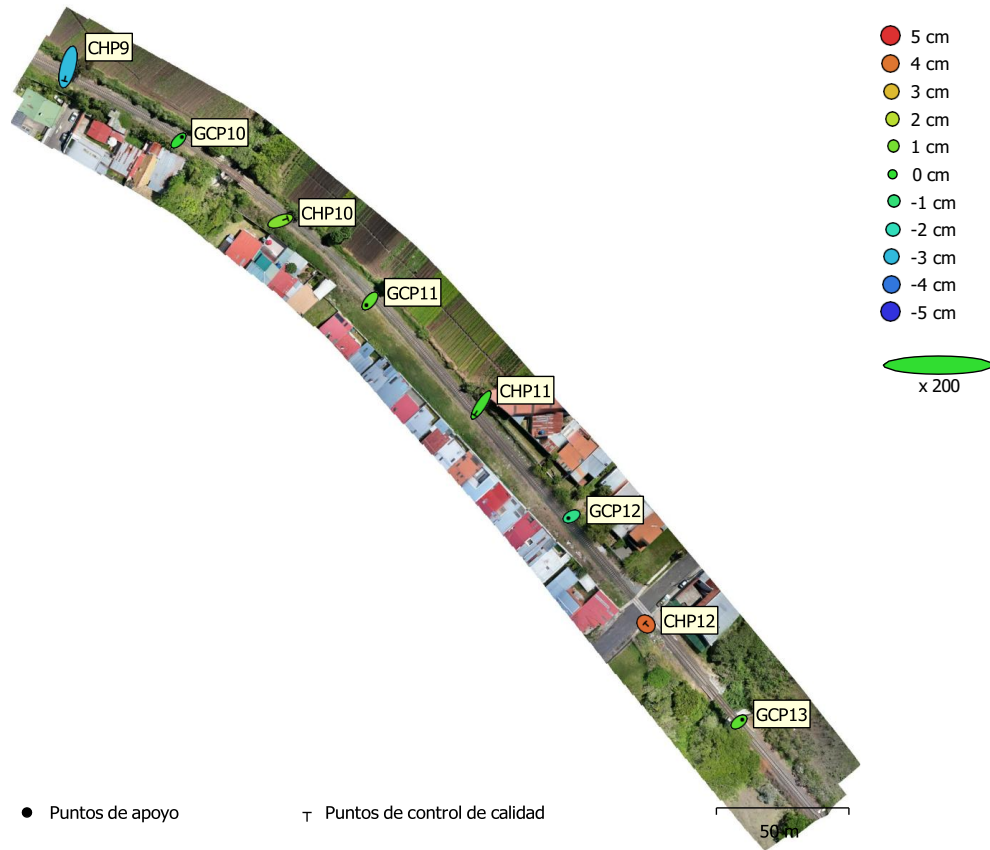


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.21644	1.08289	0.789361	1.62861	1.80983

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.86779	3.23392	2.63086	3.73455	4.56818

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP13	1.19946	0.818097	0.621841	1.57945	0.871 (10)
GCP12	-1.12564	-0.62865	-1.25795	1.80131	0.995 (9)
GCP11	-1.30388	-1.43789	0.718632	2.06979	1.123 (10)
GCP10	1.23006	1.24844	-0.0825231	1.75455	1.356 (10)
Total	1.21644	1.08289	0.789361	1.80983	1.103

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP12	-0.441404	0.416191	4.17803	4.22185	1.690 (9)
CHP11	-2.33787	-3.81852	0.270059	4.4855	0.989 (10)
CHP10	2.59165	0.919919	1.15613	2.98321	1.162 (9)
CHP9	-1.25596	-5.12174	-2.96987	6.05226	1.010 (7)
Total	1.86779	3.23392	2.63086	4.56818	1.251

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

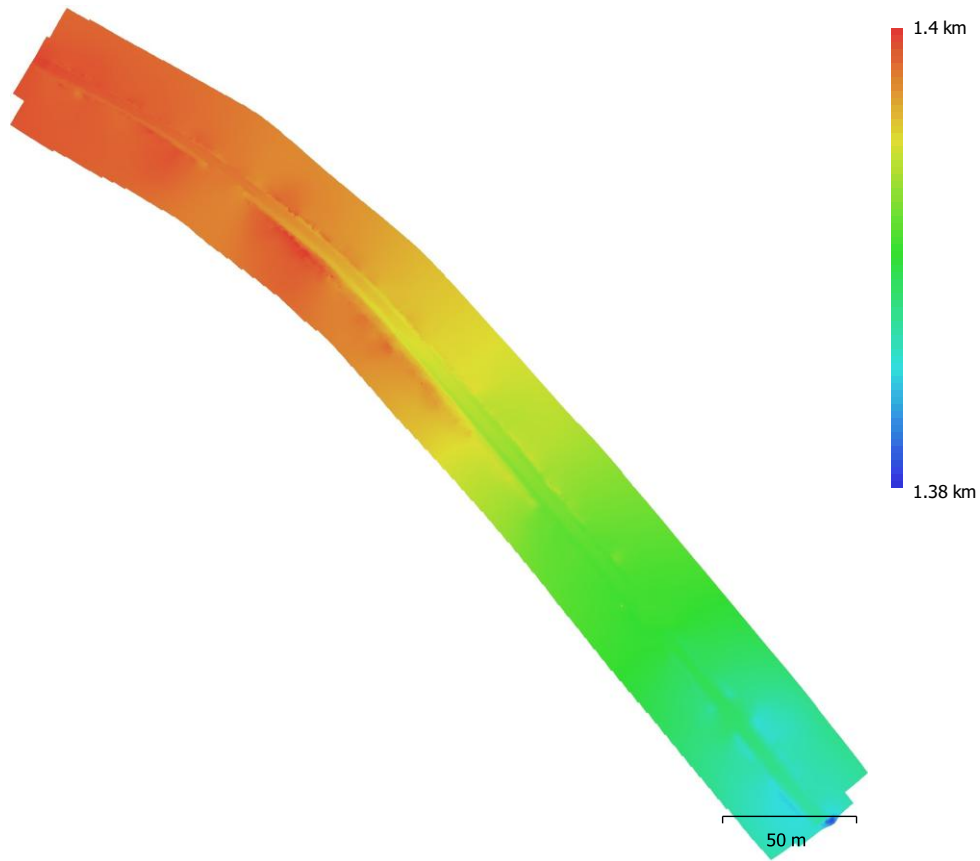


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 6.34 mm/pix
Densidad de puntos: 2.49 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	155
Cámaras orientadas	155
Marcadores	10
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	212,462 de 219,997
RMS error de reproyección	0.367195 (0.773244 pix)
Error de reproyección máximo	1.63717 (50.3979 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.38725 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	2.6541

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	2 minutos 18 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.23 GB
Tiempo de orientación	1 minuto 55 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	45.35 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	7 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	14.42 MB

Mapas de profundidad

Número	155
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	30 minutos 16 segundos
Uso de memoria	6.80 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	3.60 GB

Nube de puntos densa

Puntos	149,253,911
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	30 minutos 16 segundos
Uso de memoria	6.80 GB

Parámetros de generación de la nube densa	
Tiempo de procesamiento	46 minutos 45 segundos
Uso de memoria	11.18 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	9.44 GB
MDE	
Tamaño	74,170 x 75,595
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	6 minutos 27 segundos
Uso de memoria	355.21 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	1.13 GB
Ortomosaico	
Tamaño	50,598 x 50,277
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	8 minutos 6 segundos
Uso de memoria	6.11 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	5.10 GB
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Vuelo 3 (25 85 75)

Reporte de Procesamiento

19 May 2025



Datos del levantamiento

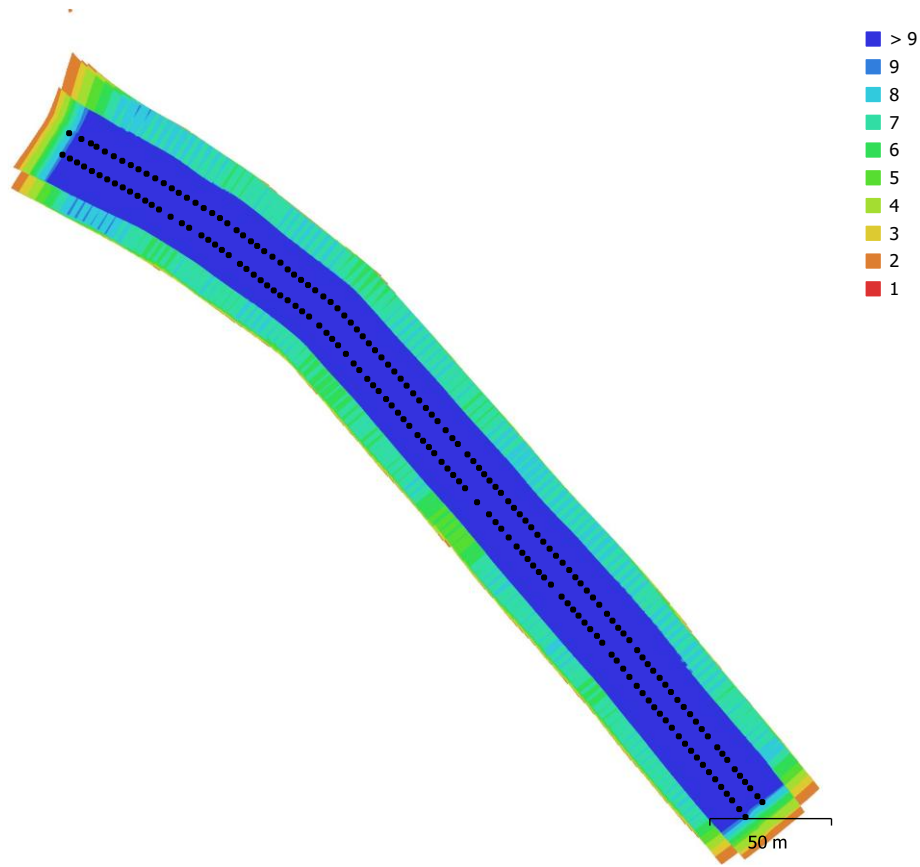


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 204	Imágenes alineadas: 204
Altitud media de vuelo: 31.7 m	Puntos de paso: 231,439
Resolución en terreno: 7.22 mm/pix	Proyecciones: 786,062
Área cubierta: 0.0224 km ²	Error de reproyección: 0.833 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

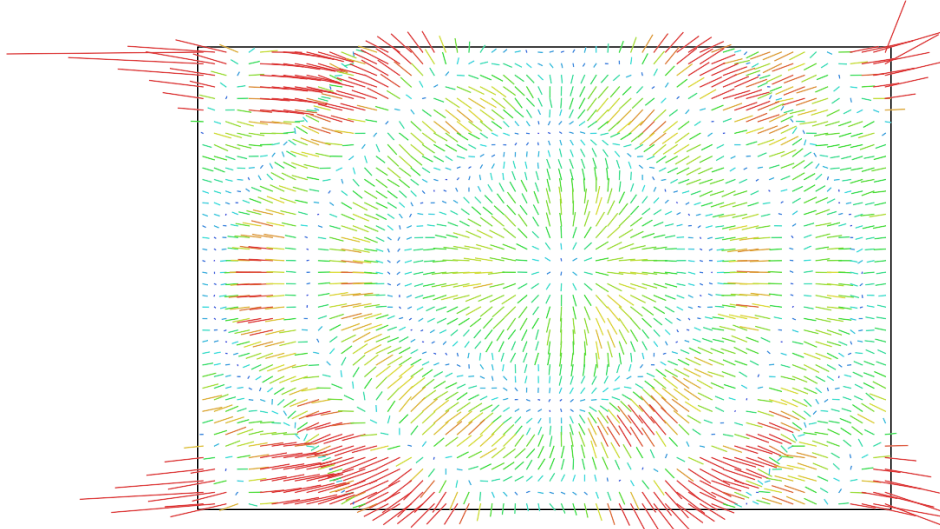


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm). 1 pix

FC3411 (8.38mm)

204 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3975.83	4.2	1.00	-0.09	0.91	-0.97	0.93	0.01	0.19	-0.68
Cx	20.3334	0.067		1.00	-0.07	0.06	-0.03	-0.16	0.52	0.07
Cy	8.789	0.14			1.00	-0.88	0.85	0.01	0.18	-0.42
K1	-0.0990374	0.00022				1.00	-0.99	0.20	-0.23	0.66
K2	0.113122	0.00051					1.00	-0.34	0.23	-0.63
K3	0.000803296	0.00019						1.00	-0.13	-0.02
P1	0.00076822	3.8e-06							1.00	-0.11
P2	-9.98329e-05	4.7e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

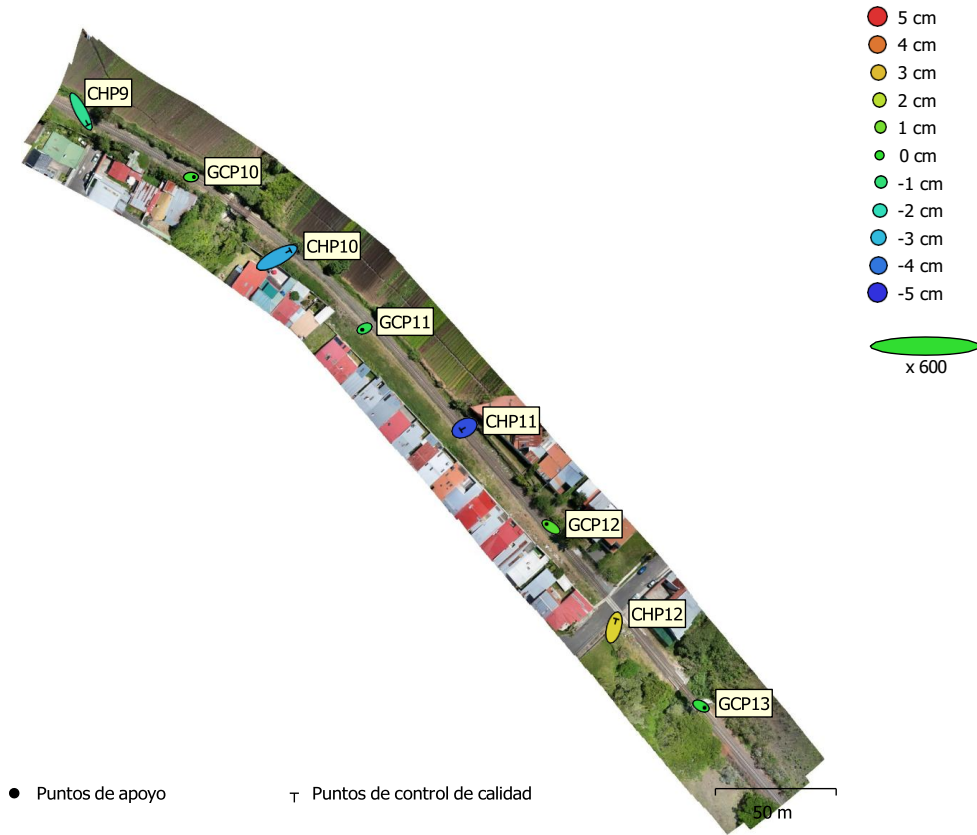


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.440688	0.244624	0.399752	0.504031	0.643311

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.05637	1.17685	3.18378	1.58142	3.5549

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP13	0.47028	-0.229115	-0.209464	0.5635	0.789 (14)
GCP12	-0.578945	0.395418	0.546089	0.888677	0.515 (15)
GCP11	-0.273217	-0.17449	-0.515063	0.608592	0.861 (13)
GCP10	0.381884	0.00818706	0.17841	0.421584	1.174 (13)
Total	0.440688	0.244624	0.399752	0.643311	0.855

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP12	0.300766	1.11436	2.65898	2.8987	1.202 (14)
CHP11	-0.483382	-0.289559	-4.57762	4.61217	0.674 (15)
CHP10	1.7908	0.957943	-3.24645	3.82937	0.871 (16)
CHP9	0.965714	-1.81565	-1.40768	2.49213	0.778 (12)
Total	1.05637	1.17685	3.18378	3.5549	0.903

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

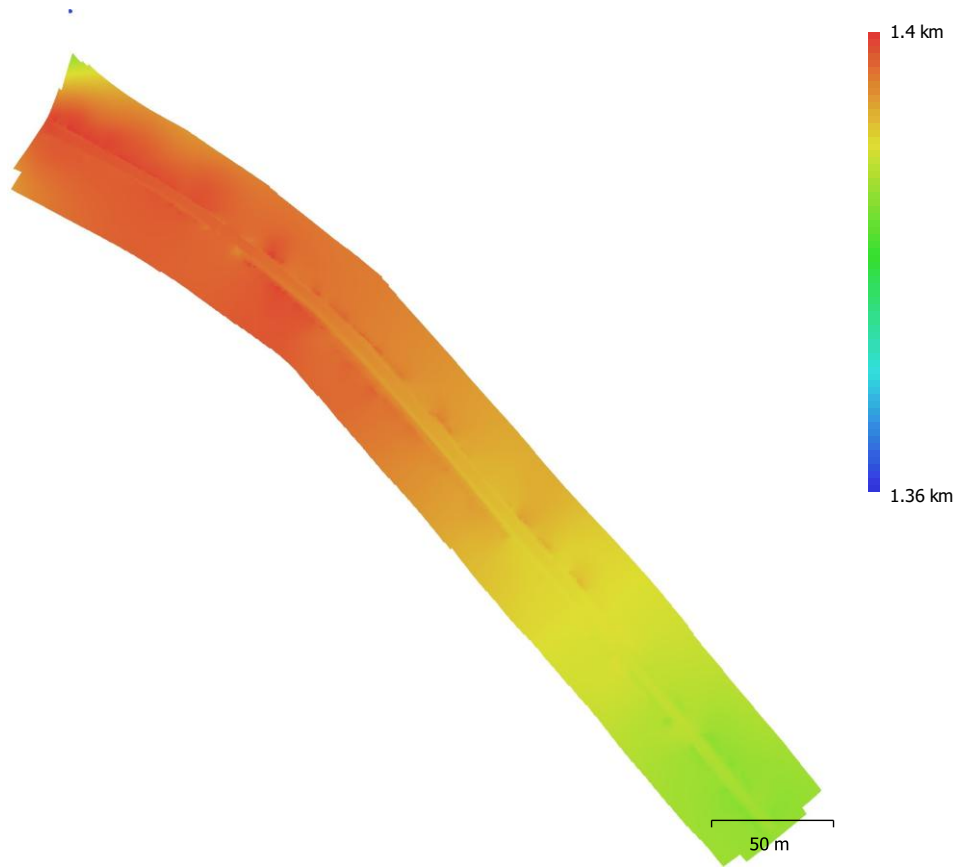


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 7.22 mm/pix
Densidad de puntos: 1.92 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	204
Cámaras orientadas	204
Marcadores	10
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	231,439 de 242,883
RMS error de reproyección	0.409798 (0.832622 pix)
Error de reproyección máximo	2.04932 (47.7026 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.20326 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	3.44407

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	3 minutos 38 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.32 GB
Tiempo de orientación	2 minutos 53 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	37.45 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	5 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	18.78 MB

Mapas de profundidad

Número	204
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	58 minutos 22 segundos
Uso de memoria	7.33 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	5.38 GB

Nube de puntos densa

Puntos	113,568,671
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	58 minutos 22 segundos
Uso de memoria	7.33 GB

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	2 horas 3 minutos
Uso de memoria	11.24 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	8.87 GB

MDE

Tamaño	64,813 x 65,760
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	5 minutos 57 segundos
Uso de memoria	332.96 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	1.04 GB

Ortomosaico

Tamaño	45,998 x 48,697
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	9 minutos 40 segundos
Uso de memoria	7.85 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	6.31 GB

Sistema

Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Vuelo 4 (30 75 65)

Reporte de Procesamiento

19 May 2025



Datos del levantamiento

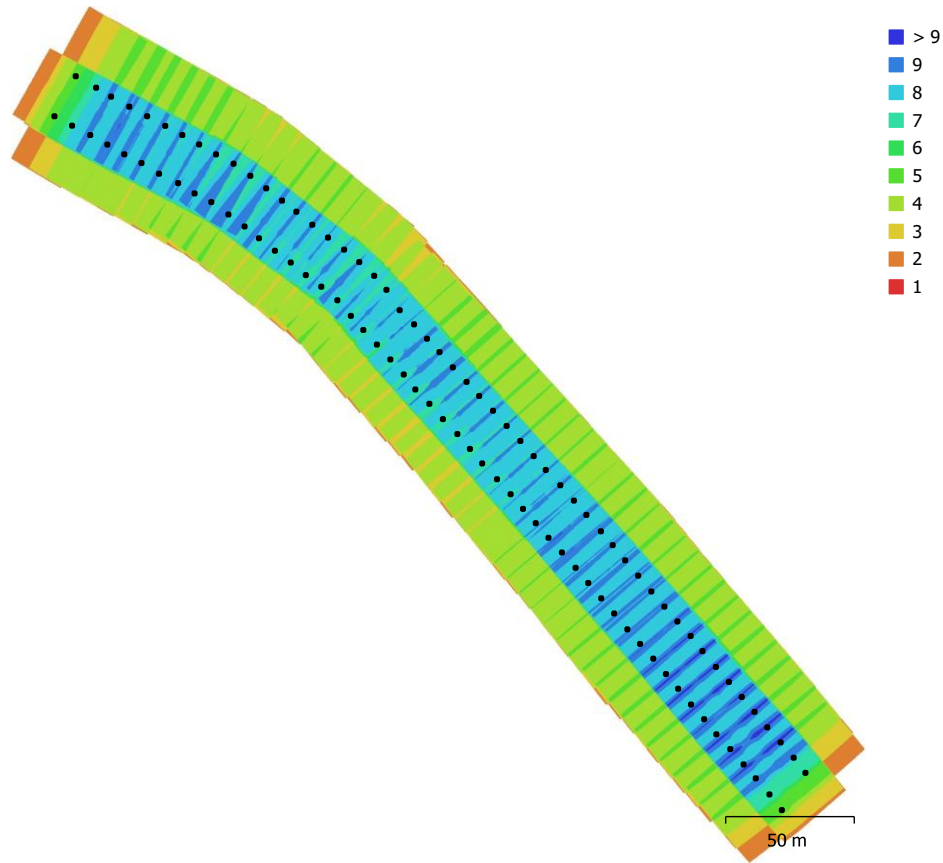


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 104	Imágenes alineadas: 104
Altitud media de vuelo: 36.2 m	Puntos de paso: 144,330
Resolución en terreno: 8.2 mm/pix	Proyecciones: 352,824
Área cubierta: 0.0269 km ²	Error de reproyección: 0.762 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

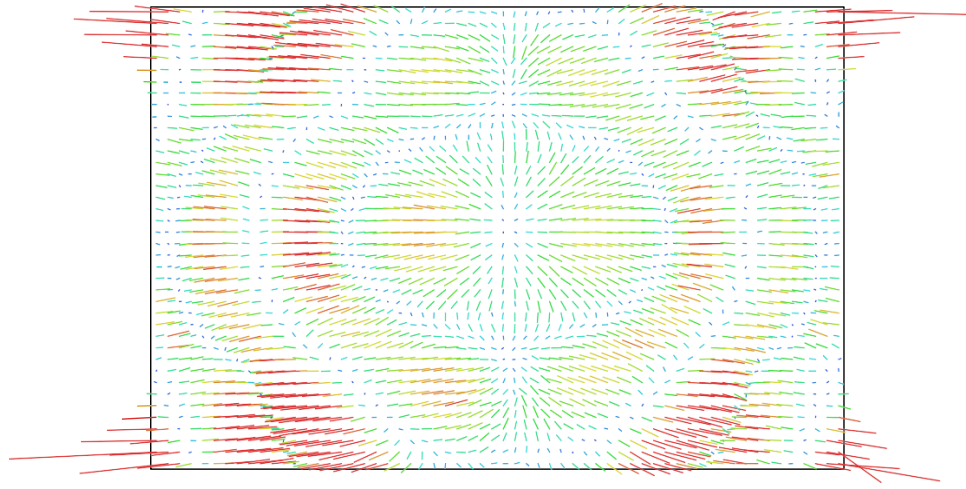


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm). 1 pix

FC3411 (8.38mm)

104 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3951.69	9.4	1.00	-0.11	0.85	-0.98	0.97	-0.44	0.12	-0.66
Cx	27.5548	0.18		1.00	-0.05	0.10	-0.10	-0.00	0.16	0.06
Cy	9.36587	0.26			1.00	-0.84	0.82	-0.38	0.11	-0.38
K1	-0.100896	0.00049				1.00	-0.99	0.58	-0.14	0.65
K2	0.121278	0.0012					1.00	-0.65	0.14	-0.64
K3	-0.0100694	0.00033						1.00	-0.14	0.28
P1	0.000357822	7.1e-06							1.00	-0.06
P2	-5.1171e-05	1.3e-05								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

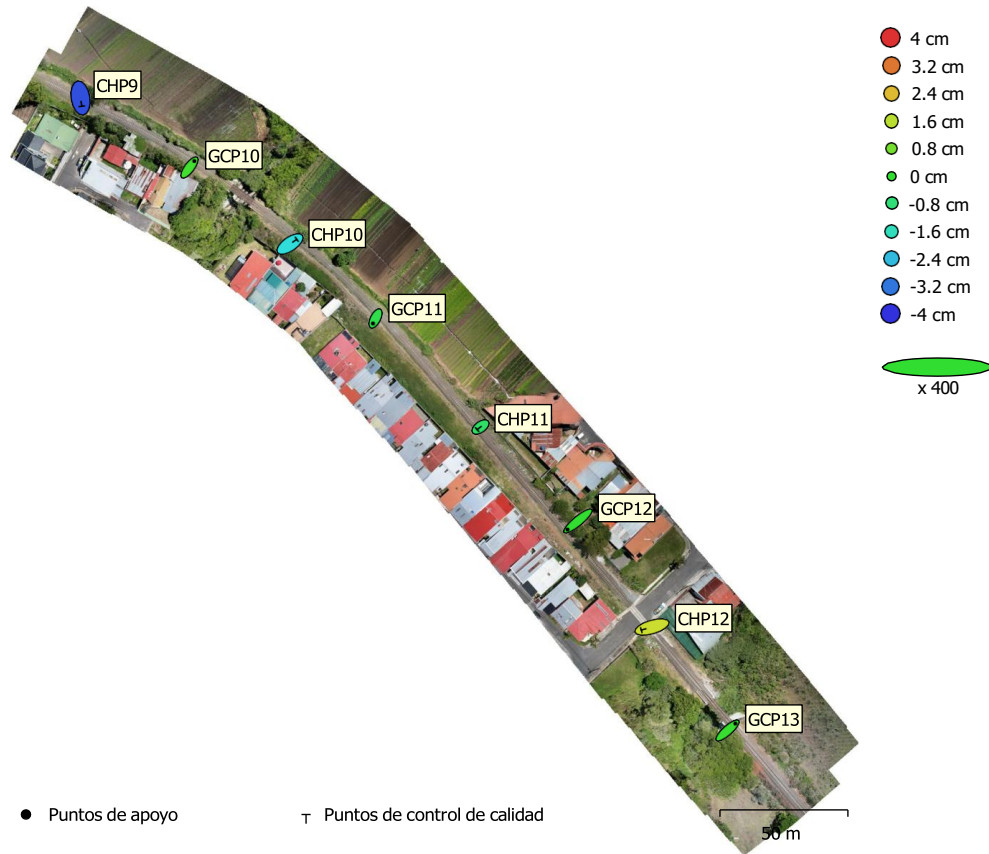


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.32994	1.27515	0.193957	1.84248	1.85266

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.23692	0.979437	2.28221	1.57774	2.77448

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP13	1.49931	1.30117	0.0882568	1.98715	0.635 (8)
GCP12	-1.9458	-1.58014	0.0100624	2.50661	0.570 (7)
GCP11	-0.462773	-0.9271	-0.311604	1.08202	1.056 (8)
GCP10	0.909264	1.20607	0.213285	1.5254	1.401 (8)
Total	1.32994	1.27515	0.193957	1.85266	0.986

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP12	-2.03147	-0.591697	1.79992	2.77789	1.406 (8)
CHP11	-0.60704	-0.492292	-0.631133	1.00458	0.841 (8)
CHP10	1.25337	0.891301	-1.9663	2.49634	1.207 (9)
CHP9	0.231569	-1.56535	-3.65097	3.97913	0.996 (7)
Total	1.23692	0.979437	2.28221	2.77448	1.139

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

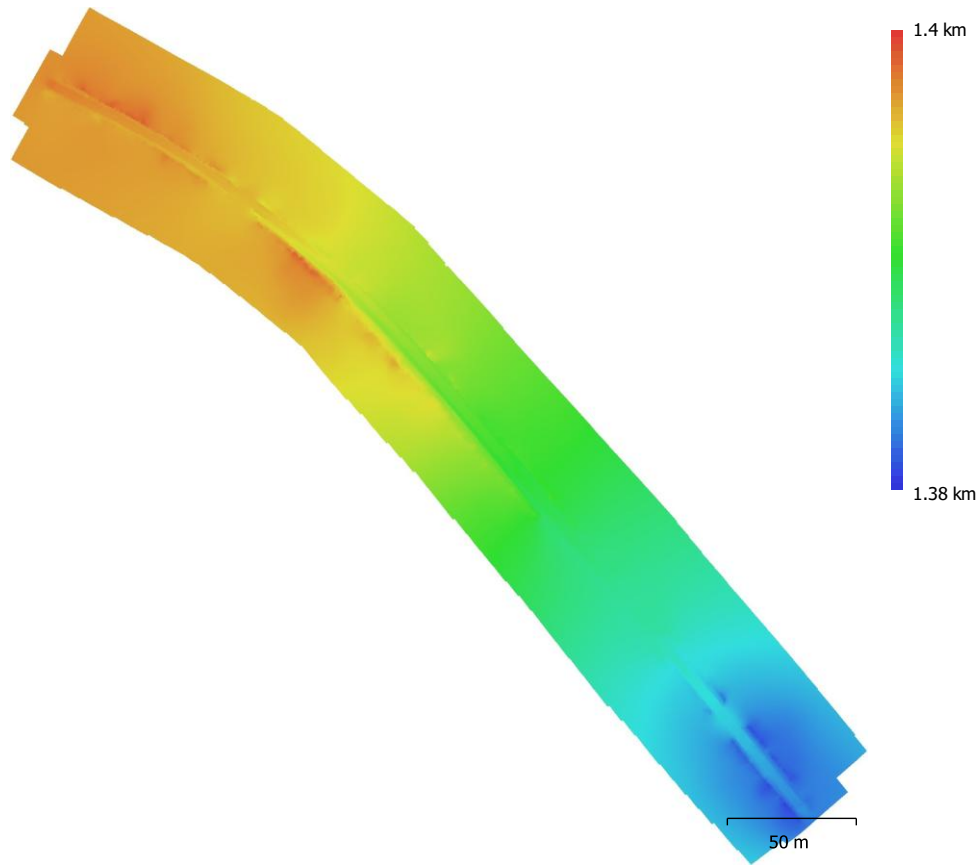


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 8.2 mm/pix
Densidad de puntos: 1.49 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	104
Cámaras orientadas	104
Marcadores	10
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	144,330 de 149,483
RMS error de reproyección	0.357275 (0.762298 pix)
Error de reproyección máximo	1.49179 (40.1571 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.5289 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	2.45804

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	1 minuto 48 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.31 GB
Tiempo de orientación	1 minuto 12 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	71.18 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	2 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	9.35 MB

Mapas de profundidad

Número	104
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	18 minutos 33 segundos
Uso de memoria	7.11 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	2.32 GB

Nube de puntos densa

Puntos	82,226,685
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	18 minutos 33 segundos
Uso de memoria	7.11 GB

Parámetros de generación de la nube densa	
Tiempo de procesamiento	39 minutos 20 segundos
Uso de memoria	10.14 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	7.12 GB
MDE	
Tamaño	56,312 x 57,007
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	4 minutos 49 segundos
Uso de memoria	308.21 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	920.53 MB
Ortomosaico	
Tamaño	40,400 x 40,474
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	5 minutos 17 segundos
Uso de memoria	6.21 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	3.34 GB
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Vuelo 5 (30 80 70)

Reporte de Procesamiento

19 May 2025



Datos del levantamiento

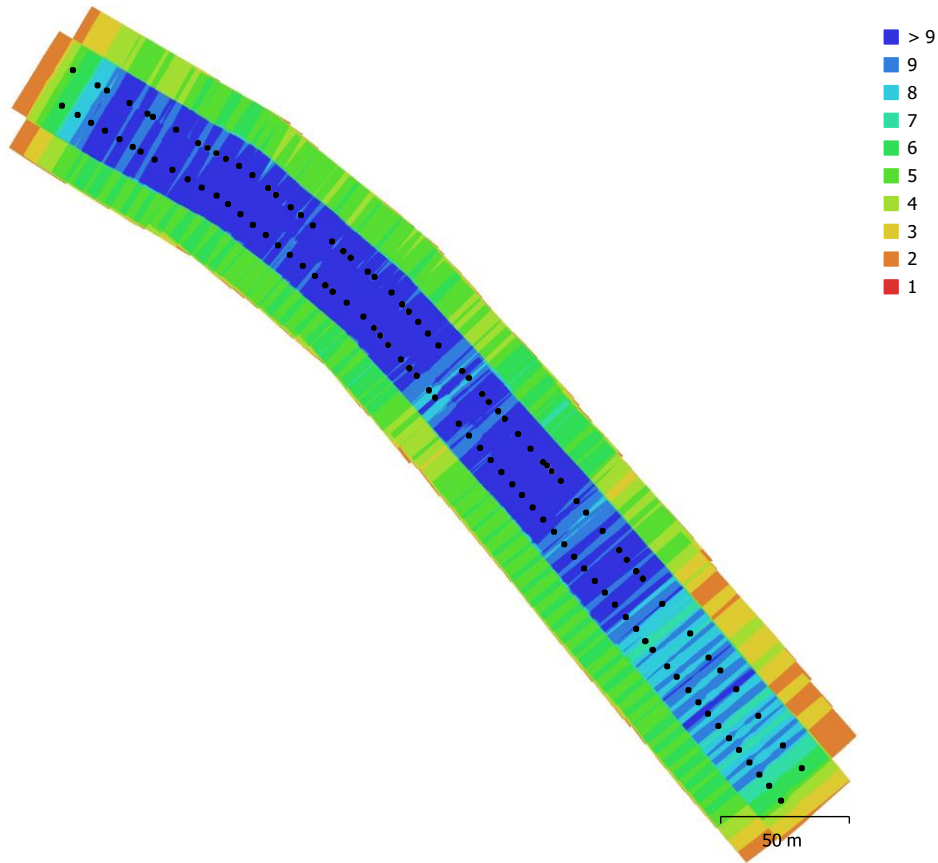


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 120	Imágenes alineadas: 120
Altitud media de vuelo: 37.4 m	Puntos de paso: 153,681
Resolución en terreno: 8.48 mm/pix	Proyecciones: 425,097
Área cubierta: 0.0267 km ²	Error de reproyección: 0.8 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

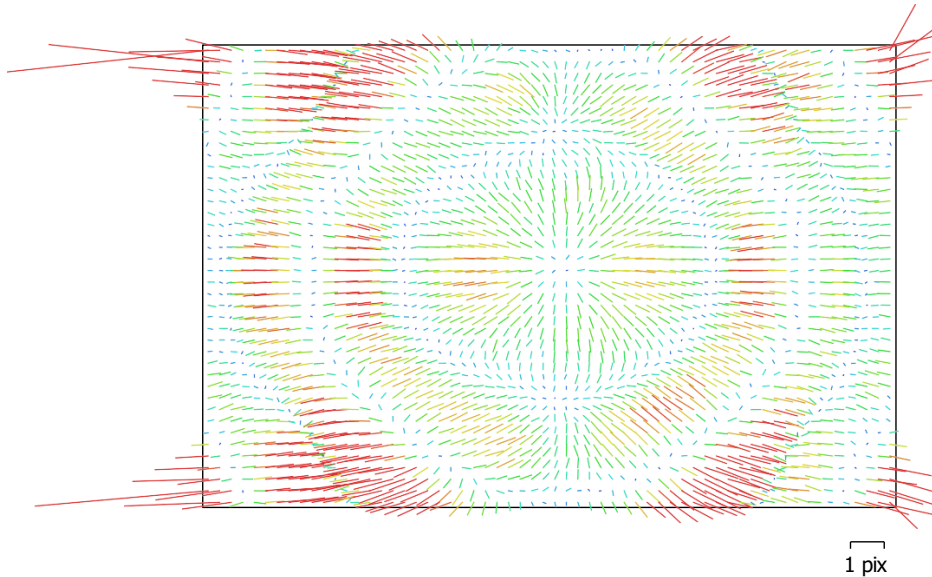


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

120 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3967.6	7.2	1.00	-0.17	0.88	-0.98	0.96	-0.46	0.18	-0.62
Cx	21.2069	0.12		1.00	-0.13	0.16	-0.14	-0.01	0.37	0.10
Cy	7.6476	0.2			1.00	-0.86	0.85	-0.41	0.16	-0.32
K1	-0.10199	0.00038				1.00	-0.99	0.61	-0.20	0.61
K2	0.125311	0.00094					1.00	-0.69	0.20	-0.60
K3	-0.012507	0.0003						1.00	-0.17	0.29
P1	0.000617004	6e-06							1.00	-0.09
P2	-4.98454e-05	7.9e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

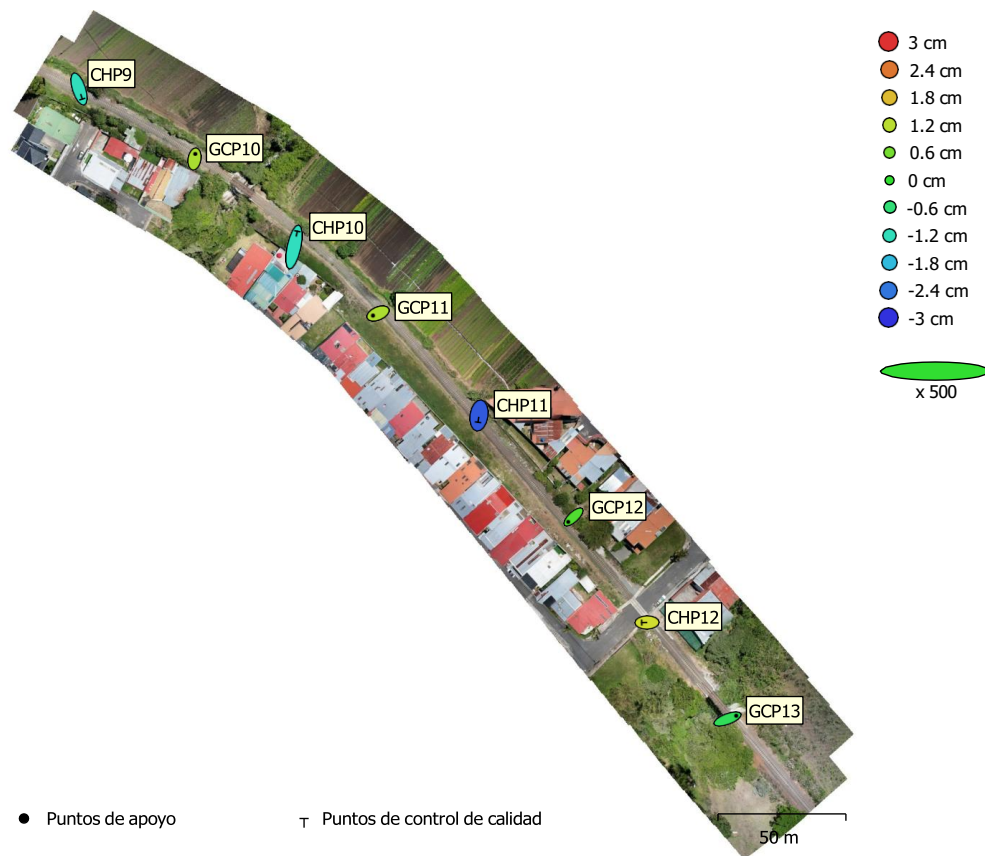


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.848256	0.607988	0.783344	1.04364	1.30492

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.525851	1.51338	1.72794	1.60214	2.3564

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP13	1.30325	0.473889	-0.347369	1.42958	0.833 (7)
GCP12	-0.793817	-0.745742	0.280256	1.12464	0.697 (9)
GCP11	-0.73252	-0.301582	1.07253	1.33336	1.072 (11)
GCP10	0.11384	0.779066	1.05119	1.31335	0.803 (9)
Total	0.848256	0.607988	0.783344	1.30492	0.877

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP12	-0.782864	-0.0180483	1.38588	1.59181	0.945 (8)
CHP11	-0.141999	-1.00887	-2.65639	2.84506	0.687 (10)
CHP10	0.480452	2.38874	-1.23134	2.73004	0.877 (10)
CHP9	0.492142	-1.5611	-1.20413	2.03204	0.435 (7)
Total	0.525851	1.51338	1.72794	2.3564	0.772

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

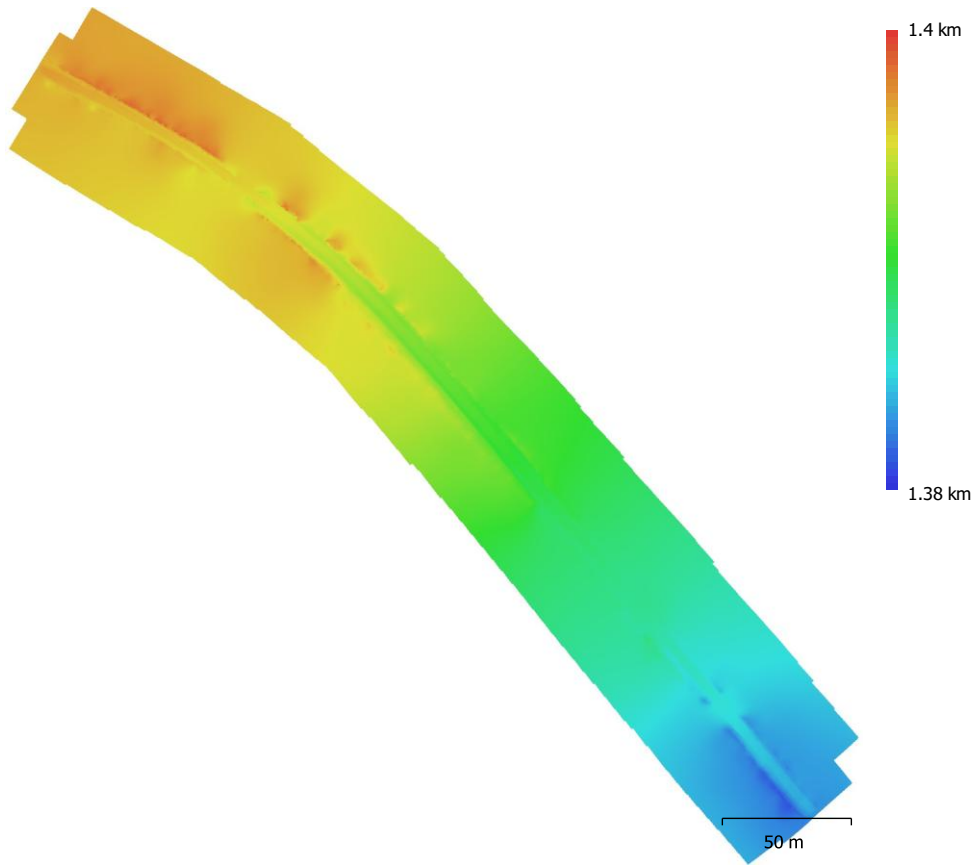


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 8.48 mm/pix
Densidad de puntos: 1.39 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	120
Cámaras orientadas	120
Marcadores	10
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	153,681 de 160,804
RMS error de reproyección	0.370174 (0.800093 pix)
Error de reproyección máximo	1.56781 (48.1529 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.43029 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	2.80331

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	1 minuto 53 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.06 GB
Tiempo de orientación	1 minuto 28 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	28.64 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	4 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	10.87 MB

Mapas de profundidad

Número	120
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	25 minutos 28 segundos
Uso de memoria	7.71 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	2.93 GB

Nube de puntos densa

Puntos	86,775,610
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	25 minutos 28 segundos
Uso de memoria	7.71 GB

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	50 minutos 9 segundos
Uso de memoria	11.11 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	7.16 GB

MDE

Tamaño	52,479 x 53,499
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	4 minutos 27 segundos
Uso de memoria	333.61 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	870.16 MB

Ortomosaico

Tamaño	38,841 x 39,192
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	5 minutos 29 segundos
Uso de memoria	7.01 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	3.61 GB

Sistema

Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Vuelo 6 (30 85 75)

Reporte de Procesamiento

19 May 2025



Datos del levantamiento

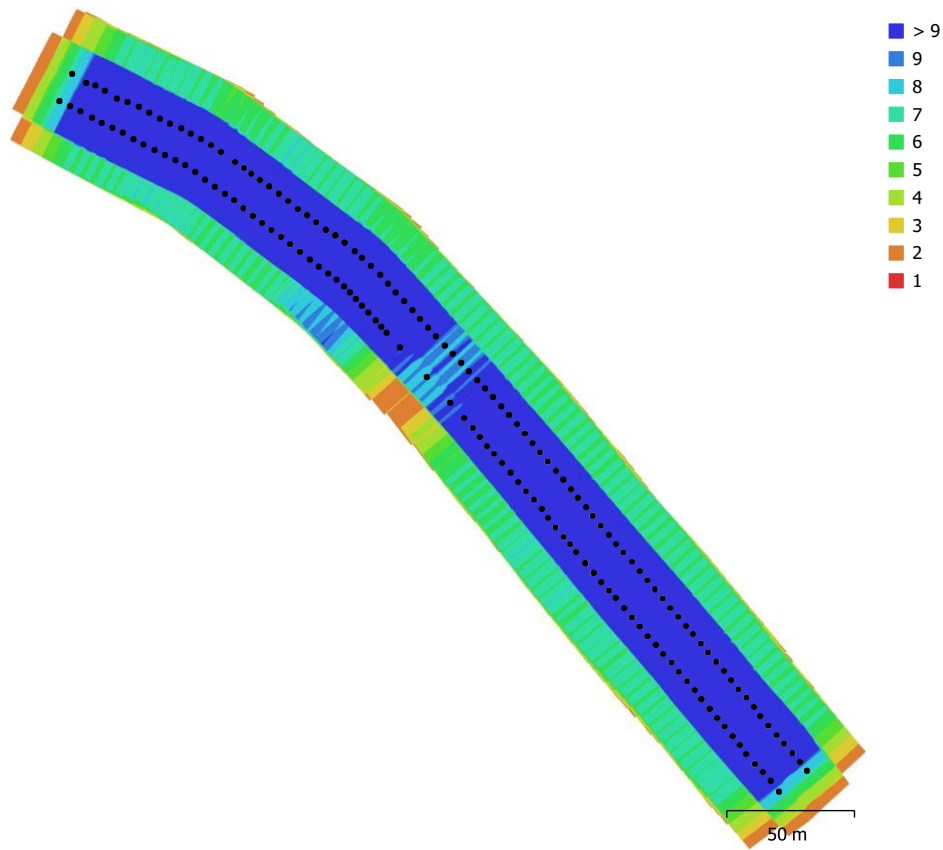


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 169	Imágenes alineadas: 169
Altitud media de vuelo: 36.3 m	Puntos de paso: 207,395
Resolución en terreno: 8.01 mm/pix	Proyecciones: 645,670
Área cubierta: 0.0256 km ²	Error de reproyección: 0.829 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

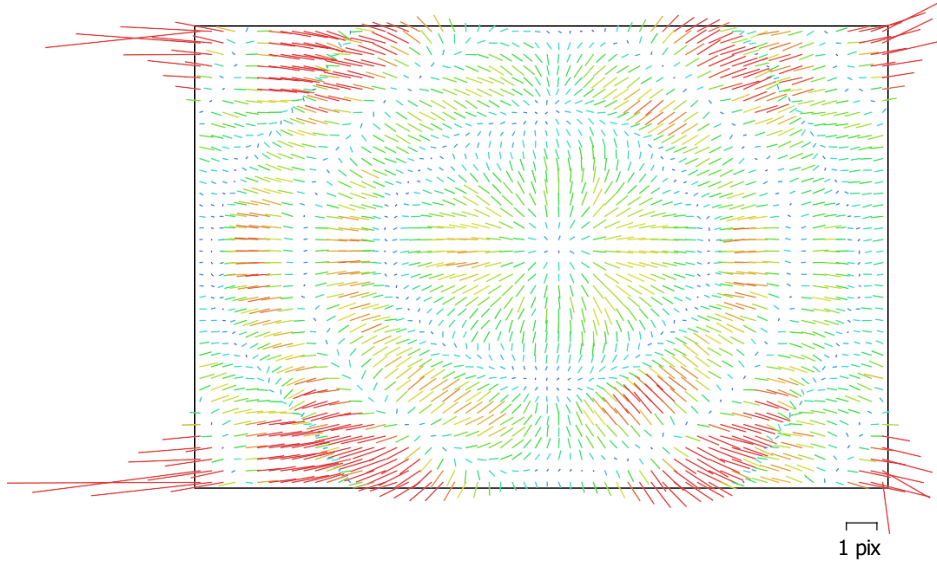


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

169 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	4097.53	5.9	1.00	0.07	0.88	-0.98	0.96	-0.38	0.18	-0.66
Cx	22.0108	0.091		1.00	0.08	-0.09	0.10	-0.13	0.44	-0.05
Cy	9.79596	0.16			1.00	-0.87	0.85	-0.34	0.17	-0.37
K1	-0.109788	0.00032				1.00	-0.99	0.54	-0.21	0.65
K2	0.14105	0.00084					1.00	-0.62	0.21	-0.64
K3	-0.0117089	0.00027						1.00	-0.16	0.24
P1	0.000673241	4.7e-06							1.00	-0.11
P2	-0.00016034	6.3e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

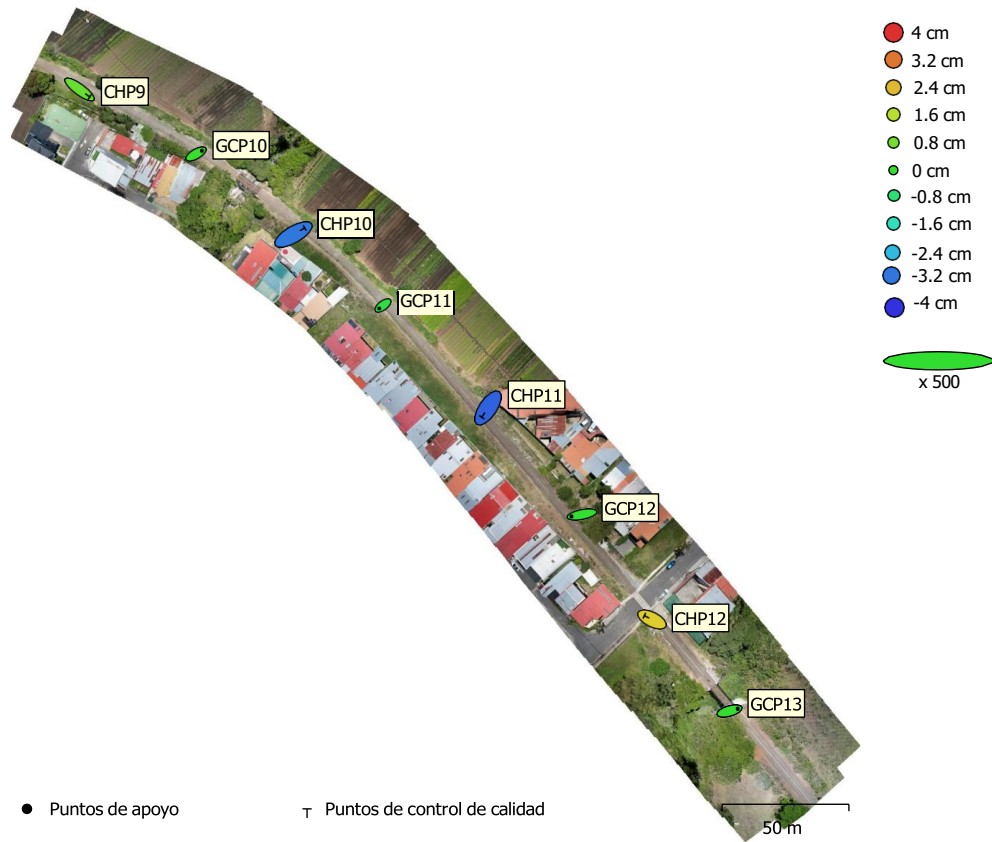


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores. El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.14481	0.399965	0.118343	1.21267	1.21843

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.38229	1.0525	2.59911	1.73738	3.12631

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP13	1.25825	0.302748	0.0417365	1.29483	0.982 (13)
GCP12	-1.58355	-0.288409	0.0228242	1.60976	1.326 (14)
GCP11	-0.578501	-0.489325	-0.193019	0.781894	0.855 (13)
GCP10	0.903802	0.474986	0.128458	1.02906	0.924 (12)
Total	1.14481	0.399965	0.118343	1.21843	1.046

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP12	-1.17721	0.563712	2.17786	2.53902	0.992 (13)
CHP11	-0.93199	-1.39572	-3.42834	3.81709	0.738 (13)
CHP10	1.71338	0.997831	-3.17904	3.74668	0.838 (14)
CHP9	1.56615	-1.08145	0.646937	2.0102	0.916 (12)
Total	1.38229	1.0525	2.59911	3.12631	0.874

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

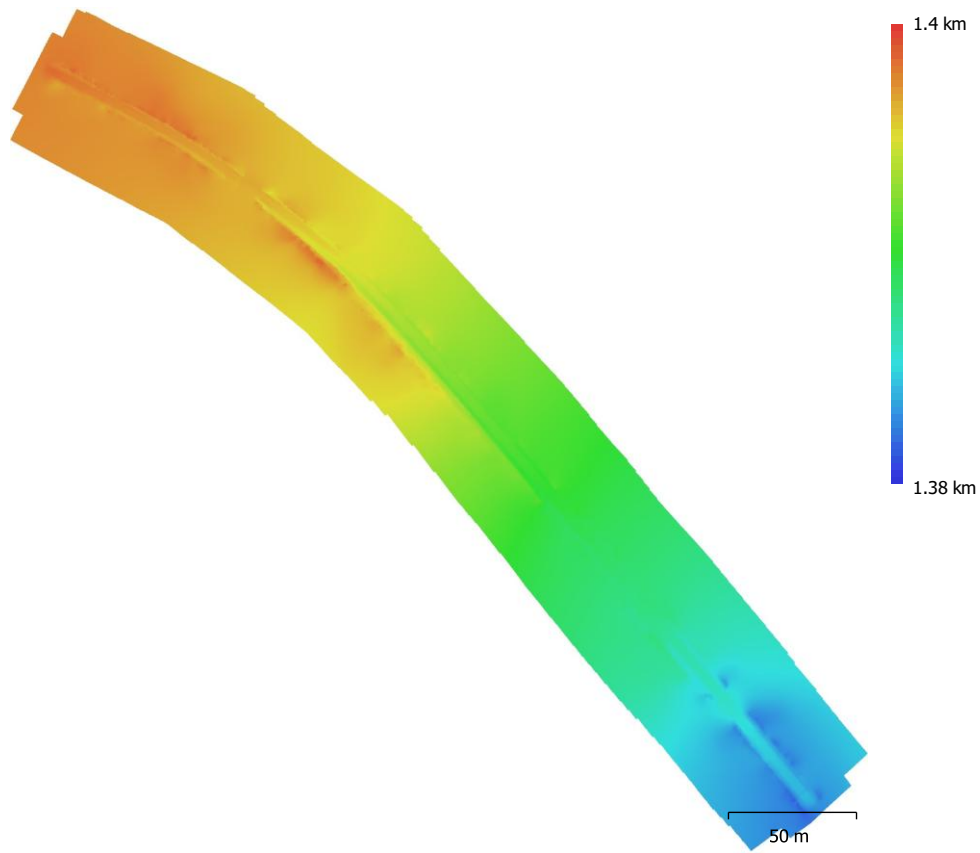


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 8.01 mm/pix
Densidad de puntos: 1.56 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	169
Cámaras orientadas	169
Marcadores	10
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	207,395 de 216,611
RMS error de reproyección	0.391337 (0.82902 pix)
Error de reproyección máximo	1.73288 (34.8729 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.33509 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	3.14705

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	2 minutos 54 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.31 GB
Tiempo de orientación	2 minutos 41 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	24.49 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	5 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	15.79 MB

Mapas de profundidad

Número	169
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	42 minutos 53 segundos
Uso de memoria	7.41 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	4.35 GB

Nube de puntos densa

Puntos	87,486,704
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	42 minutos 53 segundos
Uso de memoria	7.41 GB

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	1 hora 26 minutos
Uso de memoria	11.51 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	8.35 GB

MDE

Tamaño	60,941 x 61,480
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	5 minutos 5 segundos
Uso de memoria	297.75 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	930.04 MB

Ortomosaico

Tamaño	41,817 x 41,043
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	7 minutos 25 segundos
Uso de memoria	6.66 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	4.93 GB

Sistema

Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Vuelo 7 (35 75 65)

Reporte de Procesamiento

19 May 2025



Datos del levantamiento

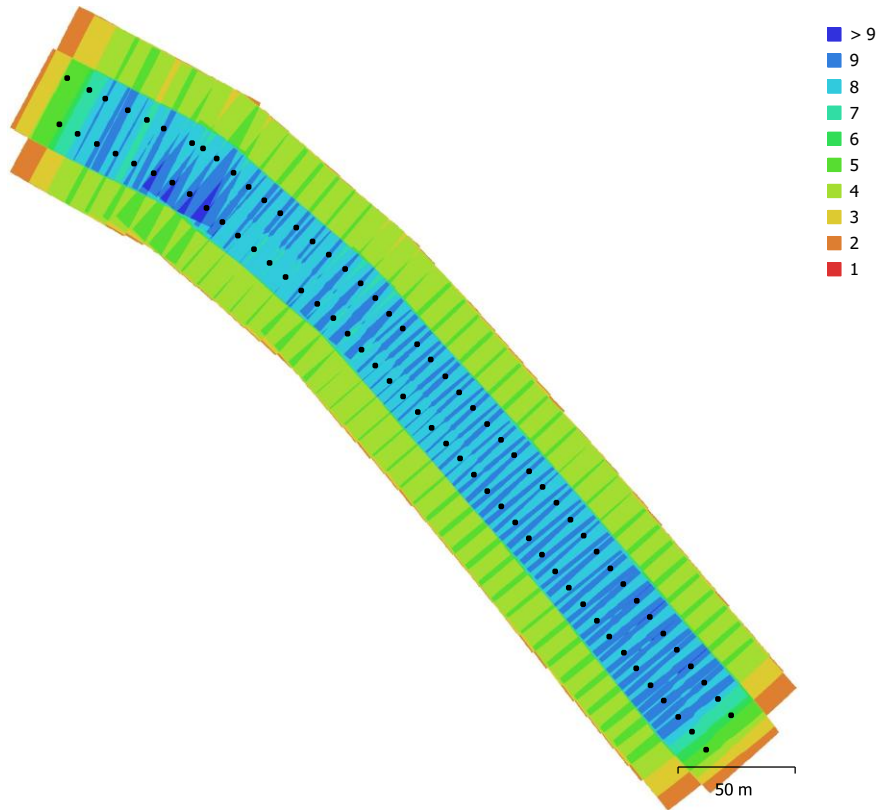


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes:	89	Imágenes alineadas:	89
Altitud media de vuelo:	44.1 m	Puntos de paso:	122,850
Resolución en terreno:	9.91 mm/pix	Proyecciones:	312,760
Área cubierta:	0.032 km ²	Error de reproyección:	0.803 pix

Calibración de cámara

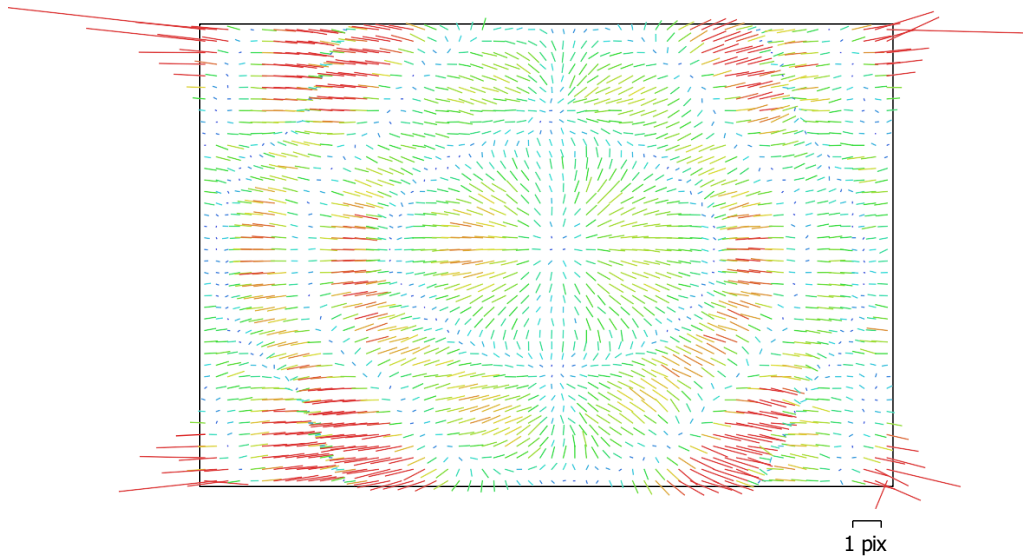


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

89 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3974.77	8.6	1.00	-0.02	0.87	-0.98	0.96	-0.60	0.15	-0.64
Cx	21.9738	0.15		1.00	-0.00	0.01	0.01	-0.07	0.39	-0.01
Cy	8.41467	0.25			1.00	-0.85	0.84	-0.52	0.13	-0.32
K1	-0.104706	0.00047				1.00	-0.99	0.73	-0.17	0.63
K2	0.132861	0.0012					1.00	-0.79	0.17	-0.62
K3	-0.0180736	0.0004						1.00	-0.16	0.38
P1	0.000490049	7.2e-06							1.00	-0.08
P2	-6.25224e-05	1e-05								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre



Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.18073	0.517053	0.131891	1.28898	1.29571

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.700853	1.99559	2.94419	2.11508	3.62517

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP13	1.20705	0.534078	0.100891	1.32378	0.843 (8)
GCP12	-1.95851	-0.830014	-0.208652	2.13734	0.907 (8)
GCP11	0.402616	-0.012378	0.124805	0.421698	1.105 (9)
GCP10	0.348845	0.308314	-0.017044	0.465877	0.706 (9)
Total	1.18073	0.517053	0.131891	1.29571	0.903

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP12	-0.723784	-0.0572459	1.51063	1.67605	1.052 (9)
CHP11	-0.495282	-0.917665	-4.53519	4.65353	1.078 (8)
CHP10	0.693024	1.2624	-2.97806	3.30799	0.786 (9)
CHP9	-0.845772	-3.67294	-1.71879	4.14247	0.801 (6)
Total	0.700853	1.99559	2.94419	3.62517	0.947

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

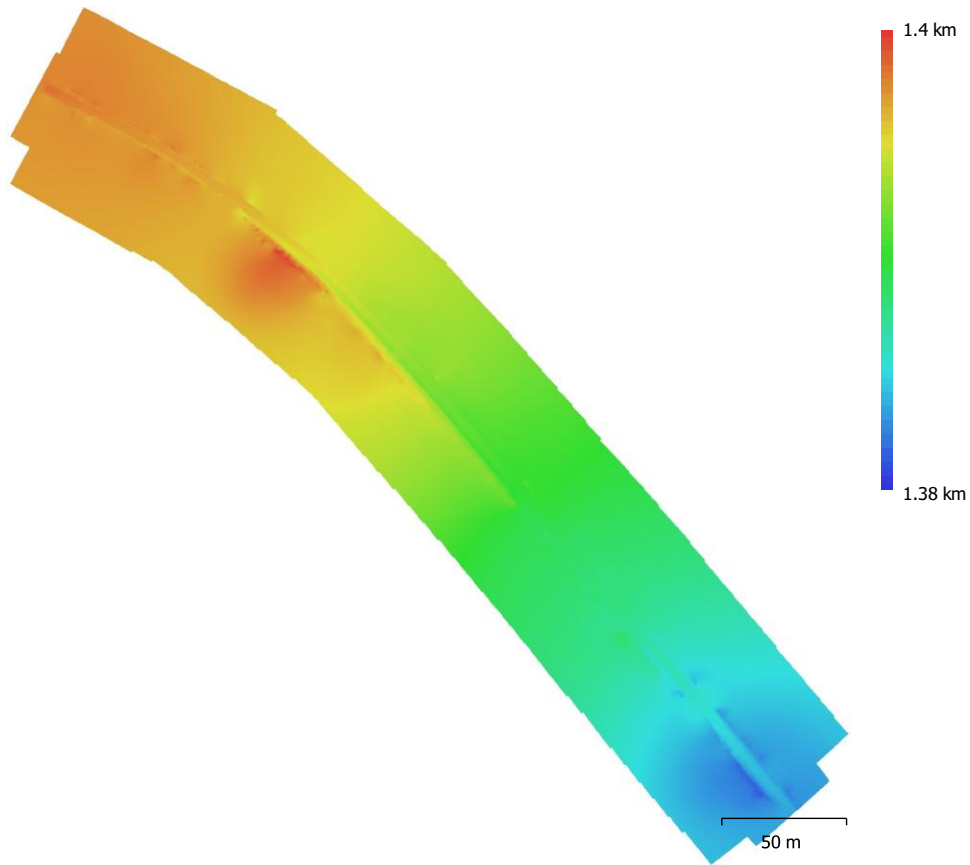


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 9.91 mm/pix
Densidad de puntos: 1.02 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	89
Cámaras orientadas	89
Marcadores	10
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	122,850 de 127,710
RMS error de reproyección	0.362258 (0.803079 pix)
Error de reproyección máximo	1.39125 (29.8288 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.65553 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	2.56278

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	1 minuto 24 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.28 GB
Tiempo de orientación	48 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	24.40 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	2 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	8.18 MB

Mapas de profundidad

Número	89
--------	----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	17 minutos 23 segundos
Uso de memoria	7.86 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	2.06 GB

Nube de puntos densa

Puntos	53,410,750
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	17 minutos 23 segundos
Uso de memoria	7.86 GB

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	32 minutos 50 segundos
Uso de memoria	10.36 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	5.92 GB

MDE

Tamaño	48,406 x 49,078
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	3 minutos 52 segundos
Uso de memoria	314.26 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	746.58 MB

Ortomosaico

Tamaño	33,931 x 34,711
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	4 minutos 33 segundos
Uso de memoria	6.04 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	2.62 GB

Sistema

Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Vuelo 8 (35 80 70)

Reporte de Procesamiento

19 May 2025



Datos del levantamiento

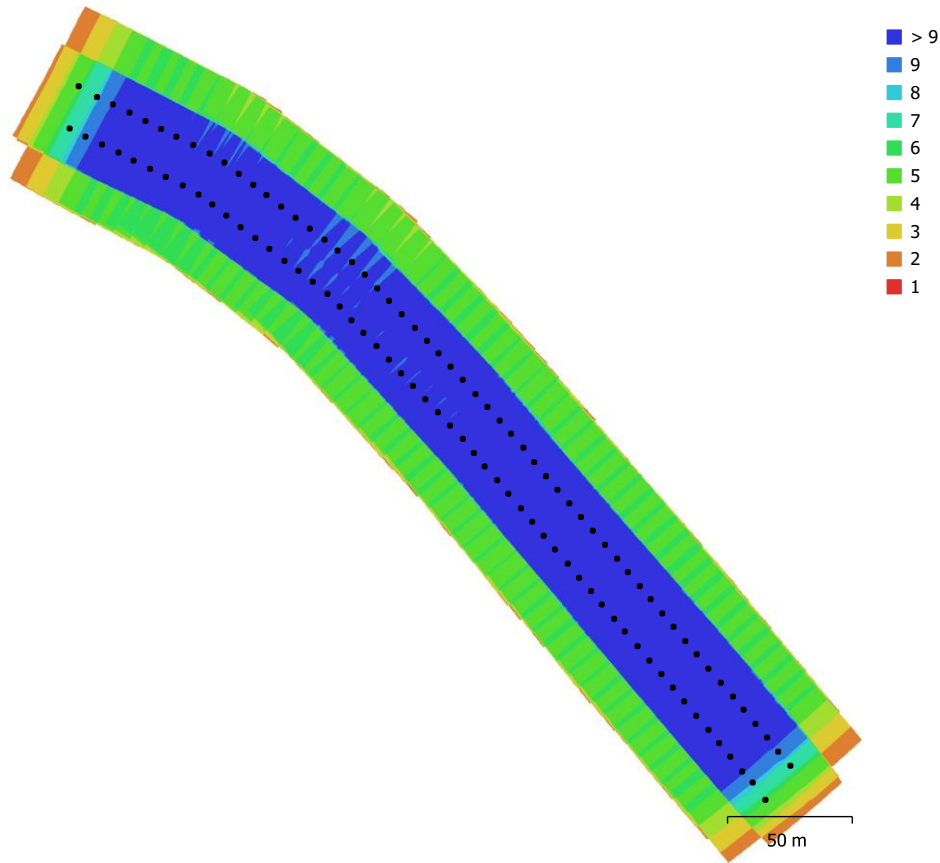


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 111	Imágenes alineadas: 111
Altitud media de vuelo: 44.1 m	Puntos de paso: 146,207
Resolución en terreno: 9.94 mm/pix	Proyecciones: 420,001
Área cubierta: 0.0315 km ²	Error de reproyección: 0.879 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

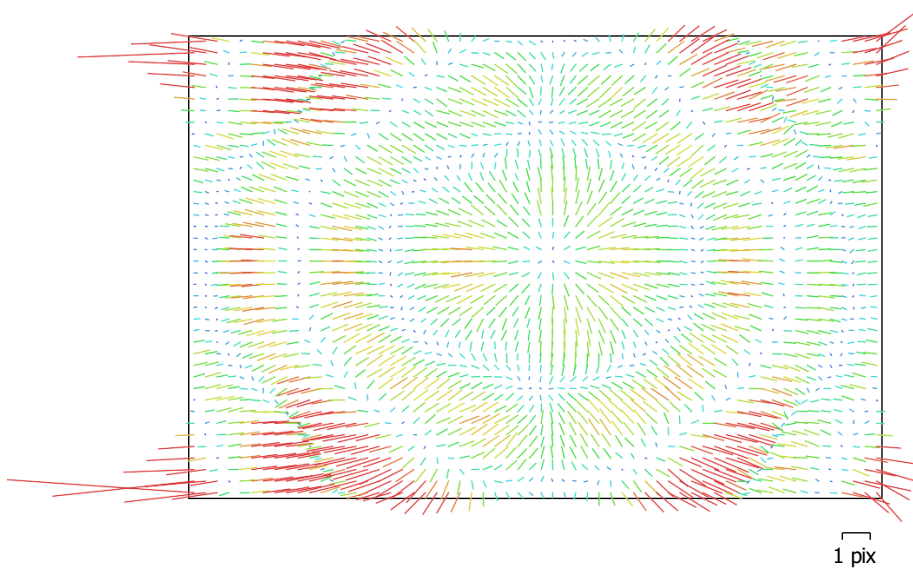


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

111 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3987.8	7	1.00	0.05	0.88	-0.98	0.95	-0.12	0.18	-0.62
Cx	20.2646	0.11		1.00	0.05	-0.06	0.07	-0.10	0.50	-0.02
Cy	7.10056	0.2			1.00	-0.86	0.84	-0.11	0.16	-0.30
K1	-0.101418	0.00037				1.00	-0.99	0.30	-0.20	0.61
K2	0.118736	0.00088					1.00	-0.41	0.20	-0.59
K3	-0.00279113	0.00027						1.00	-0.09	0.06
P1	0.00057585	5.9e-06							1.00	-0.11
P2	-3.67887e-05	7.3e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre



Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.492237	1.30532	0.216798	1.39505	1.41179

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.03544	1.66806	4.70371	1.96331	5.097

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP13	-0.575289	-1.40458	0.0287201	1.5181	1.277 (9)
GCP12	0.727411	2.04646	-0.200119	2.1811	1.299 (10)
GCP11	0.144772	0.152633	0.343036	0.402405	0.530 (10)
GCP10	-0.296894	-0.794513	-0.171637	0.865365	0.903 (10)
Total	0.492237	1.30532	0.216798	1.41179	1.044

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP12	0.831869	0.455283	1.07517	1.43363	1.020 (10)
CHP11	0.765356	1.47073	-3.77848	4.12623	0.744 (10)
CHP10	0.366088	1.31234	-2.98078	3.27739	0.989 (11)
CHP9	-1.6961	-2.65276	-8.01134	8.60787	0.745 (9)
Total	1.03544	1.66806	4.70371	5.097	0.890

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

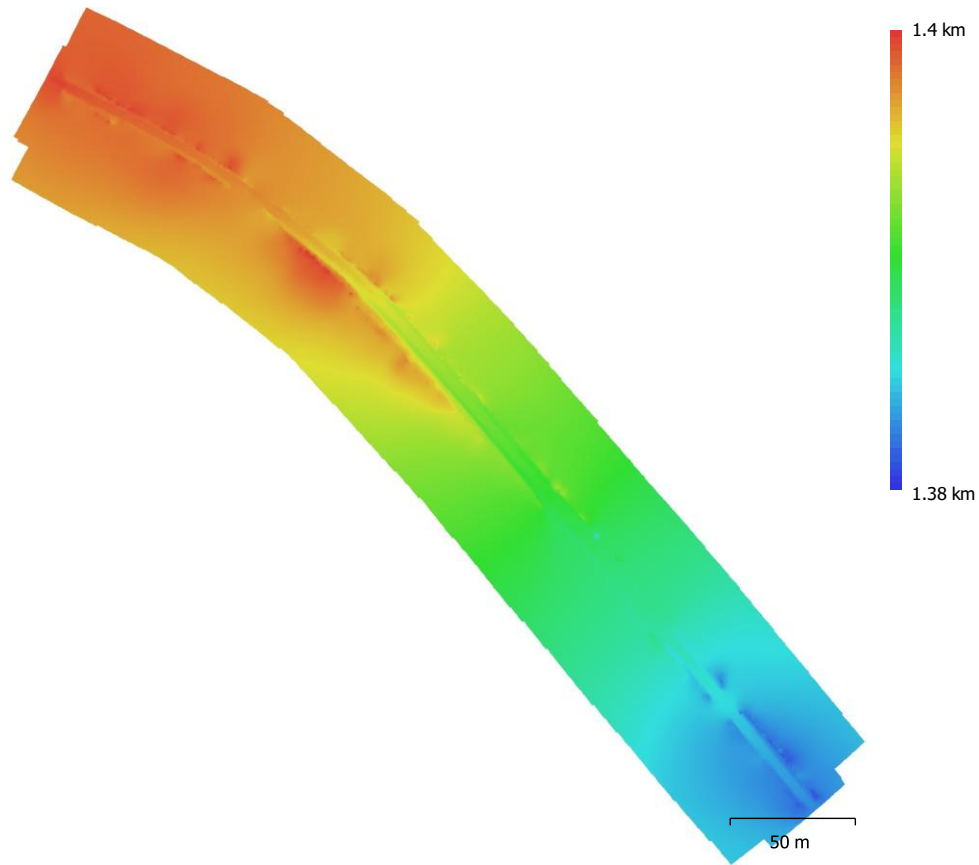


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 9.94 mm/pix
Densidad de puntos: 1.01 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	111
Cámaras orientadas	111
Marcadores	10
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	146,207 de 153,734
RMS error de reproyección	0.387706 (0.879089 pix)
Error de reproyección máximo	1.56353 (30.1688 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.51714 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	2.90102

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	1 minuto 49 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.29 GB
Tiempo de orientación	1 minuto 24 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	51.43 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	4 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	10.61 MB

Mapas de profundidad

Número	111
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	24 minutos 57 segundos
Uso de memoria	7.50 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	2.74 GB

Nube de puntos densa

Puntos	57,117,347
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	24 minutos 57 segundos
Uso de memoria	7.50 GB

Parámetros de generación de la nube densa	
Tiempo de procesamiento	43 minutos 5 segundos
Uso de memoria	10.84 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	6.08 GB
MDE	
Tamaño	49,398 x 49,716
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	3 minutos 52 segundos
Uso de memoria	282.67 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	763.65 MB
Ortomosaico	
Tamaño	34,303 x 34,457
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	5 minutos 20 segundos
Uso de memoria	6.88 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	3.30 GB
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Vuelo 9 (35 85 75)

Reporte de Procesamiento

19 May 2025



Datos del levantamiento

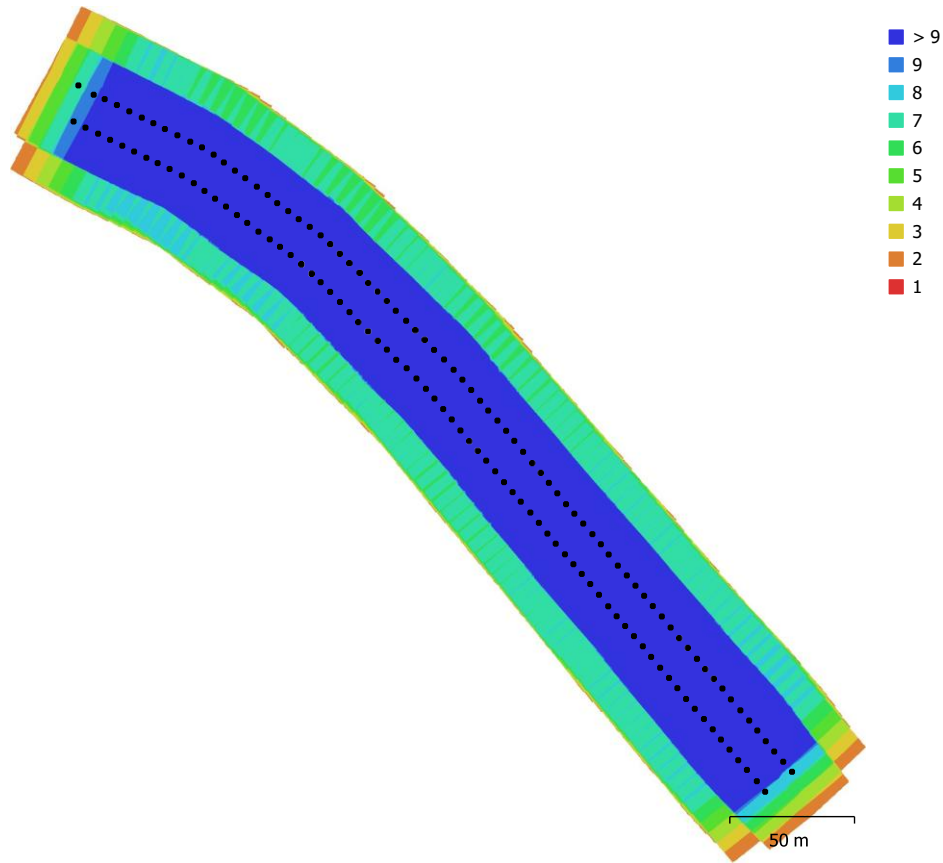


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 148	Imágenes alineadas: 148
Altitud media de vuelo: 43.6 m	Puntos de paso: 167,683
Resolución en terreno: 9.84 mm/pix	Proyecciones: 569,257
Área cubierta: 0.0306 km ²	Error de reproyección: 0.912 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

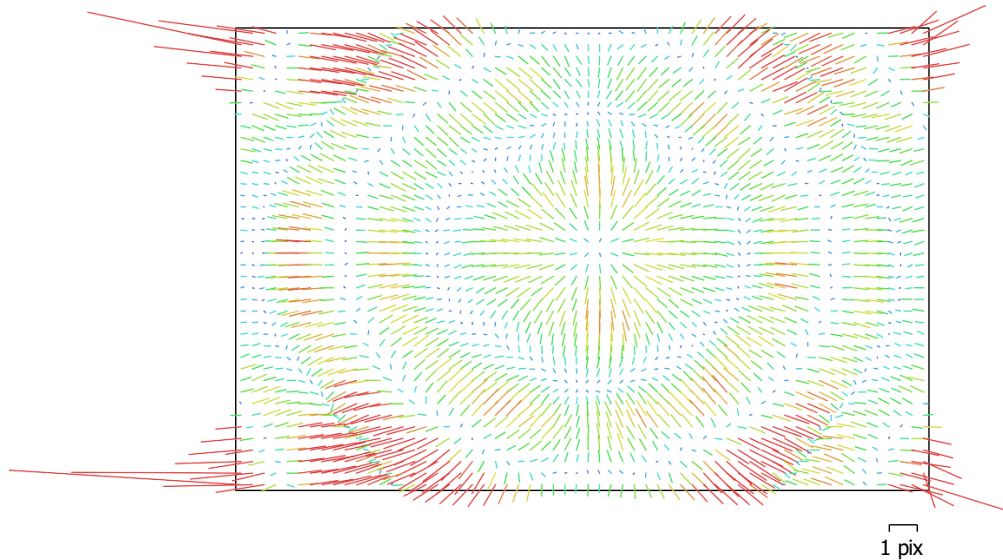


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

148 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3988.86	4.8	1.00	0.06	0.90	-0.97	0.92	0.23	0.13	-0.63
Cx	18.1068	0.08		1.00	0.06	-0.06	0.09	-0.08	0.58	-0.02
Cy	8.30941	0.16			1.00	-0.87	0.83	0.21	0.11	-0.34
K1	-0.0993724	0.00025				1.00	-0.98	-0.01	-0.15	0.61
K2	0.109667	0.00057					1.00	-0.15	0.14	-0.58
K3	0.00766436	0.00023						1.00	-0.02	-0.16
P1	0.000488513	4.5e-06							1.00	-0.07
P2	-9.87166e-05	5.2e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre



Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores. El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.298945	1.22953	0.507816	1.26535	1.36344

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.5164	1.84301	3.29217	1.91399	3.80812

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP13	-0.306911	-1.33357	0.190559	1.38163	1.369 (15)
GCP12	0.227172	1.86158	-0.61658	1.97415	0.883 (14)
GCP11	0.362741	0.31204	0.725005	0.868667	0.848 (14)
GCP10	-0.283002	-0.840053	-0.298984	0.935505	0.965 (14)
Total	0.298945	1.22953	0.507816	1.36344	1.044

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP12	0.0378291	0.226344	2.43935	2.45012	0.909 (14)
CHP11	0.825826	1.67862	-3.81701	4.2508	0.970 (14)
CHP10	0.278168	1.685	-1.10315	2.03311	0.651 (13)
CHP9	-0.553062	-2.80686	-4.64937	5.45903	0.695 (11)
Total	0.5164	1.84301	3.29217	3.80812	0.827

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

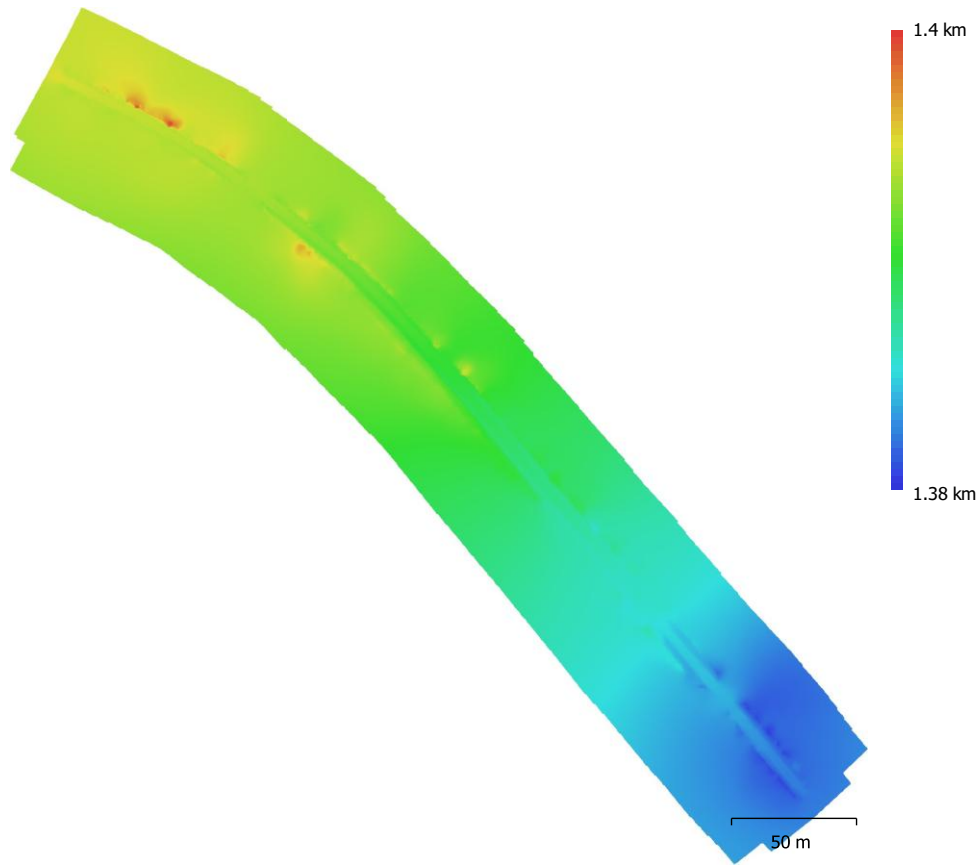


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 9.84 mm/pix
Densidad de puntos: 1.03 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	148
Cámaras orientadas	148
Marcadores	10
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	167,683 de 178,641
RMS error de reproyección	0.412505 (0.911631 pix)
Error de reproyección máximo	1.57471 (40.9836 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.32699 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	3.45526

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	2 minutos 34 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.30 GB
Tiempo de orientación	2 minutos 3 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	36.31 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	4 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	13.79 MB

Mapas de profundidad

Número	148
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	39 minutos 20 segundos
Uso de memoria	8.32 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	3.92 GB

Nube de puntos densa

Puntos	62,237,545
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	39 minutos 20 segundos
Uso de memoria	8.32 GB

Parámetros de generación de la nube densa	
Tiempo de procesamiento	1 hora 31 minutos
Uso de memoria	11.80 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	6.46 GB
MDE	
Tamaño	49,845 x 50,245
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	4 minutos 9 segundos
Uso de memoria	270.37 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	775.35 MB
Ortomosaico	
Tamaño	34,889 x 34,885
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	6 minutos 12 segundos
Uso de memoria	6.89 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	4.30 GB
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Apéndice 6.

Informes de la totalidad de vuelos en los 2 kilómetros de vía férrea.

VUELO 1

Reporte de Procesamiento

02 June 2025



Datos del levantamiento

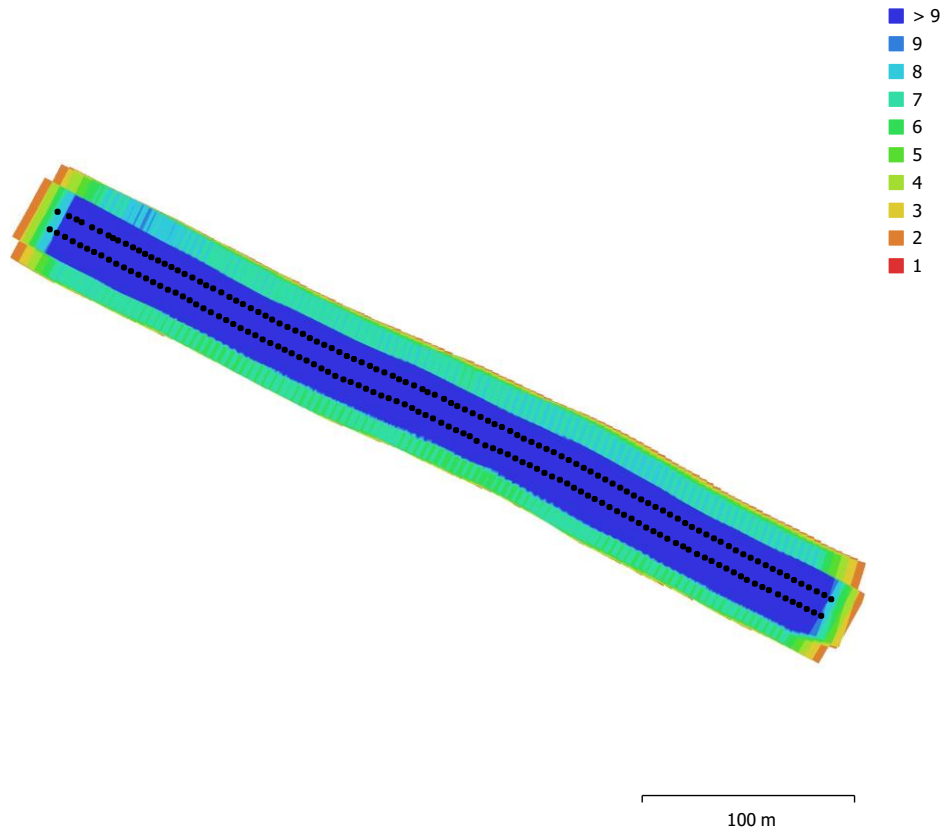


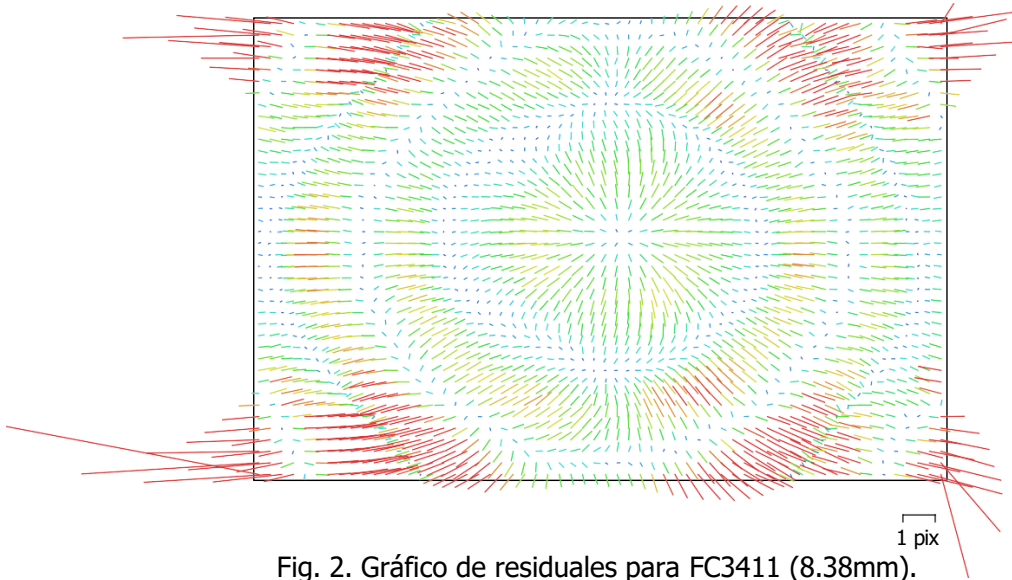
Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 213	Imágenes alineadas: 213
Altitud media de vuelo: 31 m	Puntos de paso: 255,535
Resolución en terreno: 6.91 mm/pix	Proyecciones: 796,593
Área cubierta: 0.0224 km ²	Error de reproyección: 0.783 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara



FC3411 (8.38mm)

213 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	4033.27	7.6	1.00	-0.26	0.90	-0.99	0.96	0.72	0.42	-0.59
Cx	19.7716	0.074		1.00	-0.25	0.23	-0.20	-0.31	0.26	0.12
Cy	3.12567	0.14			1.00	-0.89	0.87	0.65	0.35	-0.30
K1	-0.0981312	0.00037				1.00	-0.99	-0.62	-0.45	0.59
K2	0.102745	0.0008					1.00	0.51	0.45	-0.57
K3	0.0205866	0.00033						1.00	0.18	-0.43
P1	0.000781513	4.5e-06							1.00	-0.29
P2	4.75815e-05	5.2e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre



Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.26472	1.82032	1.63611	2.21654	2.75498

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	2.03208	0.711547	3.64125	2.15305	4.23017

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP2	0.316865	0.947281	1.13476	1.51176	0.765 (13)
GCP3	0.6386	0.201234	-2.60777	2.69235	0.755 (14)
GCP4	-2.12597	-2.98847	1.6124	4.00631	0.944 (14)
GCP5	1.1705	1.83995	-0.139383	2.18516	0.879 (14)
Total	1.26472	1.82032	1.63611	2.75498	0.841

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP1	2.00828	-1.32945	-4.89625	5.45655	0.994 (15)
CHP2	0.457911	0.343669	-4.78433	4.81846	0.983 (14)
CHP3	-1.49962	-0.364859	-1.84788	2.40762	0.819 (14)
CHP4	-3.16632	-0.0808647	-1.66049	3.57622	0.802 (14)
Total	2.03208	0.711547	3.64125	4.23017	0.905

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

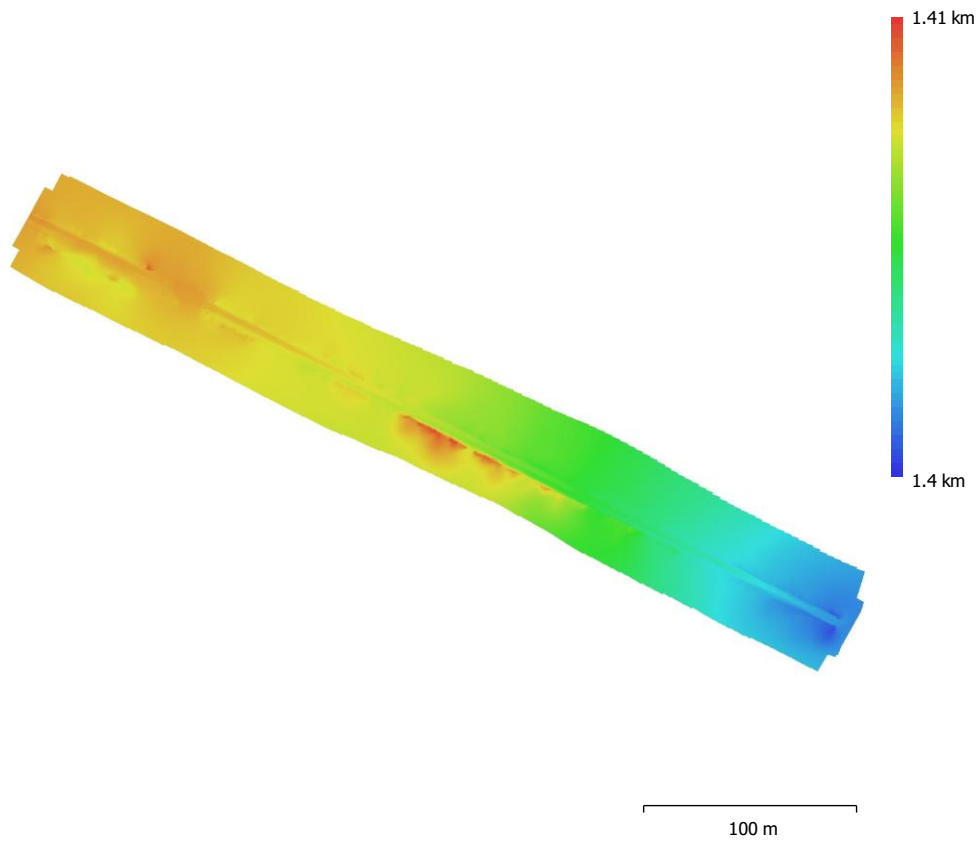


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 6.91 mm/pix
Densidad de puntos: 2.09 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	213
Cámaras orientadas	213
Marcadores	8
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	255,535 de 267,832
RMS error de reproyección	0.400535 (0.782541 pix)
Error de reproyección máximo	2.5244 (36.428 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.0788 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	3.18755

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	3 minutos 30 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.30 GB
Tiempo de orientación	2 minutos 47 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	63.05 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	1 segundo
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	19.67 MB

Mapas de profundidad

Número	213
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	51 minutos 40 segundos
Uso de memoria	8.41 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	5.01 GB

Nube de puntos densa

Puntos	92,828,189
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	51 minutos 40 segundos
Uso de memoria	8.41 GB

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	1 hora 10 minutos
Uso de memoria	11.46 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	9.18 GB

MDE

Tamaño	80,337 x 52,336
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	6 minutos 3 segundos
Uso de memoria	321.58 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	1006.76 MB

Ortomosaico

Tamaño	58,254 x 33,922
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	9 minutos 5 segundos
Uso de memoria	6.35 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	6.87 GB

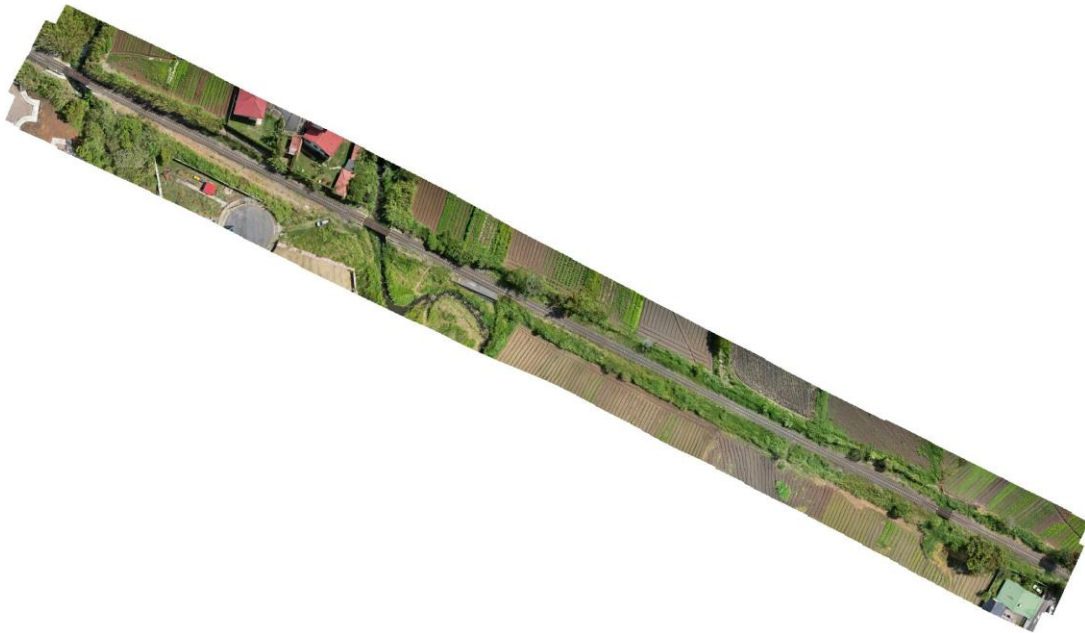
Sistema

Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902)
NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti	

VUELO 2

Reporte de Procesamiento

02 June 2025



Datos del levantamiento

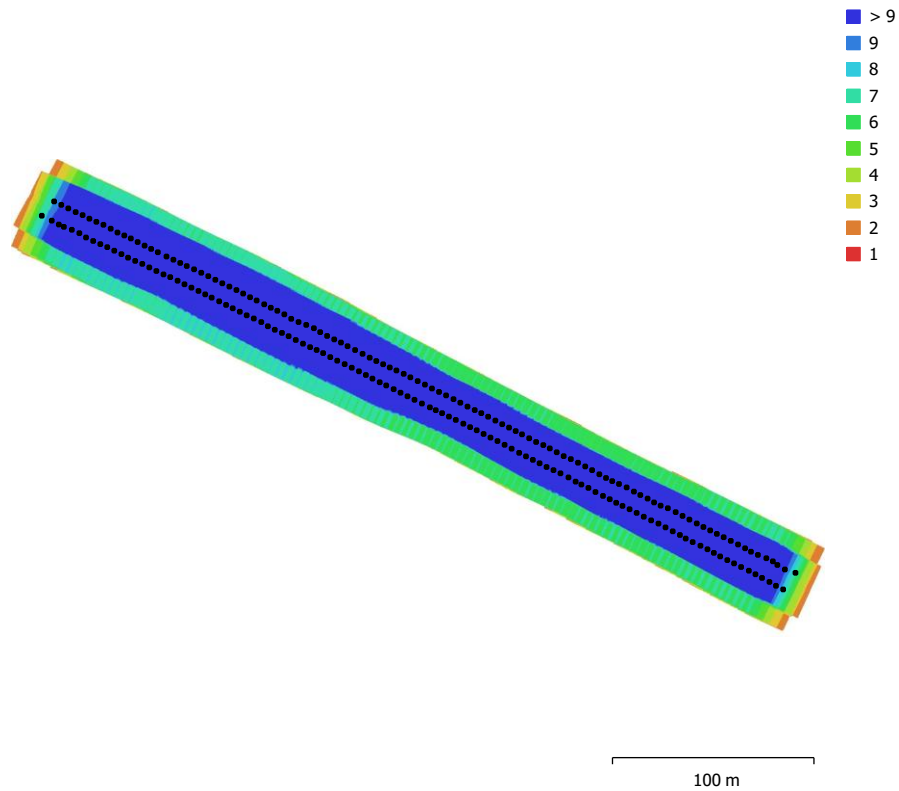


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes:	214	Imágenes alineadas:	214
Altitud media de vuelo:	28.8 m	Puntos de paso:	216,051
Resolución en terreno:	6.85 mm/pix	Proyecciones:	832,652
Área cubierta:	0.0204 km ²	Error de reproyección:	1.61 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

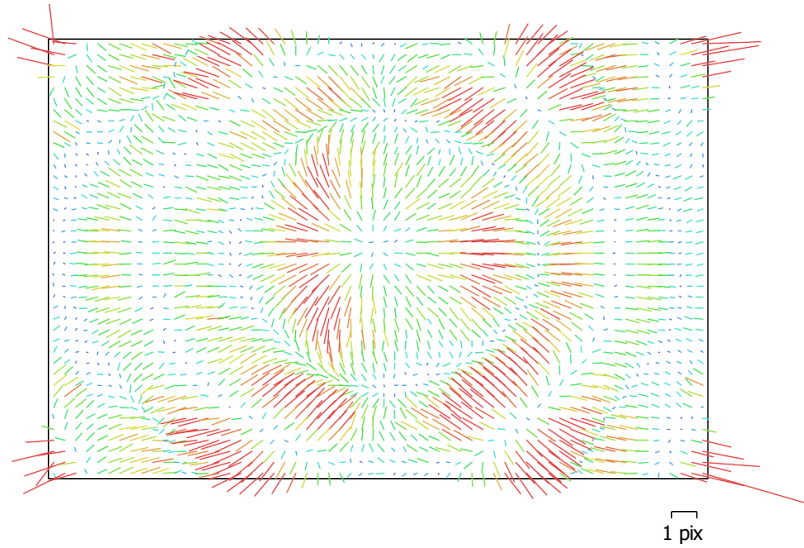


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

214 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3755.02	5.4	1.00	-0.36	0.93	-0.98	0.98	-0.92	0.01	-0.48
Cx	10.3356	0.084		1.00	-0.35	0.37	-0.38	0.37	0.47	0.15
Cy	0.493532	0.15			1.00	-0.91	0.91	-0.85	-0.00	-0.34
K1	-0.103626	0.00031				1.00	-1.00	0.97	0.03	0.47
K2	0.136143	0.00081					1.00	-0.98	-0.03	-0.47
K3	-0.0390332	0.00037						1.00	0.06	0.44
P1	-0.000203502	4.5e-06							1.00	-0.03
P2	-0.000105239	4.2e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

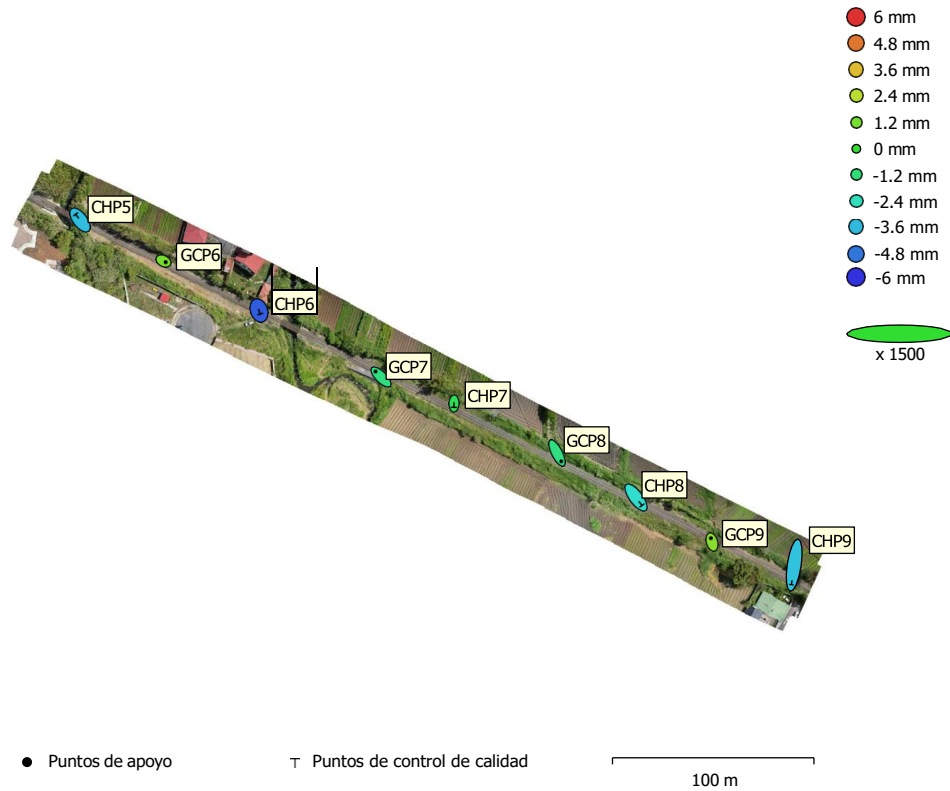


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores. El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Error en XY (mm)	Total (mm)
4	2.3144	3.39369	1.38804	4.10775	4.33592

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Error en XY (mm)	Total (mm)
5	2.27005	6.58835	3.45633	6.96846	7.77854

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
GCP6	1.30451	-0.707166	1.23265	1.92906	0.932 (14)
GCP7	-3.40874	3.46708	-1.39236	5.05755	0.805 (13)
GCP8	2.76831	-5.23607	-1.37545	6.08044	0.864 (12)
GCP9	-0.66408	2.47615	1.53515	2.98814	1.193 (13)
Total	2.3144	3.39369	1.38804	4.33592	0.961

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
CHP5	-2.80199	3.65075	-3.56111	5.81899	0.974 (14)
CHP6	0.751904	-2.24657	-5.22999	5.74153	0.780 (14)
CHP7	-0.071165	-2.52484	-0.643497	2.60653	0.839 (13)
CHP8	3.70902	-5.10055	-2.70812	6.86341	1.010 (13)
CHP9	-1.89399	-12.8944	-3.45673	13.4834	0.640 (6)
Total	2.27005	6.58835	3.45633	7.77854	0.882

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

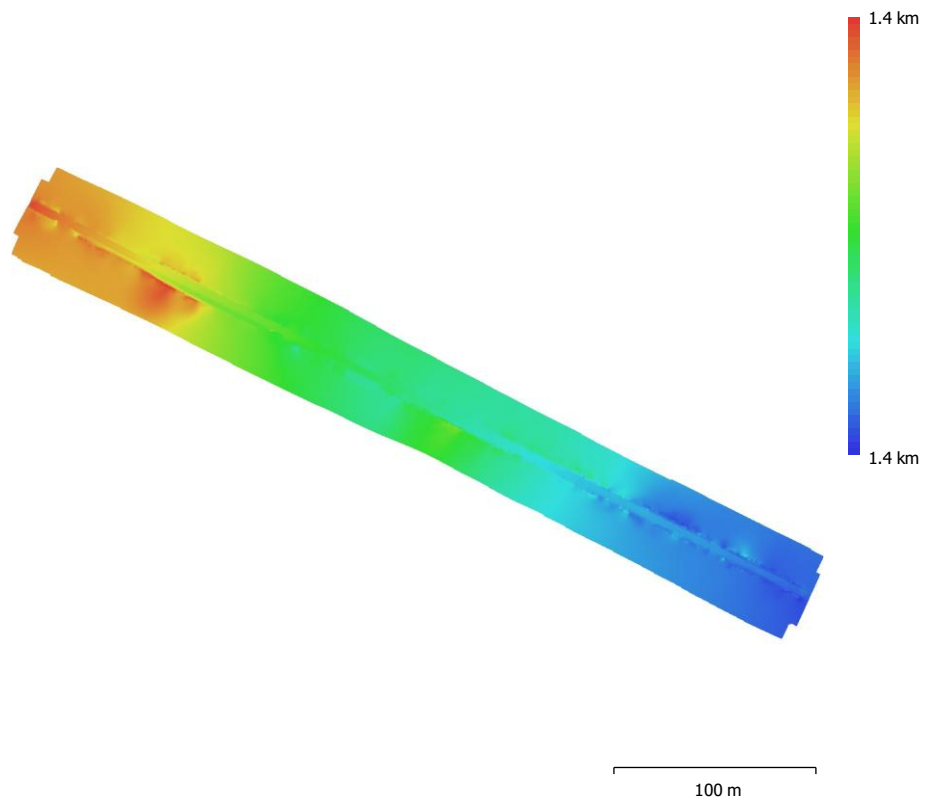


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 6.85 mm/pix
Densidad de puntos: 2.13 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	214
Cámaras orientadas	214
Marcadores	9
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	216,051 de 230,243
RMS error de reproyección	0.190823 (1.60755 pix)
Error de reproyección máximo	0.660389 (54.9397 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	7.59376 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	3.96555

Parámetros de orientación

Precisión	Media
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	1 minuto 21 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	351.20 MB
Tiempo de orientación	2 minutos 21 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	122.67 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	3 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	19.56 MB

Mapas de profundidad

Número	214
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	42 minutos 7 segundos
Uso de memoria	7.61 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	5.48 GB

Nube de puntos densa

Puntos	124,701,151
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	42 minutos 7 segundos
Uso de memoria	7.61 GB

Parámetros de generación de la nube densa	
Tiempo de procesamiento	52 minutos 27 segundos
Uso de memoria	13.99 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	9.17 GB
MDE	
Tamaño	85,338 x 53,766
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	7 minutos 12 segundos
Uso de memoria	471.80 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	940.46 MB
Ortomosaico	
Tamaño	58,967 x 34,172
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	9 minutos 21 segundos
Uso de memoria	6.64 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	7.01 GB
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

VUELO 3

Reporte de Procesamiento

02 June 2025



Datos del levantamiento

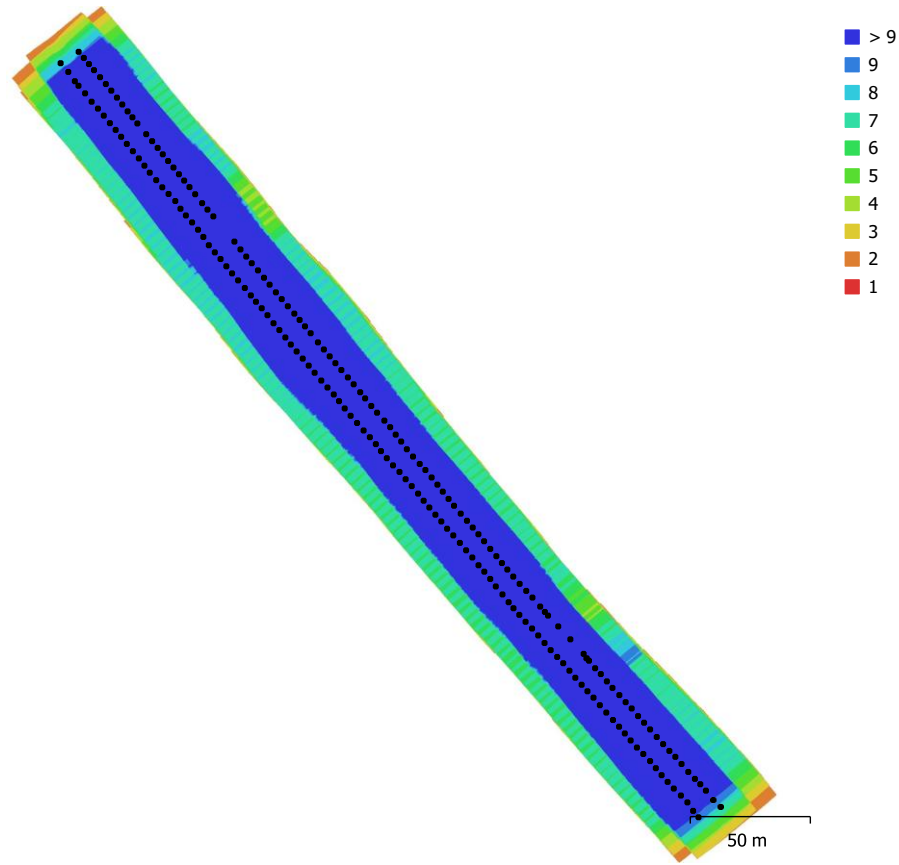


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 213	Imágenes alineadas: 213
Altitud media de vuelo: 31.2 m	Puntos de paso: 238,104
Resolución en terreno: 7.11 mm/pix	Proyecciones: 856,543
Área cubierta: 0.0212 km ²	Error de reproyección: 0.814 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

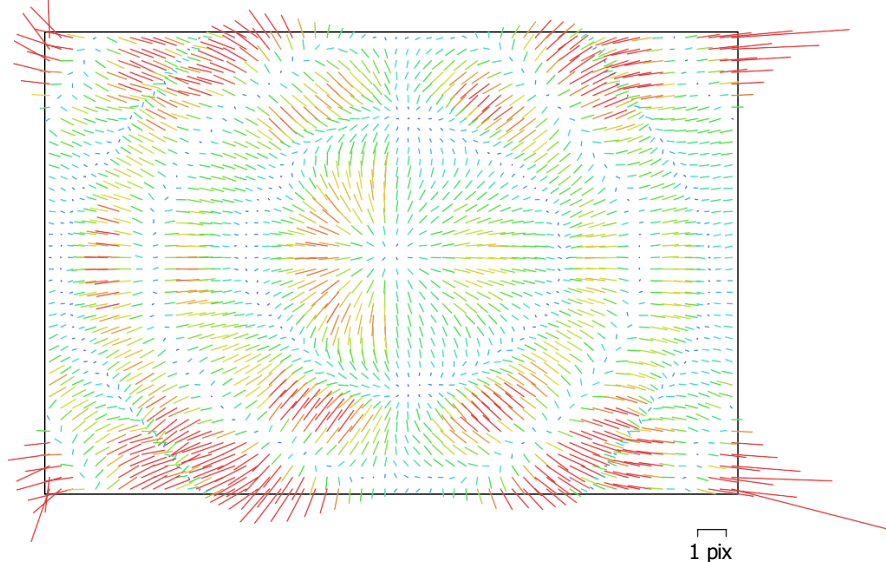


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

213 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	4025.2	4.2	1.00	-0.02	0.92	-0.98	0.96	-0.51	0.04	-0.59
Cx	12.9964	0.065		1.00	-0.02	0.05	-0.06	0.13	0.31	0.00
Cy	9.22479	0.13			1.00	-0.90	0.88	-0.47	0.01	-0.46
K1	-0.107654	0.00023				1.00	-0.99	0.66	-0.00	0.58
K2	0.138655	0.0006					1.00	-0.73	-0.01	-0.56
K3	-0.0171377	0.00021						1.00	0.10	0.29
P1	-2.48924e-05	3.5e-06							1.00	-0.06
P2	-0.000172232	3.6e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

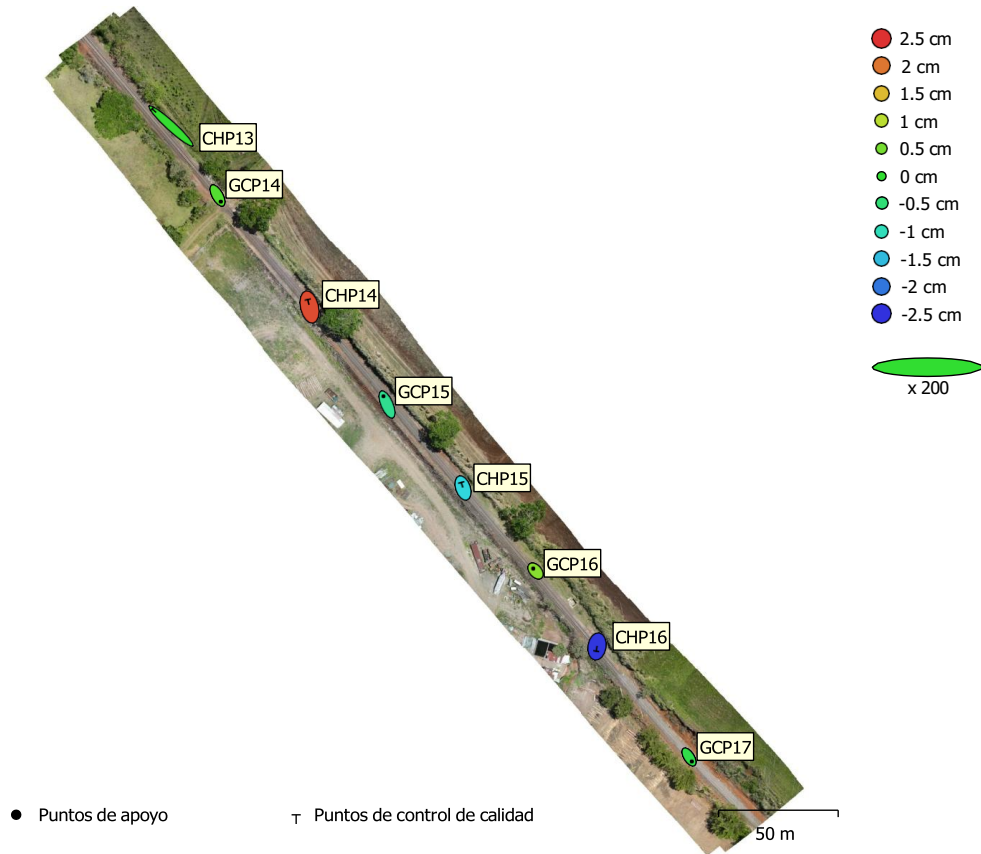


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.15379	2.3322	0.490048	2.60199	2.64774

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	3.94544	4.13107	1.80679	5.71247	5.99139

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP14	1.20935	-2.51469	0.249698	2.80153	0.695 (15)
GCP15	-1.39397	3.37943	-0.692738	3.7207	0.805 (14)
GCP16	-0.882928	0.916421	0.621652	1.41628	0.710 (12)
GCP17	1.06754	-1.78116	-0.178612	2.08425	0.832 (13)
Total	1.15379	2.3322	0.490048	2.64774	0.762

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP13	-7.82493	7.0737	0.0329217	10.5484	0.885 (14)
CHP14	-0.688086	3.03599	2.30874	3.87569	0.929 (15)
CHP15	-0.682021	2.30027	-1.29952	2.72858	0.484 (12)
CHP16	-0.312865	-1.92806	-2.4572	3.13897	1.787 (13)
Total	3.94544	4.13107	1.80679	5.99139	1.124

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

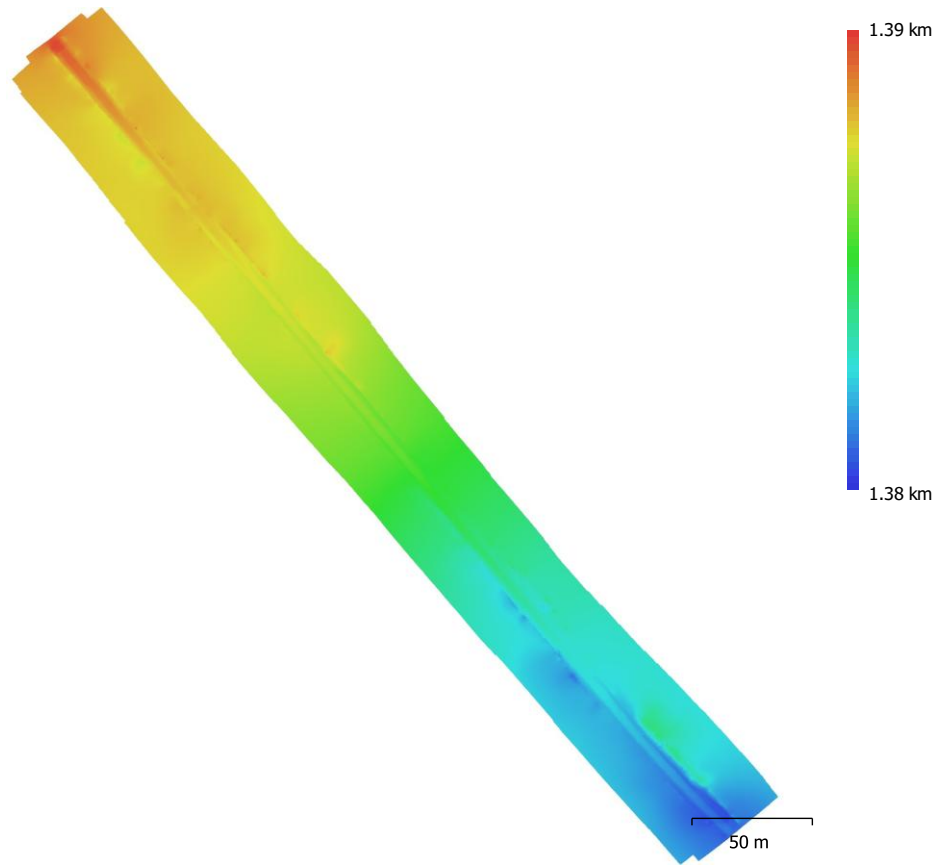


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 7.11 mm/pix
Densidad de puntos: 1.98 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	213
Cámaras orientadas	213
Marcadores	8
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	238,104 de 249,706
RMS error de reproyección	0.45623 (0.814409 pix)
Error de reproyección máximo	1.56599 (33.9055 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	1.84486 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	3.65232

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	3 minutos 47 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.28 GB
Tiempo de orientación	2 minutos 39 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	49.12 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	5 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	20.11 MB

Mapas de profundidad

Número	213
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	54 minutos 38 segundos
Uso de memoria	8.30 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	6.06 GB

Nube de puntos densa

Puntos	107,425,133
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	54 minutos 38 segundos
Uso de memoria	8.30 GB

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	1 hora 12 minutos
Uso de memoria	10.77 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	8.47 GB

MDE

Tamaño	66,092 x 73,453
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	6 minutos 54 segundos
Uso de memoria	429.33 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	943.70 MB

Ortomosaico

Tamaño	44,659 x 50,008
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	8 minutos 25 segundos
Uso de memoria	7.33 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	6.47 GB

Sistema

Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

VUELO 4

Reporte de Procesamiento

04 June 2025



Datos del levantamiento

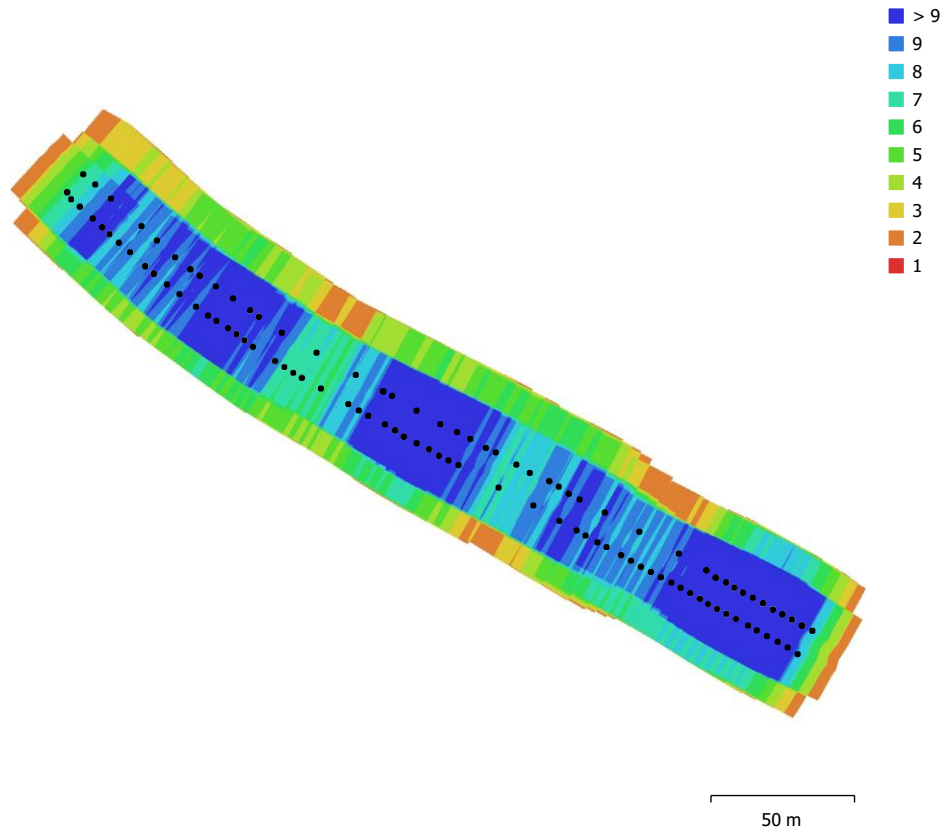


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 106	Imágenes alineadas: 106
Altitud media de vuelo: 34.7 m	Puntos de paso: 123,495
Resolución en terreno: 7.81 mm/pix	Proyecciones: 332,535
Área cubierta: 0.0177 km ²	Error de reproyección: 0.743 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

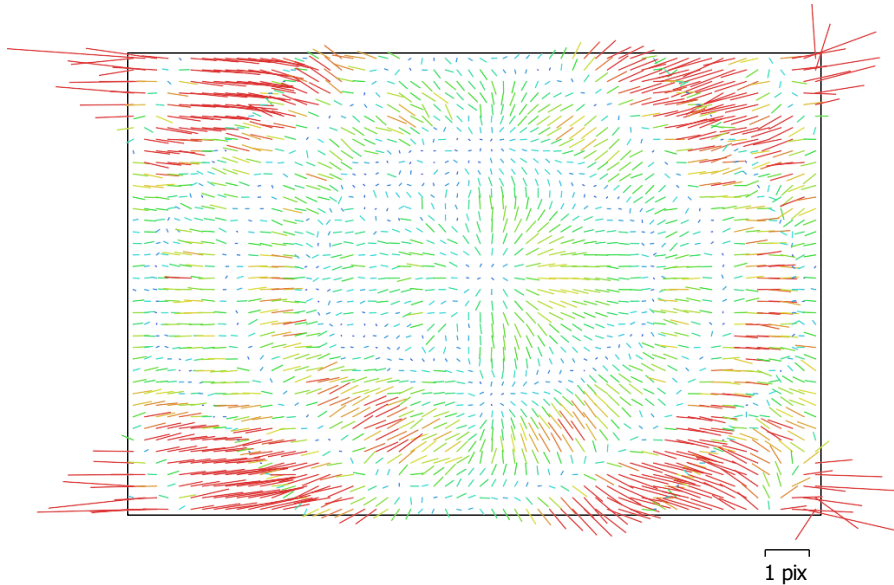


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

106 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	4144.74	11	1.00	-0.08	0.90	-0.98	0.92	0.76	0.28	-0.56
Cx	25.7415	0.19		1.00	-0.07	0.04	0.01	-0.18	-0.03	0.09
Cy	10.611	0.31			1.00	-0.88	0.82	0.68	0.24	-0.44
K1	-0.0987963	0.00052				1.00	-0.97	-0.62	-0.32	0.55
K2	0.0986853	0.0011					1.00	0.44	0.32	-0.51
K3	0.0379189	0.00079						1.00	0.13	-0.43
P1	0.000739342	8.6e-06							1.00	-0.18
P2	-0.000410217	1.2e-05								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

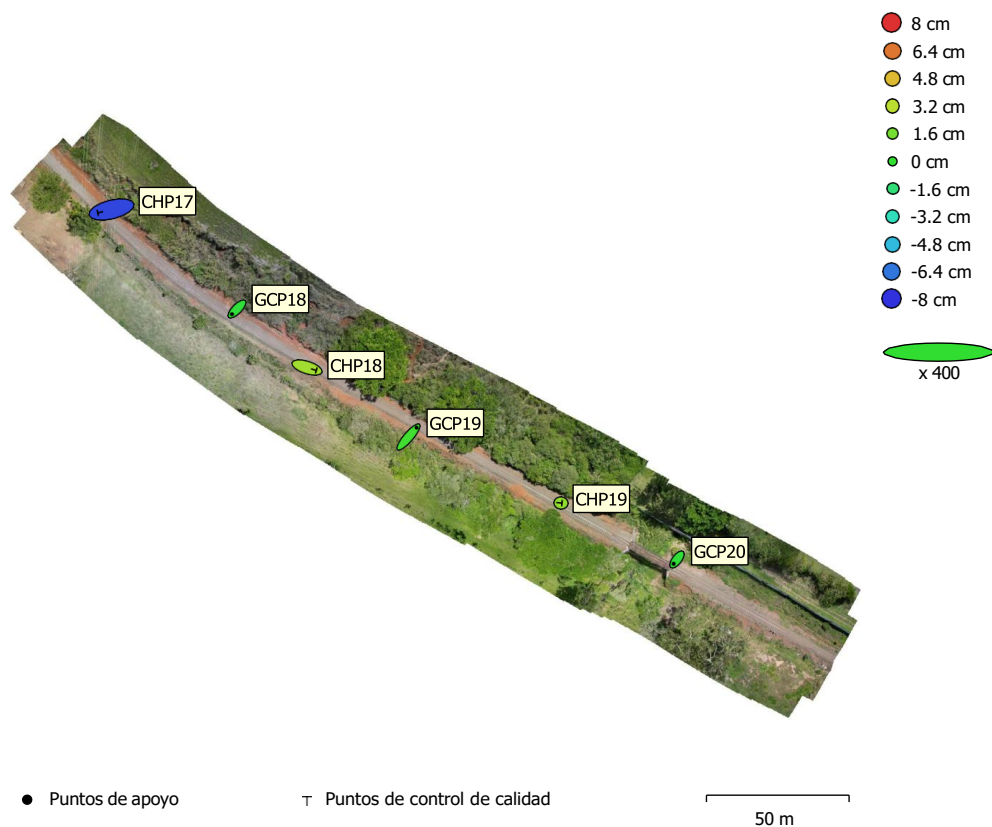


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
3	0.998756	1.12477	0.25109	1.5042	1.52501

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
3	1.62506	0.422836	4.77788	1.67917	5.06436

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP18	-0.831085	-0.887277	-0.200728	1.23217	0.921 (11)
GCP19	1.4046	1.58697	0.354038	2.14866	0.742 (10)
GCP20	-0.57352	-0.699694	-0.15331	0.917606	0.966 (10)
Total	0.998756	1.12477	0.25109	1.52501	0.883

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP17	-2.32465	-0.546649	-7.5081	7.87873	1.075 (7)
CHP18	1.57954	-0.487184	2.63852	3.11353	0.765 (7)
CHP19	0.153443	-0.0141158	2.26959	2.27482	0.580 (10)
Total	1.62506	0.422836	4.77788	5.06436	0.805

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

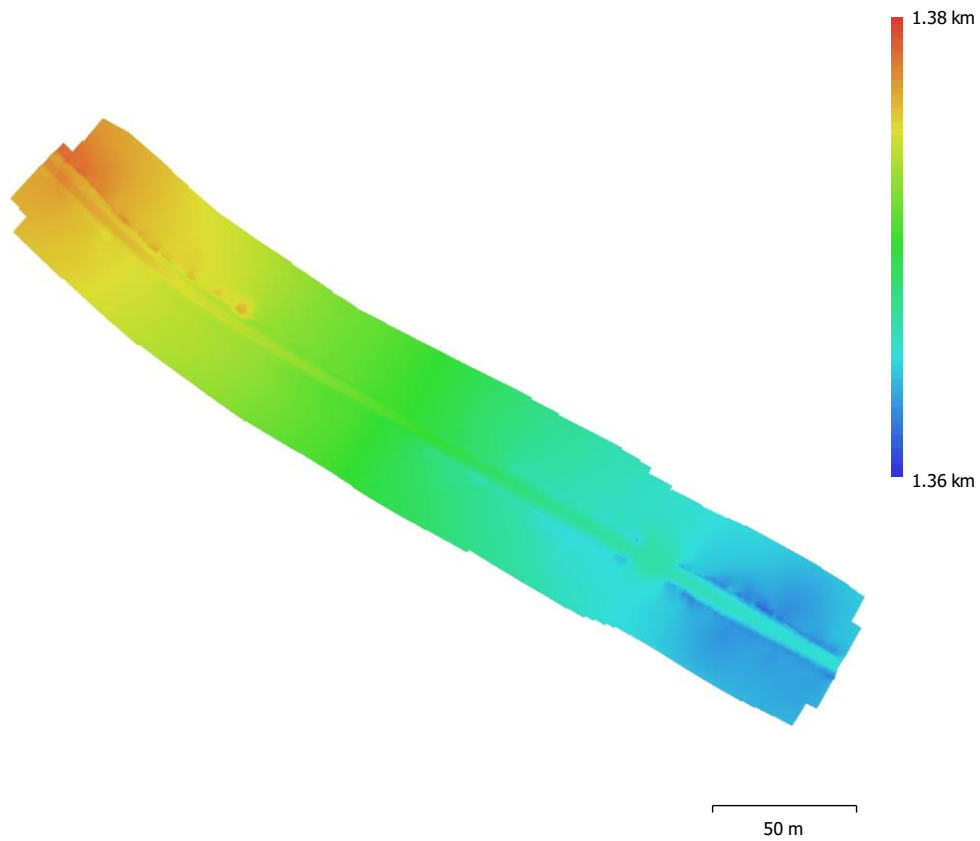


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 7.81 mm/pix
Densidad de puntos: 1.64 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	106
Cámaras orientadas	106
Marcadores	6
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	123,495 de 129,710
RMS error de reproyección	0.351914 (0.742584 pix)
Error de reproyección máximo	1.80813 (25.94 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.17379 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	2.74173

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	1 minuto 44 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.30 GB
Tiempo de orientación	56 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	18.80 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	6 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	8.64 MB

Mapas de profundidad

Número	106
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	21 minutos 16 segundos
Uso de memoria	8.16 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	2.25 GB

Nube de puntos densa

Puntos	66,621,441
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	21 minutos 16 segundos
Uso de memoria	8.16 GB

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	26 minutos 41 segundos
Uso de memoria	10.67 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	5.11 GB

MDE

Tamaño	56,086 x 38,079
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	3 minutos 53 segundos
Uso de memoria	350.97 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	719.85 MB

Ortomosaico

Tamaño	38,155 x 27,126
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	4 minutos 26 segundos
Uso de memoria	6.32 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	3.44 GB

Sistema

Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

VUELO 5

Reporte de Procesamiento

02 June 2025



Datos del levantamiento

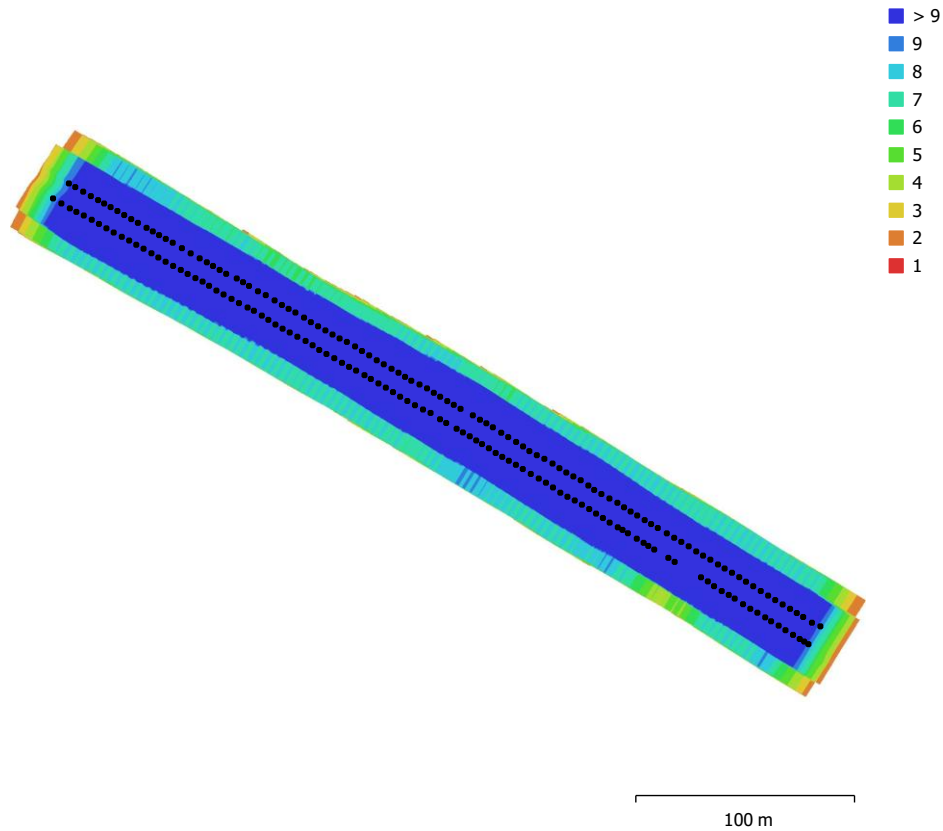


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 207	Imágenes alineadas: 207
Altitud media de vuelo: 33.2 m	Puntos de paso: 191,990
Resolución en terreno: 7.58 mm/pix	Proyecciones: 816,970
Área cubierta: 0.022 km ²	Error de reproyección: 0.878 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC3411 (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

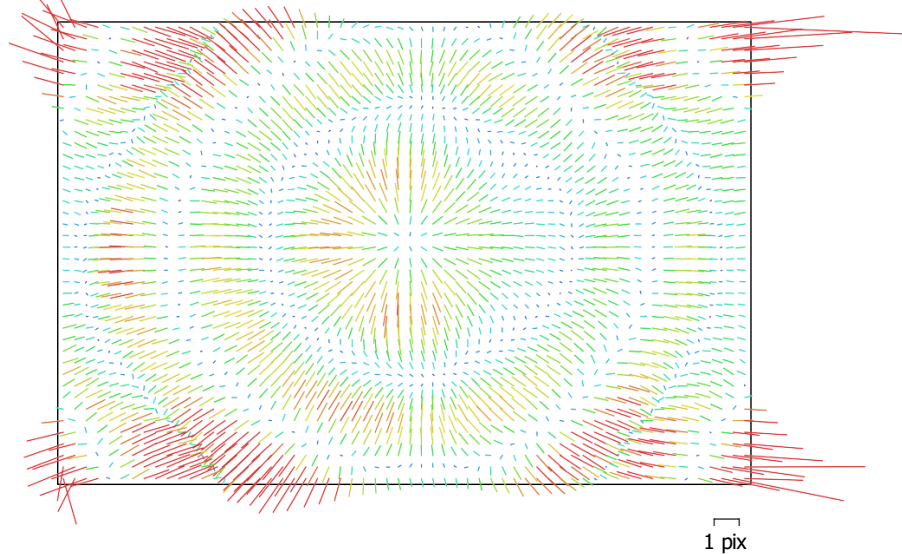


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC3411 (8.38mm).

FC3411 (8.38mm)

207 imágenes

Tipo
Cuadro

Resolución
5472 x 3648

Distancia focal
8.38 mm

Tamaño de píxel
2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	4038.47	3.9	1.00	-0.20	0.90	-0.97	0.92	0.61	0.18	-0.65
Cx	13.9241	0.068		1.00	-0.20	0.23	-0.24	-0.02	0.31	0.13
Cy	9.79504	0.12			1.00	-0.87	0.82	0.54	0.15	-0.47
K1	-0.100276	0.0002				1.00	-0.98	-0.43	-0.15	0.64
K2	0.103123	0.00044					1.00	0.24	0.15	-0.59
K3	0.0252049	0.00024						1.00	0.12	-0.41
P1	0.000358434	3.1e-06							1.00	-0.15
P2	-0.000182018	3.4e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

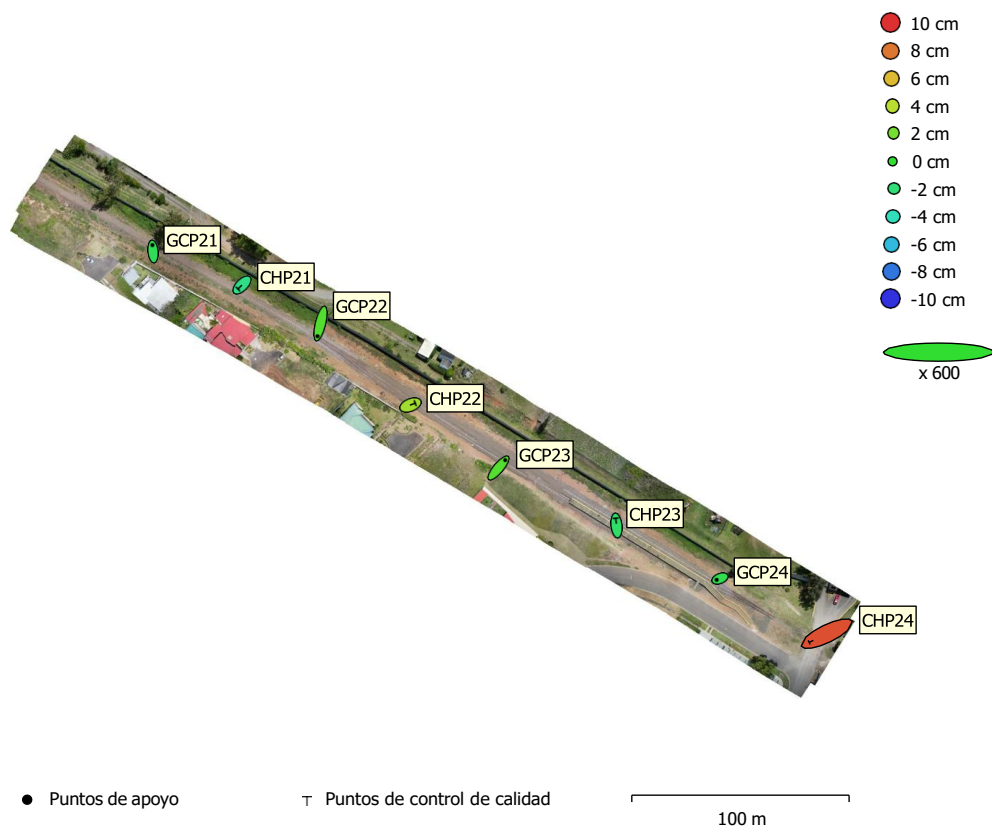


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.606738	1.20513	1.00857	1.34925	1.68454

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	1.43322	0.907856	5.07482	1.69656	5.3509

Tabla 4. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
GCP21	-0.089266	0.927449	-1.08442	1.42972	0.640 (15)
GCP22	-0.434672	-1.88835	0.98076	2.17179	0.552 (14)
GCP23	1.01641	1.1593	1.03306	1.85588	0.971 (15)
GCP24	-0.492471	-0.198401	-0.929395	1.07036	0.681 (13)
Total	0.606738	1.20513	1.00857	1.68454	0.732

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
CHP21	-0.589689	-0.581749	-2.48347	2.61798	0.734 (14)
CHP22	0.683658	0.262032	3.26965	3.35063	0.693 (15)
CHP23	-0.110021	1.06864	-1.59896	1.92633	1.047 (15)
CHP24	-2.71832	-1.32202	9.14331	9.63002	1.592 (8)
Total	1.43322	0.907856	5.07482	5.3509	0.995

Tabla 6. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

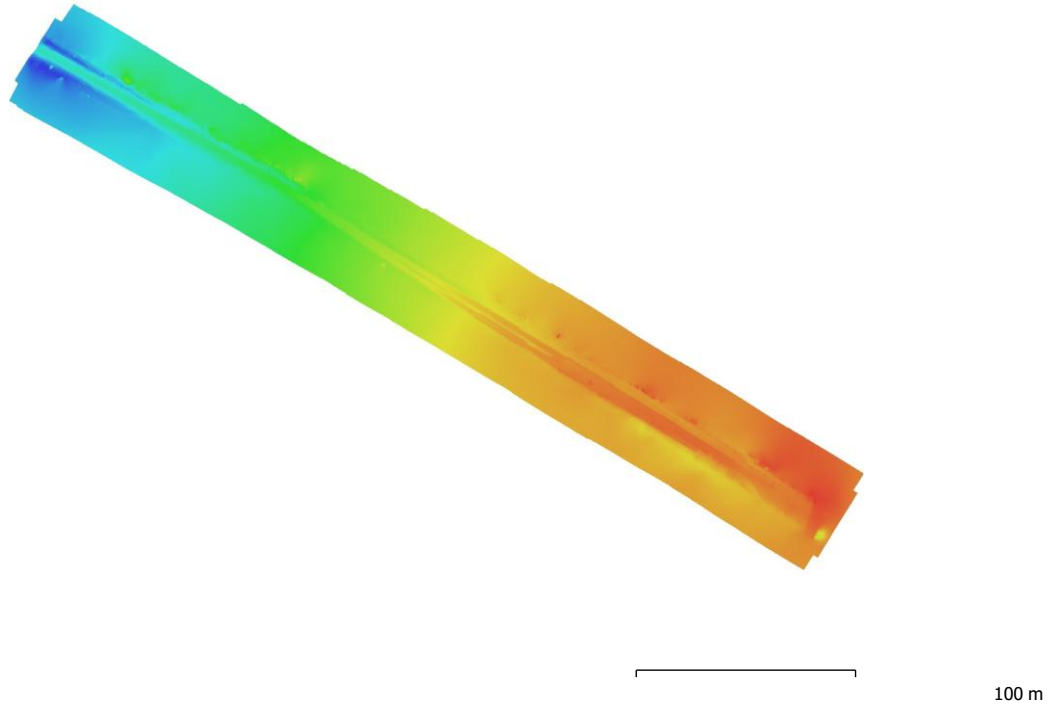


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 7.58 mm/pix Densidad de puntos:
1.74 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	207
Cámaras orientadas	207
Marcadores	8
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	191,990 de 204,015
RMS error de reproyección	0.467307 (0.878323 pix)
Error de reproyección máximo	1.99167 (46.1753 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	1.93935 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	4.34808

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Exclude stationary tie points	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	2 minutos 13 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	423.69 MB
Tiempo de orientación	1 minuto 47 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	65.52 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	2 segundos
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	18.54 MB

Mapas de profundidad

Número	207
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	33 minutos 30 segundos
Uso de memoria	6.71 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	6.14 GB

Nube de puntos densa

Puntos	146,246,476
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	33 minutos 30 segundos
Uso de memoria	6.71 GB

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	1 hora 0 minutos
Uso de memoria	14.50 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	7.37 GB

MDE

Tamaño	71,570 x 49,880
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	5 minutos 37 segundos
Uso de memoria	447.21 MB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	837.43 MB

Ortomosaico

Tamaño	51,617 x 34,144
Sistema de coordenadas	CR05 / CRTM05 (EPSG::5367)
Colores	3 bandas, uint8

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	8 minutos 2 segundos
Uso de memoria	6.67 GB
Versión del programa	1.7.0.11701
Tamaño de archivo	5.39 GB

Sistema

Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.36 GB
CPU	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
GPU(s)	AMD Radeon(TM) Graphics (gfx902) NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti

Apéndice 7.

Datos y errores obtenidos de los vuelos en el tramo experimental.

Vuelo 1						
CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (x) (m)	Norte (y) (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,847	1090045,290	1395,766
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,752	1089993,186	1394,695
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,465	1089918,927	1391,632
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,633	1089840,562	1388,545

Vuelo 2						
CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,824	1090045,250	1395,705
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,743	1089993,187	1394,710
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,444	1089918,906	1391,646
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,625	1089840,553	1388,581

Vuelo 3						
CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,847	1090045,284	1395,720
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,735	1089993,187	1394,666
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,462	1089918,941	1391,597
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,632	1089840,560	1388,566

Vuelo 4						
CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,839	1090045,286	1395,698
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,730	1089993,186	1394,679
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,461	1089918,939	1391,637
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,609	1089840,543	1388,557

Vuelo 5						
CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,842	1090045,286	1395,722
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,722	1089993,201	1394,686
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,466	1089918,934	1391,616
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,621	1089840,548	1388,553

Vuelo 6						
CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,853	1090045,291	1395,741
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,734	1089993,187	1394,667
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,456	1089918,930	1391,609
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,617	1089840,554	1388,561

Vuelo 7						
CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,829	1090045,265	1395,717
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,724	1089993,190	1394,669
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,462	1089918,935	1391,598
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,622	1089840,548	1388,554

Vuelo 8						
CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,820	1090045,275	1395,654
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,721	1089993,164	1394,669
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,475	1089918,959	1391,605
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,637	1089840,553	1388,550

Vuelo 9						
CHP	Estación Total		Nivelación	Levantamiento con RPAS		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	511105,837	1090045,302	1395,734	511105,831	1090045,279	1395,688
10	511189,717	1089993,177	1394,698	511189,745	1089993,194	1394,687
11	511260,467	1089918,944	1391,643	511260,476	1089918,961	1391,605
12	511324,629	1089840,549	1388,539	511324,629	1089840,551	1388,564

CHP	Errores del Vuelo 1		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	0,010	-0,012	0,032
10	0,035	0,009	-0,004
11	-0,002	-0,017	-0,011
12	0,004	0,013	0,006

CHP	Errores del Vuelo 2		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	-0,013	-0,051	-0,030
10	0,026	0,009	0,012
11	-0,023	-0,038	0,003
12	-0,004	0,004	0,042

CHP	Errores del Vuelo 3		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	0,010	-0,018	-0,014
10	0,018	0,010	-0,032
11	-0,005	-0,003	-0,046
12	0,003	0,011	0,027

CHP	Errores del Vuelo 4		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	0,002	-0,016	-0,037
10	0,013	0,009	-0,020
11	-0,006	-0,005	-0,006
12	-0,020	-0,006	0,018

CHP	Errores del Vuelo 5		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	0,005	-0,016	-0,012
10	0,005	0,024	-0,012
11	-0,001	-0,010	-0,027
12	-0,008	0,000	0,014

CHP	Errores del Vuelo 6		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	0,016	-0,011	0,006
10	0,017	0,010	-0,032
11	-0,012	-0,014	-0,034
12	-0,012	0,006	0,022

CHP	Errores del Vuelo 7		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	-0,008	-0,037	-0,017
10	0,007	0,013	-0,030
11	-0,005	-0,009	-0,045
12	-0,007	-0,001	0,015

CHP	Errores del Vuelo 8		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	-0,017	-0,027	-0,080
10	0,004	-0,013	-0,030
11	0,008	0,015	-0,038
12	0,008	0,005	0,011

CHP	Errores del Vuelo 9		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
9	-0,006	-0,023	-0,046
10	0,028	0,017	-0,011
11	0,008	0,017	-0,038
12	0,000	0,002	0,024

Apéndice 8.

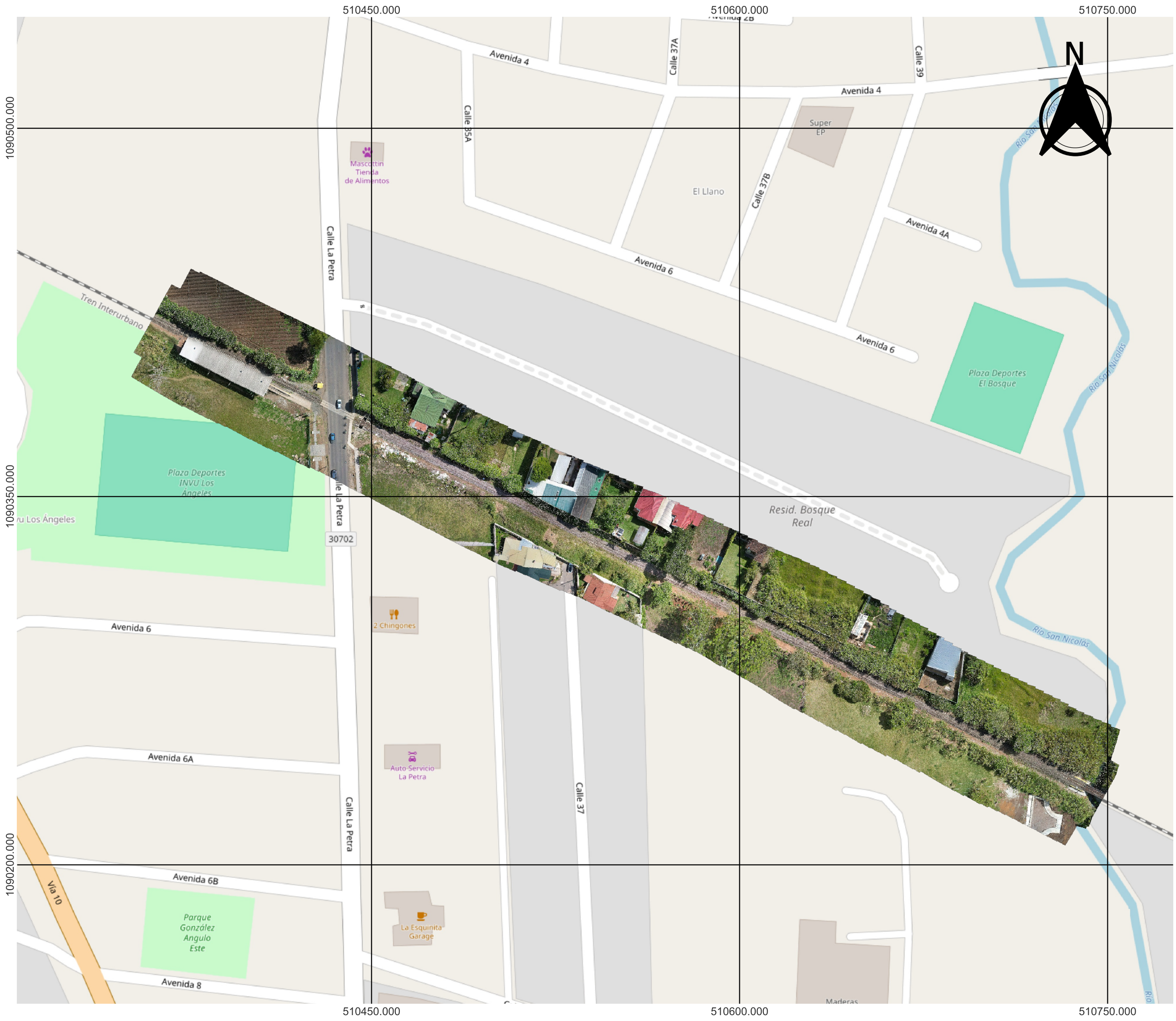
Puntos de control y de chequeo a lo largo de los 2 kilómetros de vía férrea.

Punto	Este	Norte	Elevación	Desc.
1	510350,733	1090426,953	1411,574	GCP1
2	510406,463	1090400,970	1411,251	CHP1
3	510447,735	1090377,110	1410,946	GCP2
4	510495,716	1090357,269	1410,139	CHP2
5	510539,306	1090333,909	1409,855	GCP3
6	510577,824	1090312,562	1408,899	CHP3
7	510617,836	1090294,533	1407,641	GCP4
8	510661,336	1090270,689	1406,177	CHP4
9	510710,869	1090245,775	1404,513	GCP5
10	510750,604	1090228,866	1403,034	CHP5
11	510795,079	1090205,484	1402,073	GCP6
12	510841,918	1090179,935	1400,749	CHP6
13	510899,320	1090151,088	1399,367	GCP7
14	510938,399	1090133,368	1398,596	CHP7
15	510991,686	1090106,581	1397,603	GCP8
16	511031,409	1090084,629	1397,120	CHP8
17	511066,018	1090068,118	1396,773	GCP9
18	511105,837	1090045,302	1395,734	CHP9
19	511149,789	1090023,684	1395,596	GCP10
20	511189,717	1089993,177	1394,698	CHP10
21	511219,635	1089960,438	1393,889	GCP11
22	511260,467	1089918,944	1391,643	CHP11
23	511295,892	1089879,965	1389,983	GCP12
24	511324,629	1089840,549	1388,539	CHP12
25	511361,198	1089803,946	1386,696	GCP13
26	511397,736	1089761,313	1384,981	CHP13
27	511426,036	1089722,770	1384,704	GCP14
28	511462,677	1089681,724	1384,075	CHP14
29	511494,289	1089641,276	1383,114	GCP15
30	511526,798	1089605,204	1381,617	CHP15
31	511556,928	1089569,165	1380,130	GCP16

Punto	Este	Norte	Elevación	Desc.
32	511583,357	1089534,857	1379,056	CHP16
33	511623,163	1089488,841	1377,788	GCP17
34	511653,148	1089458,301	1376,629	CHP17
35	511700,075	1089422,610	1374,833	GCP18
36	511729,335	1089402,895	1373,667	CHP18
37	511764,722	1089382,847	1372,042	GCP19
38	511815,478	1089356,369	1370,165	CHP19
39	511854,864	1089335,186	1369,469	GCP20
40	511946,819	1089280,316	1369,467	GCP21
41	511986,321	1089260,119	1370,272	CHP21
42	512022,845	1089238,968	1371,315	GCP22
43	512067,959	1089207,727	1372,636	CHP22
44	512109,362	1089181,474	1373,705	GCP23
45	512160,388	1089154,639	1374,251	CHP23
46	512206,566	1089126,338	1374,403	GCP24
47	512249,233	1089097,640	1374,515	CHP24

Apéndice 9.

Productos fotogramétricos generados para cada uno de los vuelos.



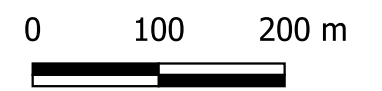
Simbología

- ORTOFOTO VUELO 1
- Banda 1 (Red)
- Banda 2 (Green)
- Banda 3 (Blue)
- OSM Standard

ORTOFOTO DEL VUELO 1.
CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
Daniel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica



Ubicación del área de estudio



Simbología

ORTOFOTO VUELO 2

■ Banda 1 (Red)

■ Banda 2 (Green)

■ Banda 3 (Blue)

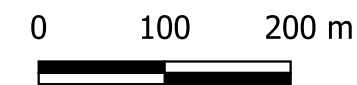
OSM Standard

ORTOFOTO DEL VUELO 2.
CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
Dániel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica



Ubicación del área de estudio



Simbología

ORTOFOTO VUELO EXPERIMENTAL

- Banda 1 (Red)
- Banda 2 (Green)
- Banda 3 (Blue)

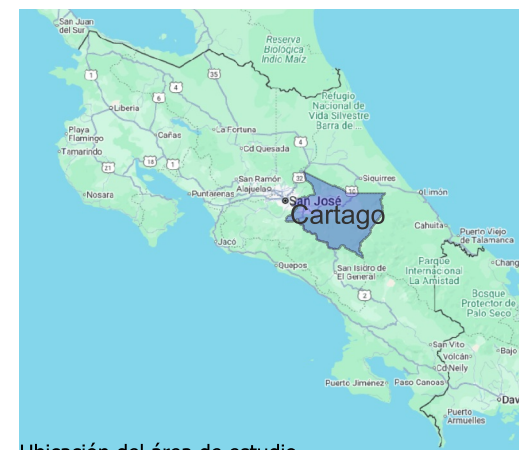
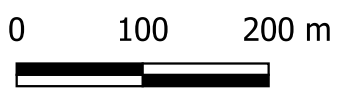
OSM Standard

ORTOFOTO DEL VUELO EXPERIMENTAL.
CARTAGO, COSTA RICA

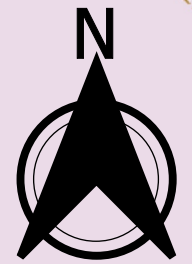
Elaborado por:
Dániel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica

TEC | Tecnológico de Costa Rica



Ubicación del área de estudio



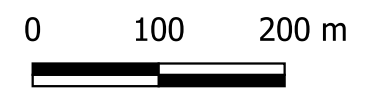
Simbología

- ORTOFOTO VUELO 3
- Banda 1 (Red)
- Banda 2 (Green)
- Banda 3 (Blue)
- OSM Standard

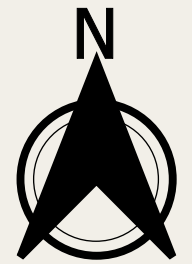
ORTOFOTO DEL VUELO 3.
CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
Dániel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica



Ubicación del área de estudio



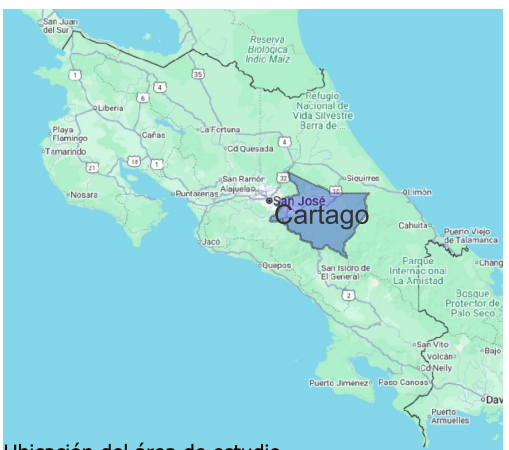
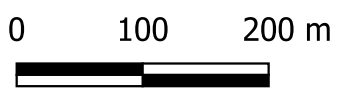
Simbología

- ORTOFOTO VUELO 4
- Banda 1 (Red)
- Banda 2 (Green)
- Banda 3 (Blue)
- OSM Standard

ORTOFOTO DEL VUELO 4.
CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
Daniel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica



Ubicación del área de estudio

511650.000

511800.000

511950.000

1089450.000

1089450.000

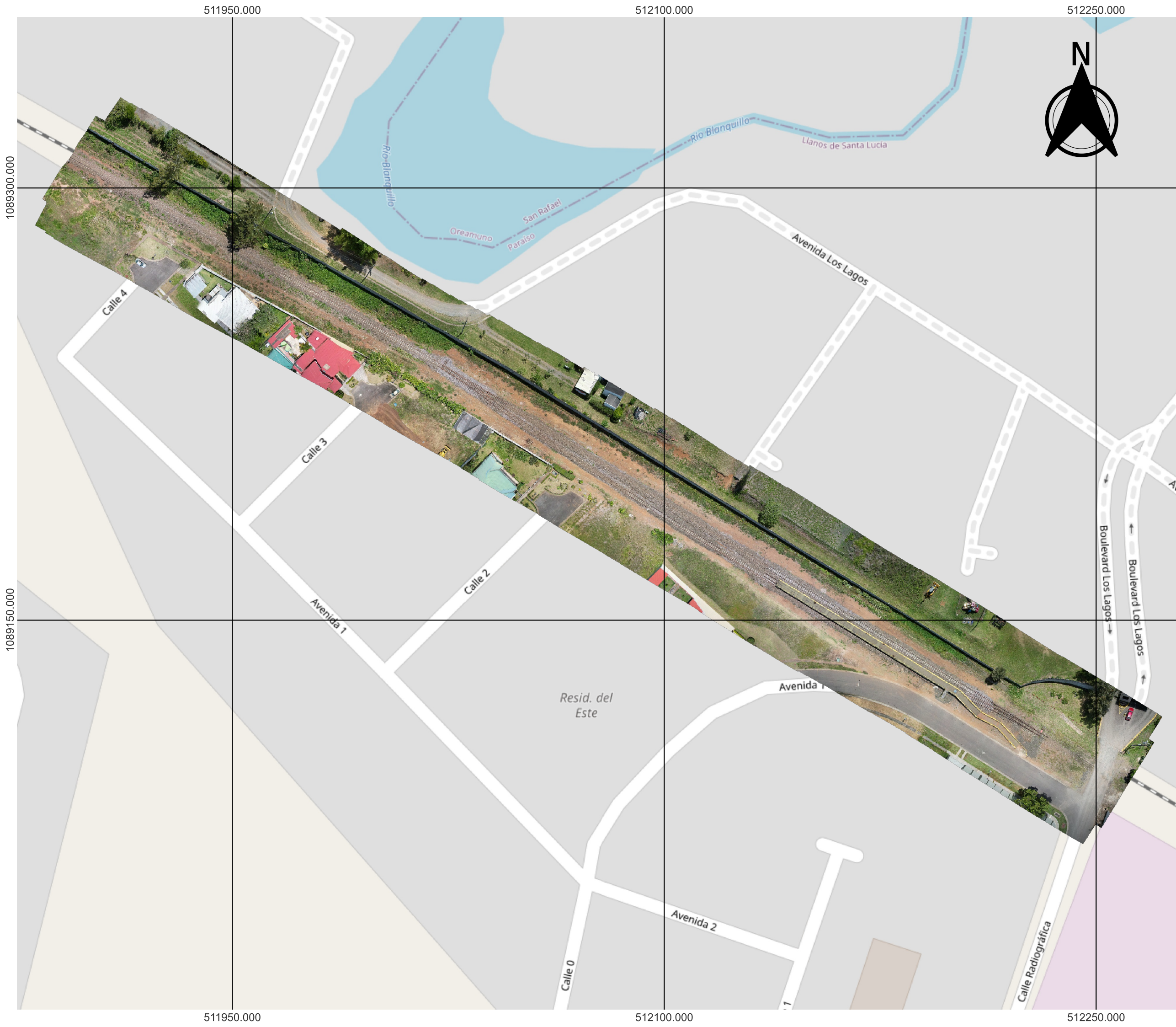
1089300.000

1089300.000

511650.000

511800.000

511950.000



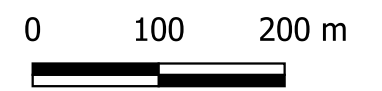
Simbología

- ORTOFOTO VUELO 5
- Banda 1 (Red)
- Banda 2 (Green)
- Banda 3 (Blue)
- OSM Standard

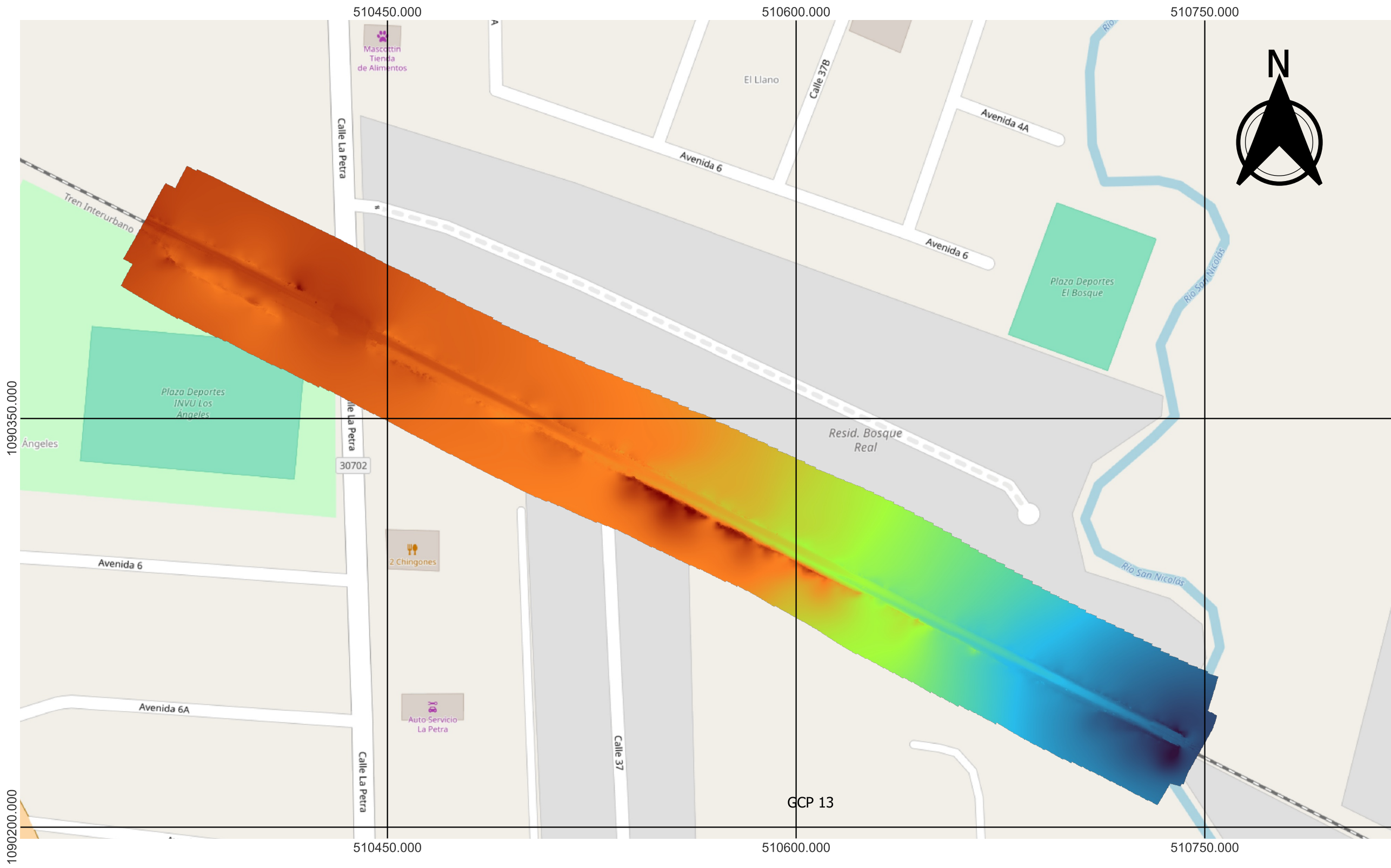
ORTOFOTO DEL VUELO 5.
CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
Daniel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica



Ubicación del área de estudio



Simbología

DEM

Banda 1 (Gray)

- 1402,610
- 1405,051
- 1407,492
- 1409,932
- 1412,373

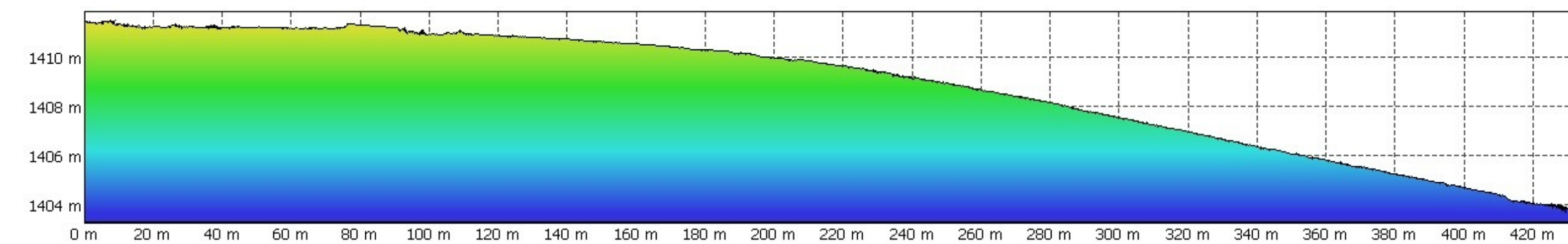
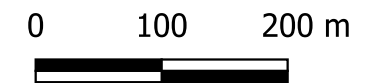
OSM Standard

MODELO DIGITAL DE TERRENO Y
PERFIL LONGITUDINAL DE LA
VÍA FÉRREA EN EL VUELO 1.
CARTAGO, COSTA RICA

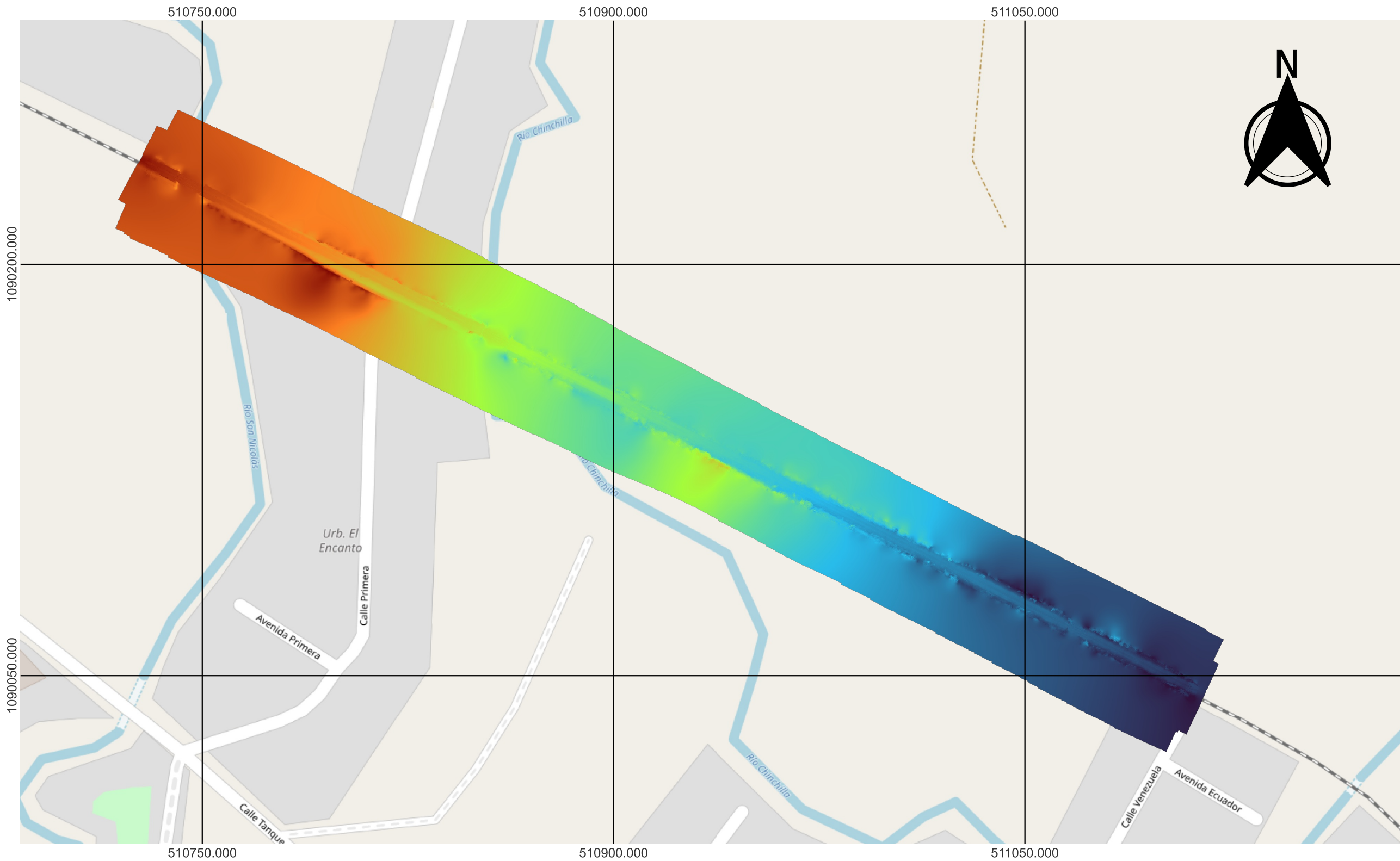
Elaborado por:
Dániel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica



Ubicación del área de estudio



Simbología

DEM 2

Banda 1 (Gray)

- 1395,748
- 1397,910
- 1400,072
- 1402,234
- 1404,396

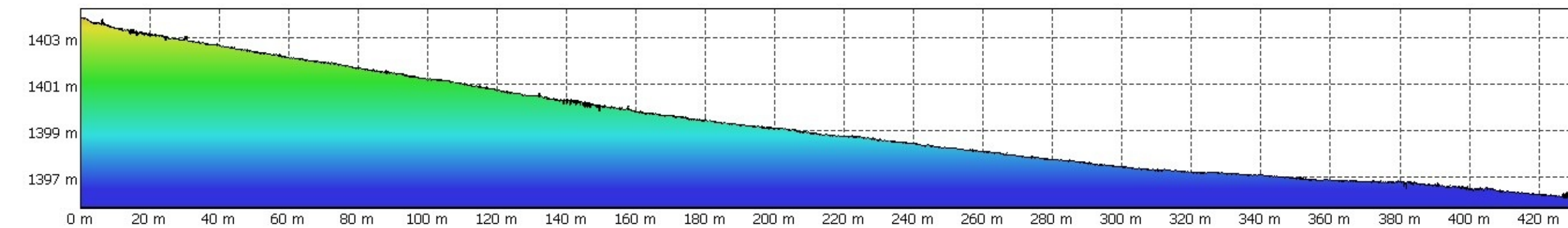
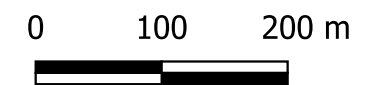
OSM Standard

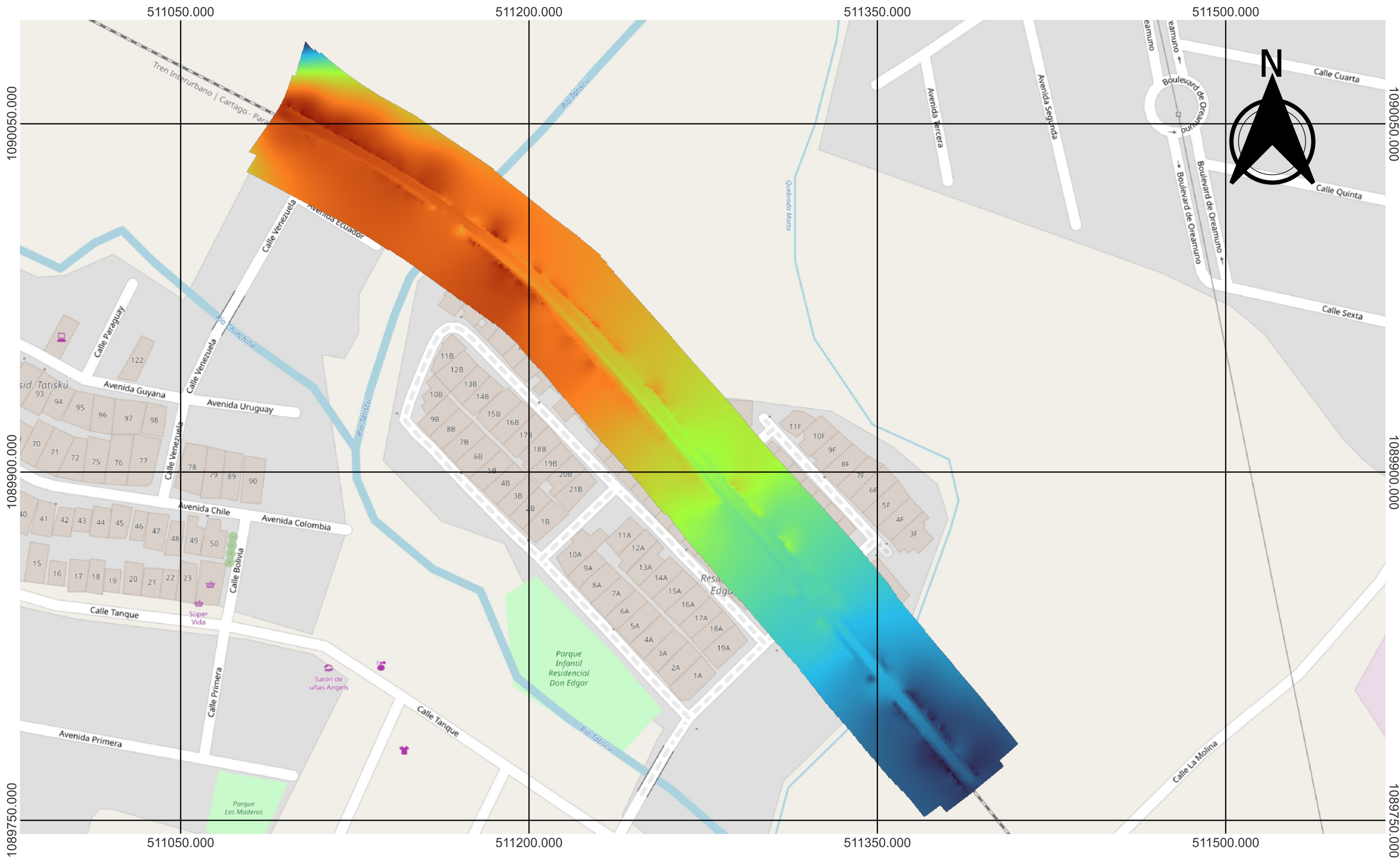
MODELO DIGITAL DE TERRENO Y
PERFIL LONGITUDINAL DE LA
VÍA FÉRREA EN EL VUELO 2.
CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
Dániel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica





Simbología

DEM TRAMO EXPERIMENTAL

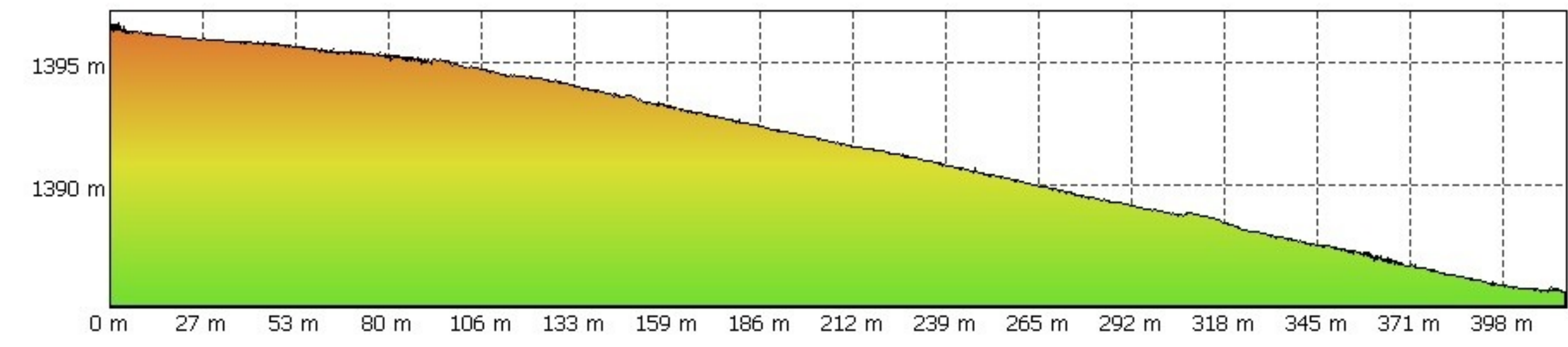
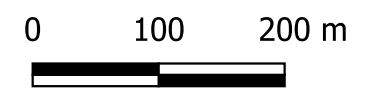
- Banda 1 (Gray)
- 1384,183
 - 1387,647
 - 1391,111
 - 1394,574
 - 1398,038

OSM Standard

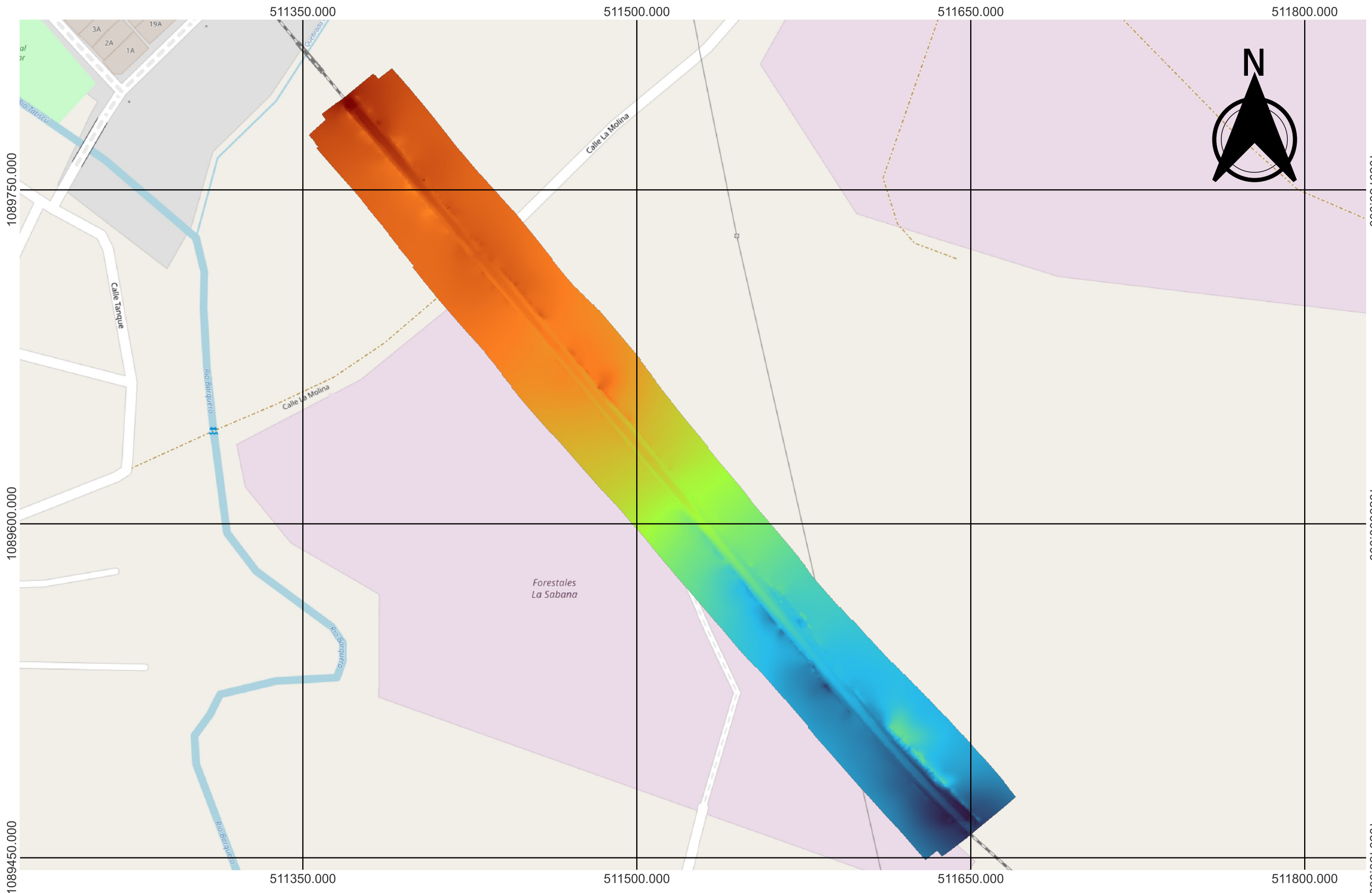
MODELO DIGITAL DE TERRENO Y
PERFIL LONGITUDINAL DE LA
VÍA FÉRREA EN EL VUELO
EXPERIMENTAL.
CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
Dániel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica



Ubicación del área de estudio



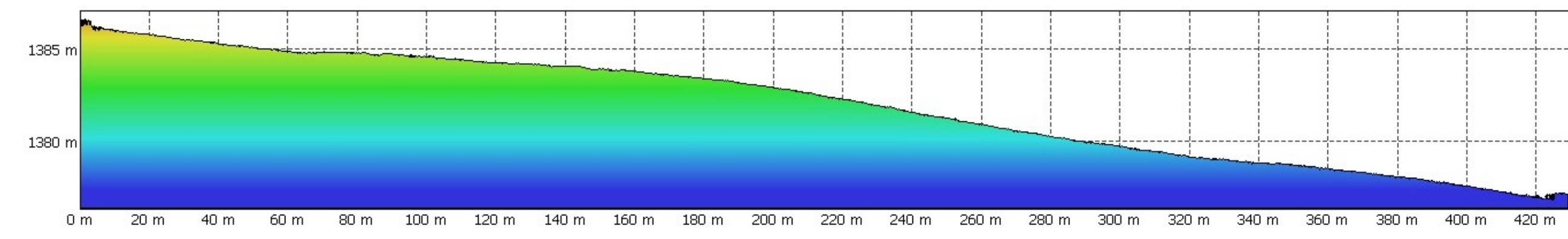
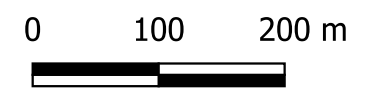
Simbología

- DEM 3
- Banda 1 (Gray)
 - 1376,340
 - 1378,910
 - 1381,480
 - 1384,050
 - 1386,620
- OSM Standard

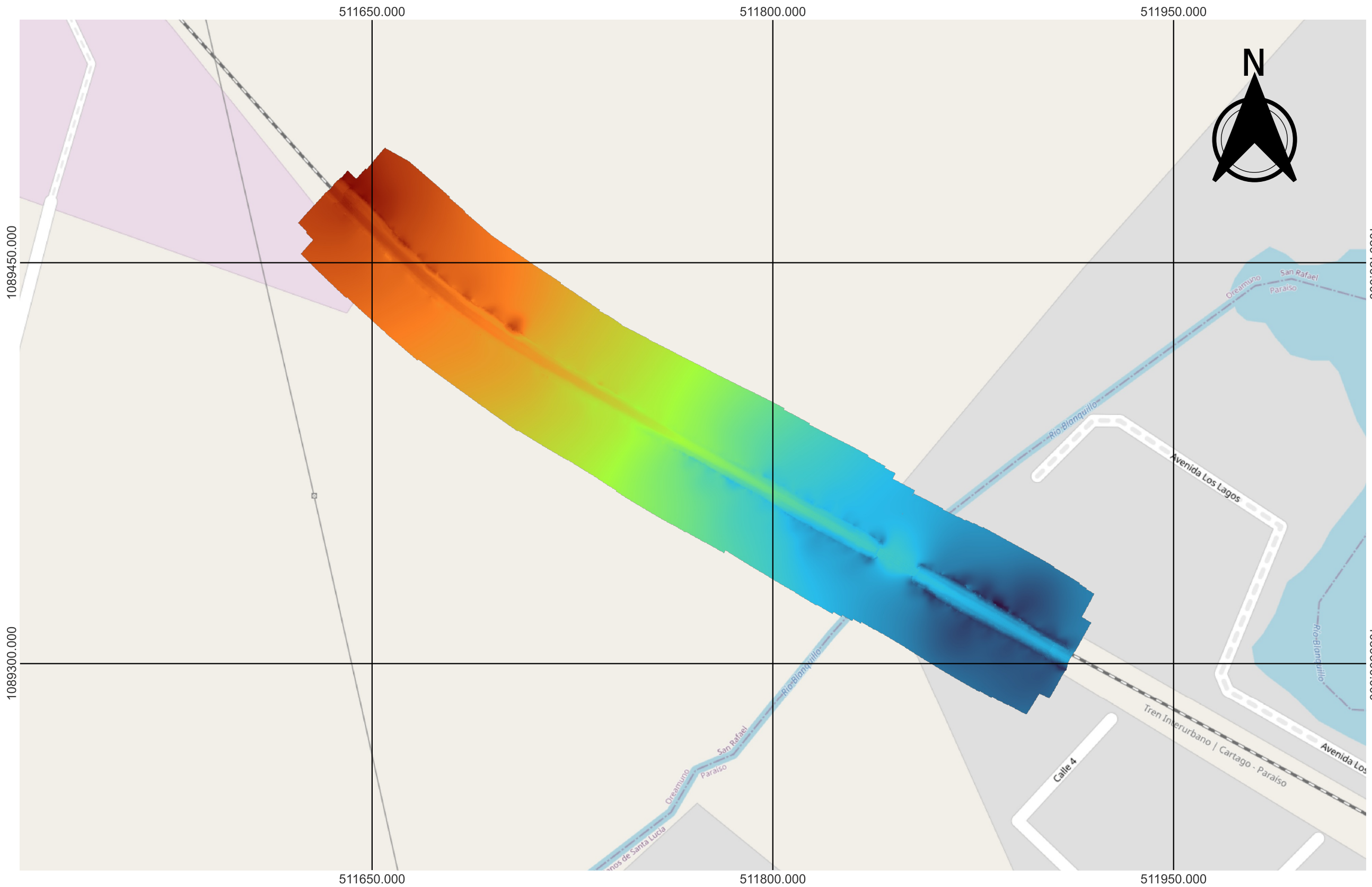
MODELO DIGITAL DE TERRENO Y
PERFIL LONGITUDINAL DE LA
VÍA FÉRREA EN EL VUELO 3.
CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
Dániel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica



Ubicación del área de estudio



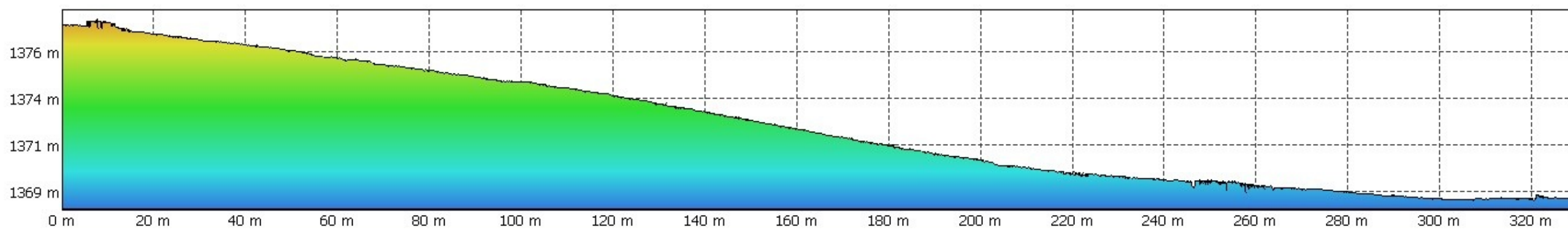
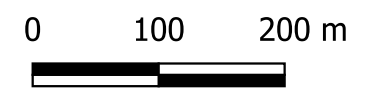
Simbología

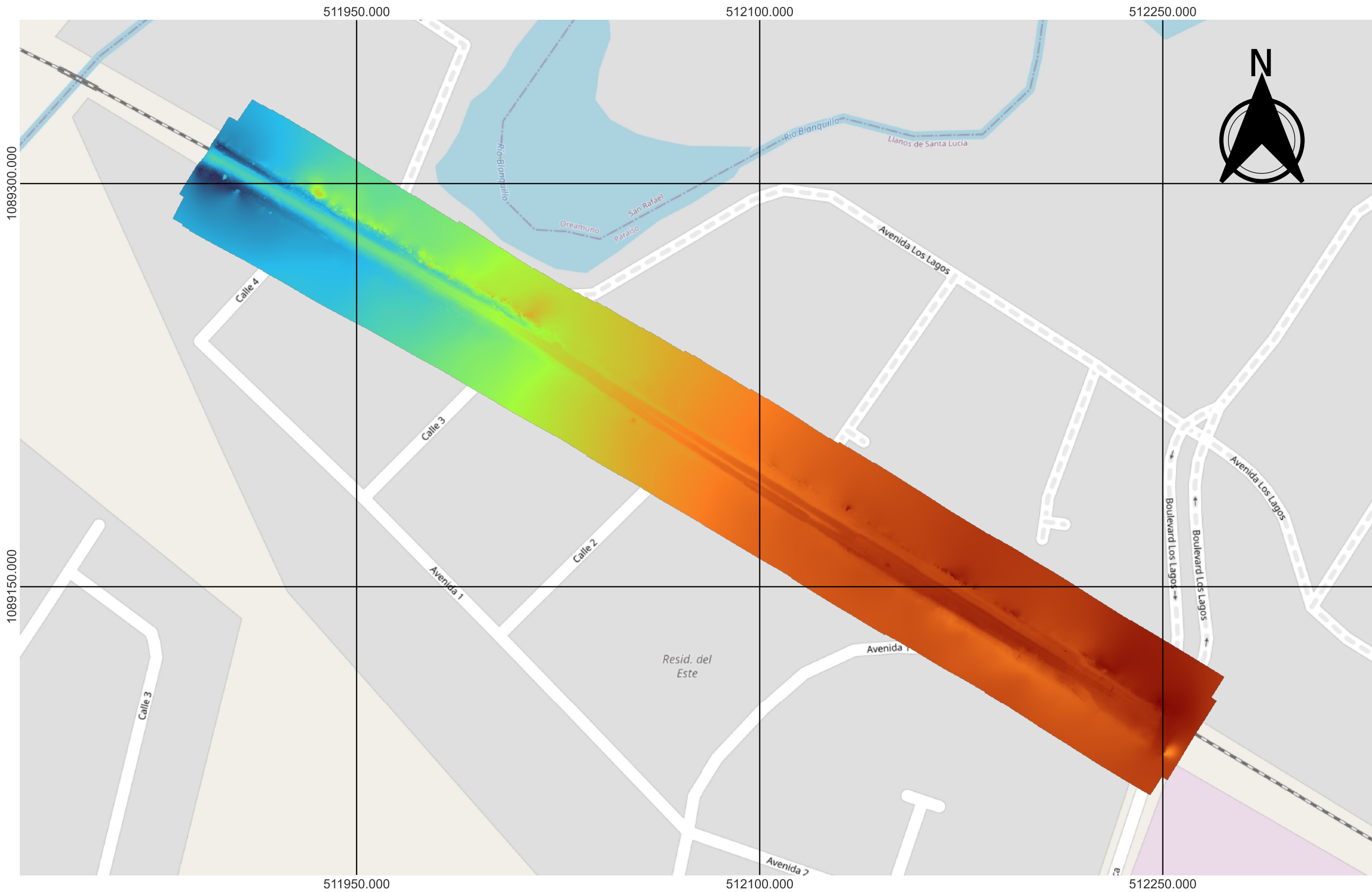
- DEM 4
- Banda 1 (Gray)
 - 1366,093
 - 1369,093
 - 1372,094
 - 1375,094
 - 1378,095
- OSM Standard

MODELO DIGITAL DE TERRENO Y PERFIL LONGITUDINAL DE LA VÍA FÉRREA EN EL VUELO 4. CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
 Dániel Marín Alfaro
 Instituto Tecnológico de Costa Rica
 Julio 2025

Fuente:
 Cartografía SNIT
 Cartago, Costa Rica





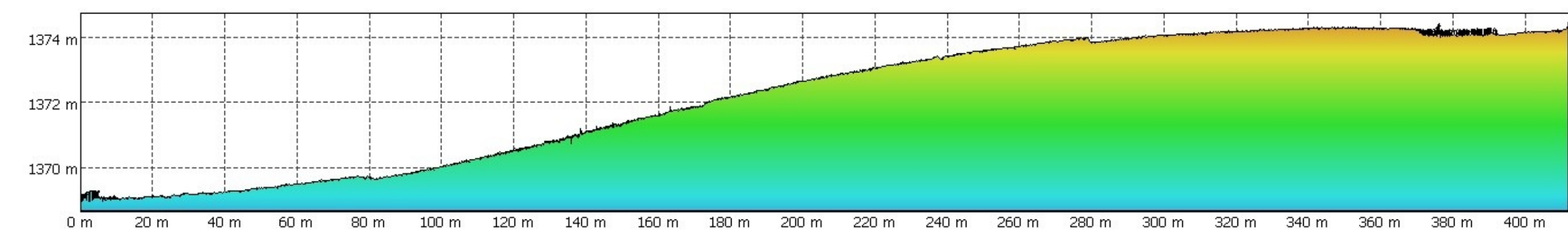
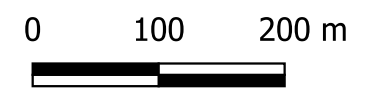
Simbología

- DEM 5
- Banda 1 (Gray)
 - 1366,243
 - 1368,440
 - 1370,636
 - 1372,832
 - 1375,029
- OSM Standard

MODELO DIGITAL DE TERRENO Y
PERFIL LONGITUDINAL DE LA
VÍA FÉRREA EN EL VUELO 5.
CARTAGO, COSTA RICA

Elaborado por:
Dániel Marín Alfaro
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Julio 2025

Fuente:
Cartografía SNIT
Cartago, Costa Rica



Ubicación del área de estudio