



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 07 noviembre 2024

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad: Pitalito

El (Los) suscrito(s):

_____ Marco Fidel Cardona de la Cruz _____, con C.C. No. 1078749492 _____,
_____, con C.C. No. _____,
_____, con C.C. No. _____,
_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado Titulado **EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN TELEDETECCIÓN CON RPAS (Sistema de Aeronaves tripuladas por control remoto) UTILIZANDO EL MÉTODO PPK (POST PROCESSED KINEMATIC) EN PROCESOS FOTOGRAMÉTRICOS**

presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de

_____ Ingeniero Agrícola _____;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

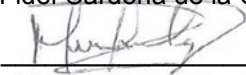
PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Marco Fidel Cardona de la Cruz

Firma:  _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____



CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN TELEDETECCIÓN CON RPAS (Sistema de Aeronaves tripuladas por control remoto) UTILIZANDO EL MÉTODO PPK (POST PROCESSED KINEMATIC) EN PROCESOS FOTOGRAMÉTRICOS

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Cardona de la Cruz	Marco Fidel

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Mujica Rodríguez	Edinson
Salazar Arias	Stephan Andrés

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Agrícola



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

3 de 3

cinco puntos de control distribuidos homogéneamente en el terreno. La fotogrametría ha demostrado su potencial en la ingeniería moderna al proporcionar una herramienta avanzada para la generación de modelos digitales y análisis geoespaciales. La utilización de tecnologías como el RTK y el PPK ha permitido mejorar la precisión en la georreferenciación, abriendo el camino hacia aplicaciones más precisas y efectivas en una amplia gama de campos de estudio e industrias

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

In the implementation of the PPK method, a dual-frequency GNSS antenna (Global Navigation Satellite System) was used in conjunction with a Matrice300 RTK Drone, equipped with state-of-the-art technology. The Rinex format data generated by an active antenna from the geodetic network of the Agustín Codazzi Geographic Institute (IGAC) complemented this process. Additionally, two flights were conducted using the UgCS and DJI Pilot software. During these phases, a survey and marking of points were carried out in a study area corresponding to 20 hectares, serving the dual purpose of control points and validation points. Through each of these procedures, the displacement errors and altimetric variations of the points were evaluated, resulting in the creation of a model adjusted to reality, characterized by extreme precision and minimal errors. The highest precision was achieved using the Pilot flight software in conjunction with the FOIF A90 dual-frequency antenna, yielding a mean square error of 0.0076 meters, with the use of five control points evenly distributed across the terrain. Photogrammetry has demonstrated its potential in modern engineering by providing an advanced tool for generating digital models and geospatial analysis. The adoption of technologies such as RTK and PPK has enhanced precision in georeferencing, paving the way for more accurate and effective applications across a wide range of study fields and industries.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Luisa Marcela Cerquera Barrera

Firma:

Nombre Jurado: Diana Carolina Polania Montiel

Firma:

**EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN TELEDETECCIÓN CON RPAS
(Sistema de Aeronaves tripuladas por control remoto) UTILIZANDO EL
MÉTODO PPK (POST PROCESSED KINEMATIC) EN PROCESOS
FOTOGRAMÉTRICOS**

Trabajo de grado presentado al departamento de Ingeniería Agrícola
como requisito para optar al título de: Ingeniero Agrícola

Autor

Marco Fidel Cardona de la Cruz: 20171156858

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Agrícola

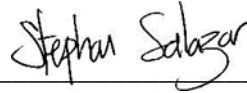
Pitalito, Huila, Colombia. 2023

Firma



Director: Edinson Mujica Rodríguez

Firma



Codirector: Stephan Andrés Salazar Arias

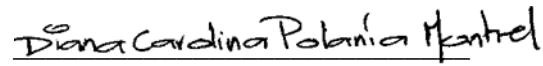
Nota de aceptación

Firma



Jurado: Luisa Marcela Cerquera Barrera

Firma



Jurado: Diana Carolina Polania Montiel

EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN TELEDETECCIÓN CON RPAS (Sistema de Aeronaves tripuladas por control remoto) UTILIZANDO EL MÉTODO PPK (POST PROCESSED KINEMATIC) EN PROCESOS FOTOGRAMÉTRICOS

RESUMEN

En la implementación del método PPK, se utilizó una antena GNSS (Global Navigation Satellite System) de doble frecuencia en conjunto con un RPAS (Sistema de Aeronaves tripuladas por control remoto) Matrice300 RTK, equipado con tecnología de última generación. Los datos en formato Rinex generados por una antena activa de la red geodésica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) complementaron este proceso. Además, se ejecutaron dos vuelos empleando los softwares UgCS y DJI Pilot. Durante estas fases, se llevó a cabo un levantamiento y marcación de puntos distribuidos en un área de estudio correspondiente a 20 hectáreas, los cuales cumplieron la doble función de puntos de control y puntos de validación. Mediante cada uno de estos procedimientos, se evaluaron los errores de desplazamiento y variación altimétrica de los puntos, lo que culminó en la obtención de un modelo ajustado a la realidad, caracterizado por su precisión extrema y mínimos errores. La mejor precisión se alcanzó con el software de vuelo Pilot y empleando la antena de doble frecuencia FOIF A90 dándonos como error medio cuadrático de 0.0076 m, con el empleo de cinco puntos de control distribuidos homogéneamente en el terreno. La fotogrametría ha demostrado su potencial en la ingeniería moderna al proporcionar una herramienta avanzada para la generación de modelos digitales y análisis geoespaciales. La utilización de tecnologías como el RTK y el PPK ha permitido mejorar la precisión en la georreferenciación, abriendo el camino hacia aplicaciones más precisas y efectivas en una amplia gama de campos de estudio e industrias

Palabras clave: PPK, topografía, agrimensura, posicionamiento, fotogrametría, precisión, RTK, puntos de control.

ABSTRACT

In the implementation of the PPK method, a dual-frequency GNSS antenna (Global Navigation Satellite System) was used in conjunction with a Matrice300 RTK Drone, equipped with state-of-the-art technology. The Rinex format data generated by an active antenna from the geodetic network of the Agustín Codazzi Geographic Institute (IGAC) complemented this process. Additionally, two flights were conducted using the UgCS and DJI Pilot software. During these phases, a survey and marking of points were carried out in a study area corresponding to 20 hectares, serving the dual purpose of control points and validation points. Through each of these procedures, the displacement errors and altimetric variations of the points were evaluated, resulting in the creation of a model adjusted to reality, characterized by extreme precision and minimal errors. The highest precision was achieved using the Pilot flight software in conjunction with the FOIF A90 dual-frequency antenna, yielding a mean square error of 0.0076 meters, with the use of five control points evenly distributed across the terrain. Photogrammetry has demonstrated its potential in modern engineering by providing an advanced tool for generating digital models and geospatial analysis. The adoption of technologies such as RTK and PPK has enhanced precision in georeferencing, paving the way for more accurate and effective applications across a wide range of study fields and industries.

Keywords: PPK, topography, surveying, positioning, photogrammetry, precision, RTK, control points

INTRODUCCIÓN

En el marco de los avances tecnológicos en la disciplina de ingeniería, y en particular en las técnicas de medición de terrenos como la agrimensura, emerge con prominencia la fotogrametría, una metodología que involucra la utilización de sensores y plataformas aéreas para la obtención de modelos digitales (Viana, 2021). Esta aplicación tecnológica ha revolucionado la precisión en la modelización de áreas de estudio, superando ampliamente a la topografía convencional y encontrando aplicaciones en diversas áreas de la ingeniería (Oliveira, 2000). Así, se ha generado un vasto volumen de datos que, en combinación con los sistemas de información geográfica (SIG), se procesan para crear nuevos productos y análisis (Muneta et al., 2012). La adecuada georreferenciación y posicionamiento de los mapas resultantes exige una vinculación precisa con sistemas nacionales de coordenadas. En la fotogrametría, varios métodos han surgido para llevar a cabo estos procedimientos, destacándose el empleo de puntos de control, el sistema de posicionamiento en tiempo real (Real Time Kinematic, RTK) y el enfoque conocido como Kinematic Post Processing (PPK).

La Fotogrametría, se ha convertido en el desarrollo de las técnicas topográficas tradicionales en contexto con los avances tecnológicos en la disciplina de ingeniería, esta surgió a fines del siglo XIX; como una alternativa a los métodos de agrimensura convencionales. Surgida del desarrollo de la geometría descriptiva y de las sucesivas innovaciones en la captura de imágenes fotográficas, surgió la capacidad de medir objetos en dos y tres dimensiones, lo que permitió obtener información tanto planimétrica como altimétrica del terreno. Aimé Laussedat, un ingeniero militar francés, ostenta el mérito de haber sido el primero en emplear la fotografía para la creación de mapas topográficos, otorgándole el título de fundador de la fotogrametría terrestre (Muro et al., 2002).

La fotogrametría se define como la ciencia que permite extraer información de las fotografías, aplicando los principios de la propia fotografía, es decir, capturar o dibujar con luz en película (fotografía analógica) o un sensor (fotografía digital). Para lograr esto, se exponen materiales sensibles a la luz para crear la imagen deseada (Llano, 2019). Durante varios años, la fotografía se ha empleado en proyectos de ingeniería, utilizando principios fundamentales para extraer información relevante. Esto moderniza la topografía convencional, proporcionando información precisa y georreferenciada.

Numerosas investigaciones han empleado la fotogrametría, comparando sus resultados con los de la topografía tradicional. Utilizando estaciones de escaneo, drones equipados con tecnologías RTK y PPK, tales estudios se han llevado a cabo en Montevideo, Uruguay. Estas investigaciones muestran la implementación y resultados de cada método, revelando errores de posicionamiento bajos para cada proceso (Settin, 2019).

Los Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS) se emplean en la adquisición de datos geoespaciales, junto con equipos GPS/RTK para la georreferenciación. El resultado final de este proceso son ortofotos y modelos digitales de elevación, facilitando la producción inmediata de cartografía de alta precisión (Nájera Ramos, 2019).

La aplicación de estas tecnologías fotogramétricas se extiende al monitoreo de la infraestructura de transporte terrestre. En este contexto, se realizan estudios para determinar el deterioro de las carreteras, a menudo utilizando vehículos terrestres equipados con cámaras para la captura de imágenes. Esta recopilación de datos facilita la creación de modelos a través de software, identificando zonas de daño. De manera similar, se han reportado estudios que involucran aeronaves no tripuladas en carreteras específicas, como la Ruta 45 en el departamento de Boyacá. En estos casos, las imágenes capturadas se procesan utilizando diversos programas para derivar modelos digitales, permitiendo la extracción de información secundaria. Los hallazgos indican que la tecnología de RPAS agiliza la generación de información en comparación con los métodos convencionales (Nieto, 2019).

De acuerdo con la Resolución No. 471 de 2020 del IGAC, todos los productos cartográficos básicos oficiales en Colombia deben cumplir con requisitos mínimos, incluyendo la georreferenciación dentro de un sistema de coordenadas unificado. Lograr esta georreferenciación involucra equipos de seguimiento satelital que ajustan la posición a través de GPS, Glonass, Galileo y otros sistemas satelitales. Los vehículos aéreos no tripulados suelen incorporar tecnología GPS y utilizan puntos de control terrestres para la georreferenciación. Esta información se integra en el flujo de trabajo de procesamiento de imágenes. Cabe destacar tres sistemas de georreferenciación. El primero se basa exclusivamente en puntos de control terrestres que se georreferencian, requiriendo el uso de múltiples puntos de control. El segundo es el sistema Real Time Kinematic (RTK) (Furtado, 2003), que implica conexiones en tiempo real entre el dron, una antena y satélites para la georreferenciación instantánea durante la captura. El tercer sistema es el enfoque Kinematic Post Processing (PPK), en el cual una antena GNSS se utiliza para el posicionamiento estático, el dron se conecta a los satélites y un paso de post-procesamiento utilizando software específico perfecciona la georreferenciación (North, 2020).

Para la realización de este trabajo, se tomó como referencia la Resolución 470 del IGAC. En esta resolución se establecen los parámetros y el error medio cuadrático permitido para los productos cartográficos obtenidos. Con el objetivo de evaluar la precisión en los productos cartográficos generados, se planteó la obtención de información utilizando dos softwares de vuelo y se realizaron tres vuelos, implementando 1, 3 y 5 puntos de control. A partir de estos vuelos, se obtuvieron productos cartográficos para cada software de vuelo, y se extrajo la información de cada uno de los puntos distribuidos en el área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del proyecto

La recolección de datos para el presente proyecto tuvo lugar en los terrenos de la Hacienda Renacimiento, propiedad de la familia Charry. se encuentra situada en la vereda Amborco, bajo la jurisdicción del municipio de Palermo, en el departamento de Huila. Sus coordenadas se establecen en un sistema nacional único, con una latitud norte de 1.890.861,928 m y una longitud este de 4.738.657,338 m, a una altitud promedio de 497 metros sobre el nivel del mar (msnm). La extensión de terreno seleccionada para el estudio abarca 20 hectáreas, y la actividad económica preponderante es la ganadería. La elección de este terreno obedeció a factores como la reducida cobertura vegetal, la accesibilidad sin complicaciones y su proximidad a la ciudad de Neiva ver imagen 1. Los procesos de postproceso y análisis de oficina se llevaron a cabo en las instalaciones de Dronesky, ubicadas en la ciudad de Neiva.

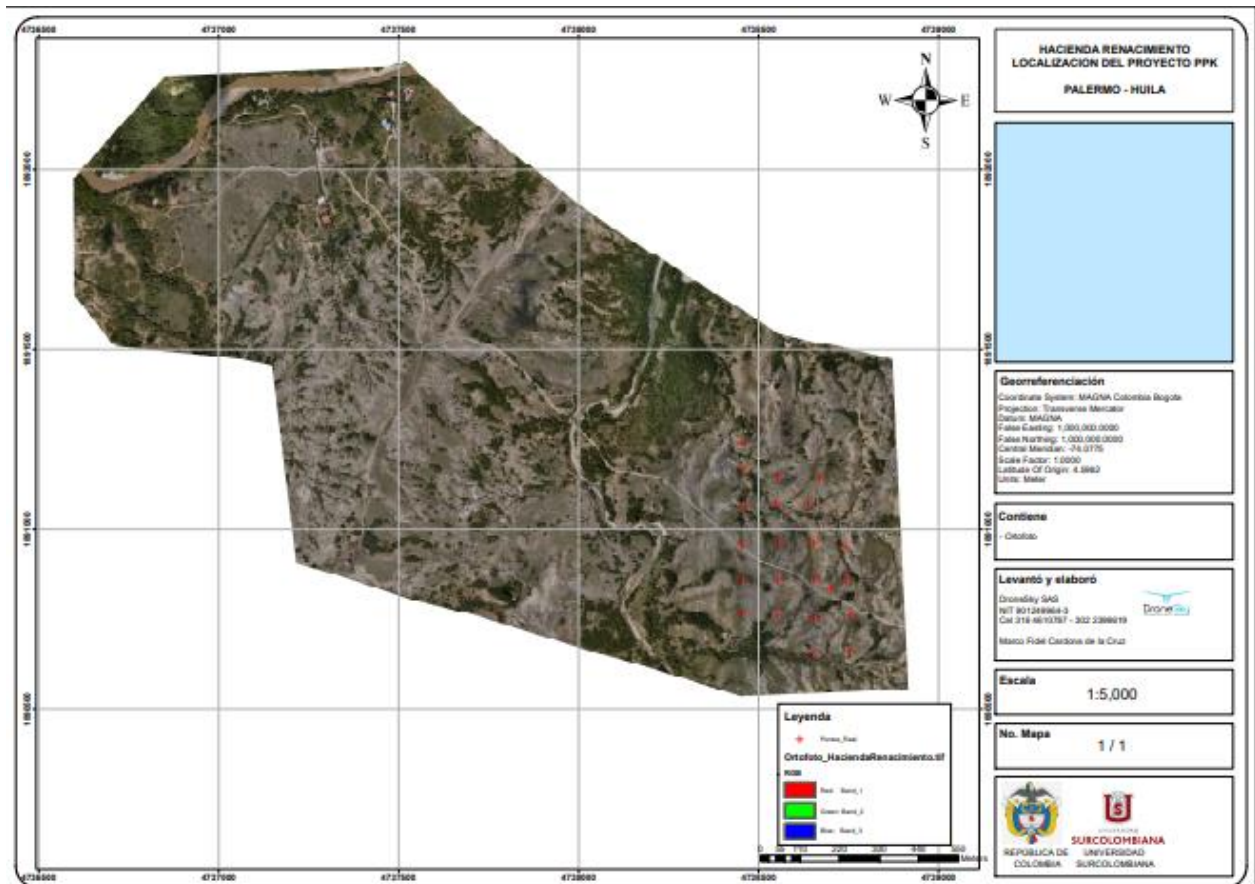


IMAGEN 1. Localización del área de estudio

Equipos e instrumentos

Equipos:

- ✓ DJI Matrice 300 RTK. Ver imagen 2
- ✓ DJI Zenmuse P1. Ver imagen 3

- ✓ Equipos GNSS RTK doble frecuencia FOIF A90. Ver imagen 4

Software:

- ✓ Software profesional de Vuelo (Pilot) licencia 1ZMBK15003006N
- ✓ Software profesional de Procesamiento Agisoft Metashape licencia versión de prueba
- ✓ Software GIS (QGIS)

Equipo técnico:

- ✓ Marco Fidel Cardona de la Cruz
Ing. Agrícola. (c)
- ✓ Stephan Andrés Salazar Arias
Ing. Agrícola. M.Sc. Tecnologías de la información geográfica – COO



IMAGEN 2. DJI Matrice 300



IMAGEN 3. DJI Zenmuse P1



IMAGEN 4. Equipo RTK FOIF A90

Ubicación de puntos mojones y rastreo según resolución 643 de IGAC

Para la georreferenciación, se aplicó la metodología del IGAC, tal como se expresa en su Resolución 643, en el cual se establece dos puntos mojones dentro del predio. El equipo utilizado para llevar a cabo el rastreo consistió en un receptor GNSS de doble frecuencia FOIF A90, operando en modo estático diferencial el cual es un enfoque de medición en el que tanto el receptor de referencia (estacionario) como el receptor móvil (rover) permanecen inmóviles durante un período prolongado de tiempo. Durante este tiempo, ambos receptores registran observaciones de las señales de los satélites GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou. ofrece una alta precisión, a menudo

en el rango de milímetros, lo que quiere decir que los desplazamientos de los puntos están por debajo de los cm.

Rastreo estático con equipo GNS FOIF A90

El sistema MAGNA – SIRGAS representa un marco geocéntrico de alta precisión desarrollado en conformidad con los principios de la geodesia internacional. Este sistema proporciona un marco de referencia nacional para la definición de coordenadas en Colombia, cuyos niveles de precisión son compatibles con las tecnologías modernas de posicionamiento. Este enfoque, a su vez, facilita un intercambio eficiente de información georreferenciada gracias a su distribución uniforme de estaciones a lo largo y ancho del país (IGAC, 2004). La Resolución 471, emitida el 14 de mayo de 2020, estableció las especificaciones técnicas mínimas que deben cumplir los productos cartográficos básicos oficiales de Colombia.

En la ejecución del proceso de rastreo estático de los puntos, se tomó en cuenta el tiempo de rastreo, calculado de acuerdo con los parámetros definidos en la Resolución 643 del IGAC. Esta evaluación consideró la distancia entre la estación de la red geodésica nacional MAGNA-ECO NEVA y el punto topográfico, empleando la siguiente ecuación:

$$t = 65 \text{ min} + (3 \text{ min} * (d - 10)) \quad (1)$$

Donde:

t= tiempo de rastreo

d= Distancia en kilómetros

Para la georreferenciación según la resolución 643 del IGAC, se deben establecer dos puntos de amarre o puntos mojones, los cuales se deben ubicar estratégicamente, donde permitan tener visibilidad entre los puntos, además de no tener obstáculos que impidan su visualización e interferencia aérea.

La georreferenciación de los dos puntos topográficos, comúnmente conocidos como mojones, se llevó a cabo mediante el sistema de posicionamiento global por satélite (GNSS). Este proceso se basó en un enfoque estático con una precisión milimétrica, y, además, se implementó un procedimiento de procesamiento diferencial y pos proceso, según lo estipulado en la resolución 643 del IGAC. Los puntos de interés, designados como GNSS01 y GNSS02, se seleccionaron estratégicamente, debido a que en esa posición quedan visibles el uno del otro, están libres de obstáculos lo cual permite una mejor señal a los equipos GNSS con los satélites (anexo 1). En este proceso de georreferenciación, se realizó la vinculación de estos dos puntos materializados, GNSS01 y GNSS02, con la estación activa NEVA de la red geodésica nacional. Dicha estación está ubicada en la ciudad de Neiva.

Cálculo y procesamiento de la información de los receptores GNSS

El cálculo y procesamiento de la información obtenida a través de los receptores GNSS FOIF A90 se realizó con el propósito de georreferenciar utilizando el software Topcon Tools (versión demo). Se efectuó el cálculo de vectores en el proceso de postproceso con el objetivo de obtener datos confiables y acordes a los requisitos establecidos por el IGAC. Se empleó el método DIFERENCIAL, y se tuvieron en cuenta los parámetros detallados en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de georreferenciación GNSS01 y GNSS02

Día juliano o GPS	145
Fecha de rastreo	25 mayo de 2022
Semana GPS	2211
Tiempo de rastreo GNSS01	01 hora 17 minutos 35 segundos
Tiempo de rastreo GNSS02:	01 horas 27 minutos 08 segundos
Tiempo de rastreo NEVA	24 horas 0 minutos 0 segundos
Altura instrumental	2 m

Los archivos ".dat" generados por los equipos GNSS FOIF A90, pertenecientes a los puntos GNSS01 y GNSS02, fueron convertidos al formato RINEX. Este paso posibilitó el posterior cálculo de las coordenadas en el sistema de referencia MAGNA ORIGEN NACIONAL, utilizando como punto de partida la estación activa de la red geodésica nacional, denominada NEVA. Los archivos RINEX de la estación activa se descargaron del portal del IGAC para el 25 de mayo de 2022. Por otro lado, las efemérides correspondientes a los días 24, 25 y 26 de mayo se obtuvieron del sitio GNSS Calendar and Utility.

Distribución y materialización de puntos de control y verificación

La distribución de los puntos de control y verificación se fundamentó en un diseño basado en unidades de área, haciendo uso de una imagen previa del terreno. Este proceso dividió el terreno en 21 lotes, asignando a cada uno de ellos un punto específico procurando ser el centroide de cada lote. Utilizando el software geoespacial QGIS, se calcularon coordenadas virtuales para estos puntos, las cuales posteriormente se llevaron a la realidad mediante su materialización y replanteo en el terreno (Imagen 5).



IMAGEN 5 distribución de los lotes

La materialización de los puntos en el terreno se efectuó mediante equipos GNSS que se vincularon a los puntos mojones. En este proceso se realizó el replanteo y la corrección de las coordenadas de

acuerdo con el Origen Único Nacional. Para garantizar su visibilidad en las fotografías, se marcó cada punto con pintura.

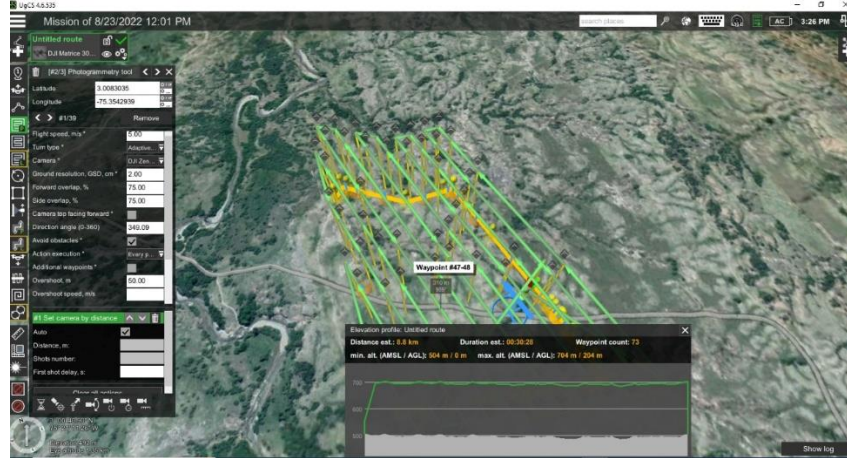


IMAGEN 6 Vuelo Software UGCS

Realización de vuelo y captura de información fotográfica

Las tomas fotográficas se llevaron a cabo utilizando el Drone Matrice 300 (Imagen 2), mientras que la antena GNSS FOIF A90 se ubicó en el mojón GNSS01 en modo estático. La planificación de los vuelos se gestionó mediante el software UgCS (Imagen 6), siguiendo los parámetros de vuelo detallados en la tabla 2. Asimismo, se realizó un segundo vuelo con los mismos parámetros, utilizando el software de vuelo Pilot.

Tabla 2. parámetros de Vuelo

Altura de vuelo (metros)	159
GSD (cm/px)	2
Velocidad de vuelo (metros/seg)	6
Traslape lateral (%)	75
Traslape frontal (%)	75
Distancia focal (mm)	35
Ángulo de rumbo (°)	350

Geotiquetado de las fotografías

En este punto, se procedió a realizar la corrección de la georreferenciación de las fotografías. Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó el software gratuito Emlid Studio. Este programa se nutre de los archivos de navegación del drone y de los archivos de la antena. En este proceso, el software triangula esta información y efectúa la corrección de la georreferenciación de cada fotografía entregándolas con su georreferenciación corregida (anexo 1). Estas fotografías corregidas posteriormente se emplearon en el proceso de la generación de cartografía.

Para llevar a cabo este proceso se cargan las fotografías y los archivos de navegación, tanto del drone como de la antena empleada en el proceso, con esta información el programa ajusta cada fotografía con una georreferenciación más precisa, generando un archivo con las fotografías ya corregidas. Este proceso es clave para evitar errores excesivos en la generación de los productos fotográficos que serán empleados en los procesos fotogramétricos.

Procesamiento digital de imágenes

Para esta etapa, se utilizó el software Agisoft Metashape con licencia versión de prueba. En este programa, se cargaron las fotografías previamente geotiquetadas en el software Emlid Studio, se

llevaron a cabo las alineaciones necesarias y se incluyeron los puntos designados como puntos de control. Posteriormente, se generó una nube densa de puntos, a partir de la cual se obtuvieron el modelo digital de elevación y la ortofoto. Estos resultados se integraron posteriormente en el software QGIS. En total, se realizaron 12 procesamientos. De los cuales seis utilizando las fotografías capturadas con el software de vuelo Pilot y seis utilizando las fotografías tomadas con el software de vuelo UGCS.

Uso de puntos de control

Aquí se implementó un diseño experimental factorial de tres niveles teniendo como referencia los puntos replanteados en terreno, la distribución de los puntos de control se realizó seleccionando un punto el más cercano al centro del área de terreno (Imagen 7), este fue empleado en los procesamientos con un solo punto de control. En el cual se emplearon cuatro procesamientos, otros cuatro procesamientos con tres puntos de control (Imagen 8) los cuales fueron seleccionados el mismo punto de los procesamientos anteriores y los otros dos, uno de la parte superior y el otro de la parte inferior del área de terreno, y los restantes cuatro procesamientos con cinco puntos de control, (Imagen 9) empleando los mismos tres de los procesamientos anteriores más un punto superior y otro inferior. La distribución de estos puntos se detalla en la tabla 3. El total de procesamiento fueron 12 donde cada procesamiento tuvo una duración de 60 minutos aproximadamente.



IMAGEN 7 Punto de control 1



IMAGEN 8 Puntos de control 3

Tabla 3 Procesamientos

PROCESAMIENTO	SOFTWARE DE VUELO	ANTENA	PUNTOS DE CONTROL
1	Pilot	FOIF A90	1
2	Pilot	FOIF A90	3
3	Pilot	FOIF A90	5
4	Pilot	IGAC	1
5	Pilot	IGAC	3
6	Pilot	IGAC	5
7	UGCS	FOIF A90	1
8	UGCS	FOIF A90	3
9	UGCS	FOIF A90	5
10	UGCS	IGAC	1
11	UGCS	IGAC	3
12	UGCS	IGAC	5



IMAGEN 9 Puntos de control 5

Calculo error de desplazamiento

El cálculo del error de desplazamiento en cada uno de los productos obtenidos se basó en la consideración de los 21 puntos materializados en campo utilizando los receptores GNSS FOIF A90. A través de la ecuación (2), se determinó el desplazamiento de cada uno de los puntos. Para calcular el error en la altura de cada punto, únicamente se evaluó la diferencia entre los puntos de referencia y cada punto de los diversos modelos generados.

$$Desplazamiento = \sqrt{(Norte\ real - Norte\ modelo)^2 + (Este\ Real - Este\ modelo)^2} \quad (2)$$

Calculo error medio cuadrático según resolución 471 del IGAC

Para el cálculo de estos valores se realiza con las ecuaciones 3 y 4, estipuladas en la resolución 471 del IGAC

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum(x\ dato, i - xcontrol, i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum(y\ dato, i - ycontrol, i)^2}{n}}$$

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (4)$$

donde:

X datos i, Y datos i es la coordenada horizontal del punto de control en el conjunto de datos;
 X control i, Y control i es la coordenada horizontal del punto de control en una fuente de mayor exactitud posicional.

n es el número de puntos de control según la resolución 471 del IGAC establece unos parámetros permitidos para la exactitud de los productos cartográficos. (tabla 6)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Georreferenciación de los puntos mojones

los datos obtenidos durante el postproceso del rastreo estático se observan en la tabla 4, donde se ajustan las coordenadas reales para los puntos mojones, para posteriormente levantar la información real de los 21 puntos distribuidos en el lote de estudio.

Tabla 4 Datos Mojones Georreferenciados

NAME	COORDENADAS GEOCENTRICAS			COORDENADAS ORIGEN NACIONAL			
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Y (m)	X (m)	Z (m) Geoidal	Z(m) Elipsoidal
GNSS01	1610852.03	-	332642.24	1890833.47	4738701.719	509.108	532.608
		6162863.407	6	7			
GNSS02	1610767.209	-	332643.29	1890834.97	4738615.408	503.991	527.491
		6162880.224		8			

Distribución de los puntos de control y verificación

Ya con los mojones ajustados y georreferenciados se realizó el ajuste de las coordenadas reales de los puntos obteniendo los datos reales los cuales se aprecian en la tabla 5. Cabe aclarar que los puntos de control se encuentran inmersos dentro de los 21 puntos, ya en la parte anterior se habló de cómo se seleccionaron.

Tabla 5 Coordenadas ajustadas puntos reales

PUNTOS REALES			
ID_PUNTO	Norte	Este	Elevación
1	1891242.891	4738455.653	489.681
2	1891166.265	4738457.704	487.743
3	1891146.451	4738555.325	493.01
4	1891141.866	4738672.058	497.544
5	1891072.954	4738639.317	494.562
6	1891072.8	4738547.989	489.988
7	1891060.019	4738457.471	489.053
8	1890954.417	4738453.192	495.644
9	1890961.226	4738555.478	495.005
10	1890960.07	4738654.745	497.237
11	1890952.146	4738735.659	498.077

12	1890858.121	4738746.099	502.672
13	1890861.928	4738657.338	501.398
14	1890859.368	4738554.967	499.921
15	1890859.334	4738454.733	494.968
16	1890763.005	4738455.663	494.96
17	1890757.838	4738553.969	496.873
18	1890752.426	4738654.774	496.345
19	1890759.578	4738755.416	500.943
20	1890661.448	4738756.198	498.499
21	1890654.697	4738651.826	494.259

Tabla 6 Exactitud de posición absoluta según GSD ortoimagen

GSD (M)	RMSER (M)	EXACTITUD HORIZONTAL CONFIANZA 95% (M)*	
0,1		0,3	0,52
0,2		0,6	1,04
0,5		1,5	2,6
1		3	5,2
2,5		7,5	13

Error de desplazamiento con un punto de control

Empezamos con los resultados que obtuvimos de cada uno de los procesamientos desarrollados, posterior a estas graficas encontraremos una con la comparación de los resultados obtenido con los dos softwares.

En la figura 1 y 2 se puede observar el error de desplazamiento de los diferentes puntos con los métodos empleados

Tabla 7. Error medio cuadrático

ERROR MEDIO CUADRÁTICO	PUNTO CONTROL 1 (M)	PUNTO CONTROL 3 (M)	PUNTO CONTROL 5 (M)
IGAC PILOT	0,288837728	0,053178501	0,021082992
FOIF PILOT	0,316387546	0,010308428	0,007623237
IGAC UGCS	0,544293964	0,02411316	0,020978089
FOIF UGCS	0,429776429	0,028388138	0,028212127

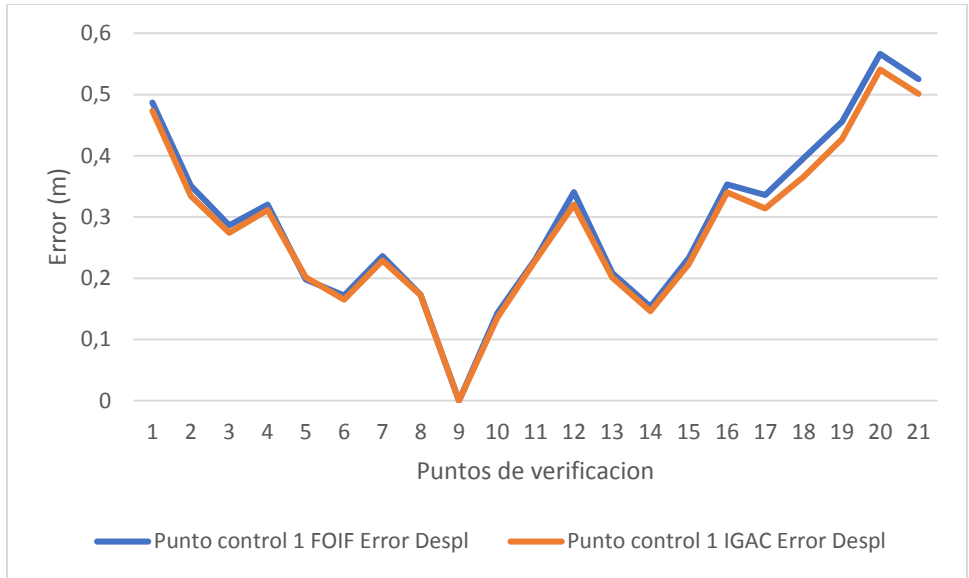


FIGURA 1. Error de desplazamiento con 1 punto de control, software de vuelo Pilot

En la figura 1 se ilustran las curvas de error calculado utilizando como software de vuelo pilot y un solo punto de control vemos que los errores de desplazamiento con respecto a los puntos replanteados no superan los 55 cm, las dos curvas tienen un comportamiento similar, pero la que genera un menor margen de error es el modelo generado empleando la antena el IGAC.

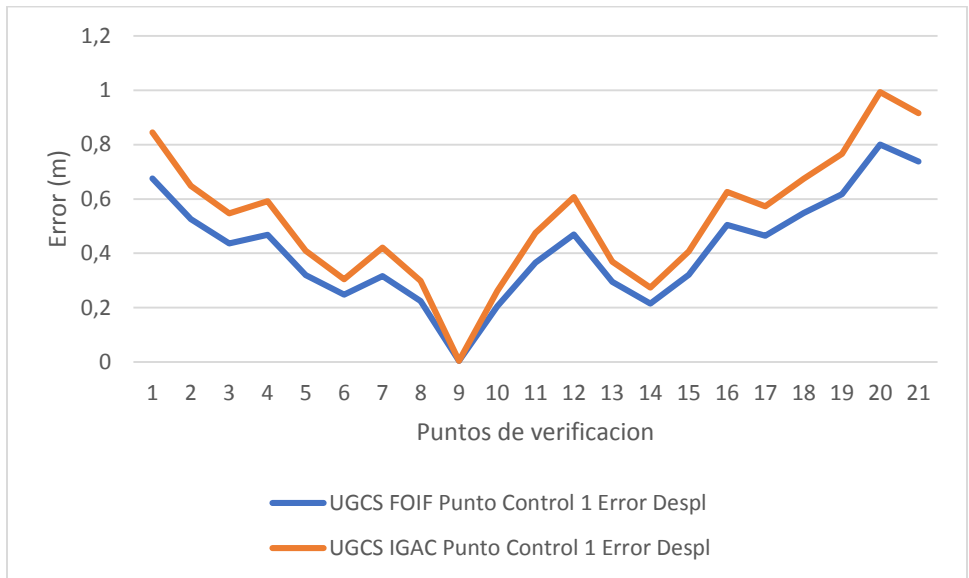


FIGURA 2. Error de desplazamiento punto de control 1, software de vuelo UGCS

En la figura 2 se ilustra los errores con un solo punto de control, empleando como software de vuelo UGCS, se evidencia que los errores se incrementaron llegando hasta 1 m en el punto 20, la diferencia del anterior los mayores valores de desplazamiento los da utilizando la antena del IGAC.

Error de desplazamiento con tres puntos de control

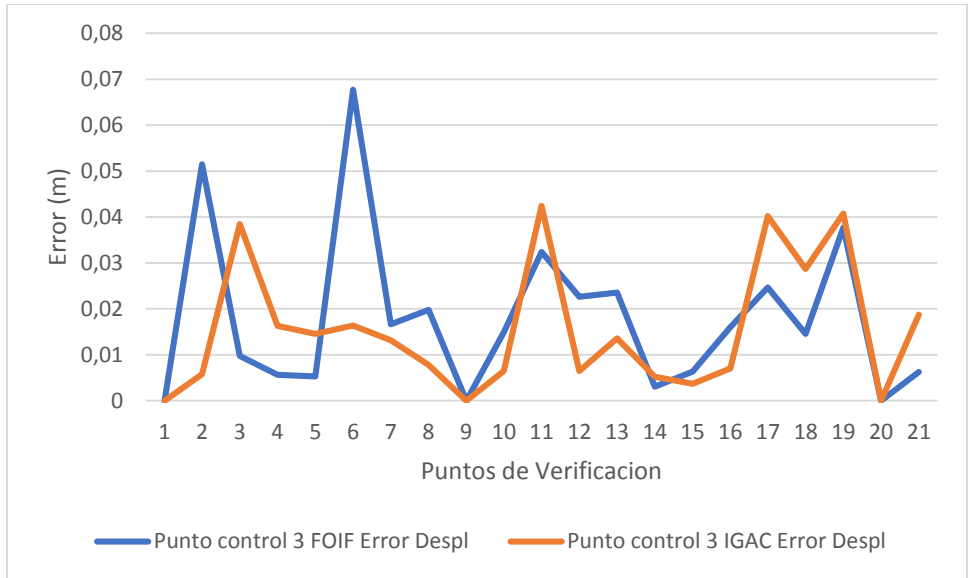


FIGURA 3. Error de desplazamiento punto de control 3, software de vuelo Pilot

En la figura 3 ya se evidencia menores márgenes de errores de desplazamiento, la implementación de tres puntos de control se estrechan los errores arrojados por los modelos generados. El error más alto se da empleando la antena FOIF, ese error no supera los 7 cm, en este método de tres puntos de control el modelo con menos errores se generó empleando la antena del IGAC, los errores más altos no superan los 4cm.

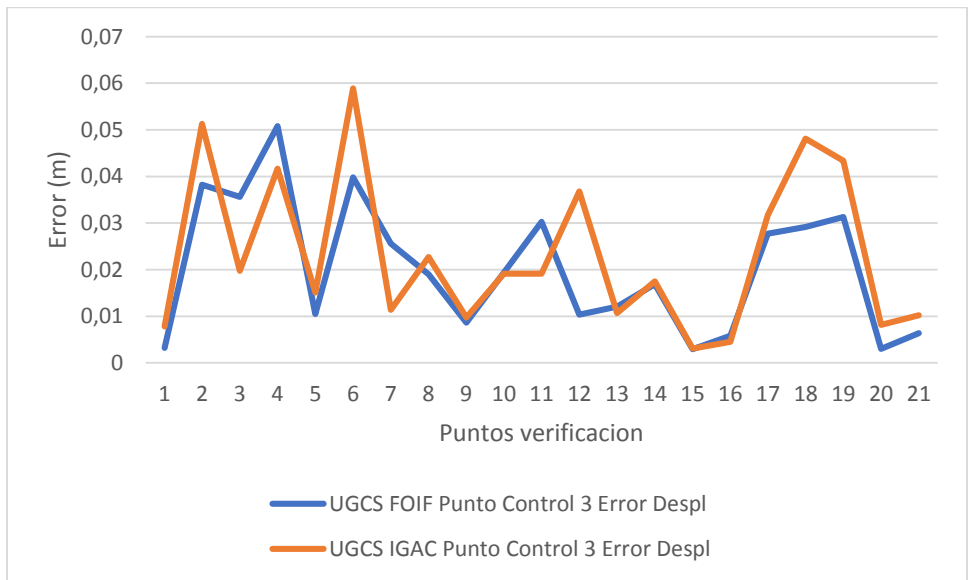


FIGURA 4. Error de desplazamiento con 3 puntos de control, software de vuelo UGCS

En la figura 4, se observan los errores que muestran los modelos, donde se emplea tres puntos de control y el software de vuelo UGCS; el máximo error de desplazamiento se encuentra en el punto 6, ese error no supera los 6cm. En este modelo se ajusta mejor el modelo obtenido cuando se emplea la antena FOIF A90.

Error de desplazamiento con cinco puntos de control

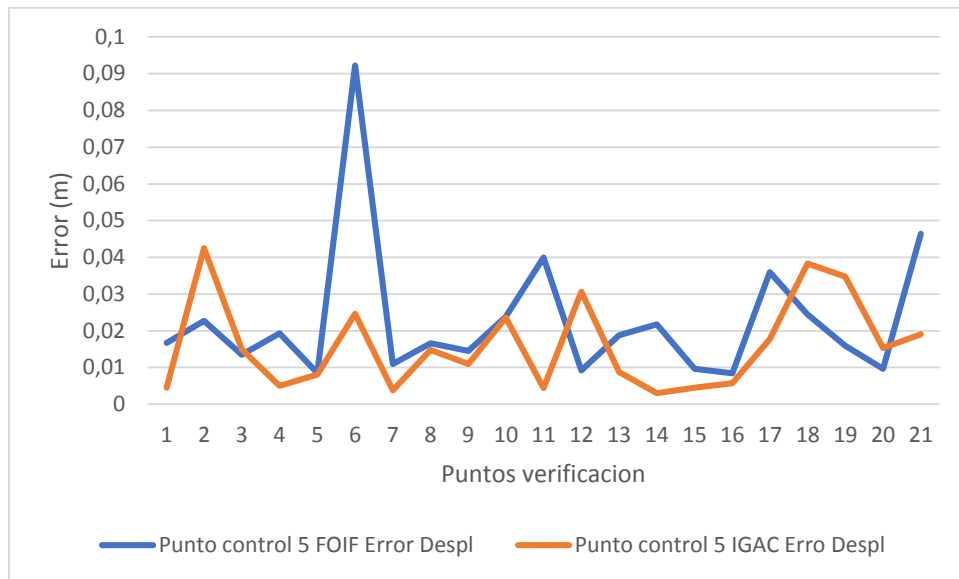


FIGURA 5. Error de desplazamiento con 5 puntos de control, software de vuelo Pilot

En la figura 5, se aprecia los errores de desplazamiento del modelo generado con el software de vuelo pilot implementando cinco puntos de control, en este en el punto con mayor error no supera los 9.5 cm, utilizando la antena FOIF A90. El modelo generado con la implementación de la antena activa del IGAC muestra menores errores de desplazamiento, los cuales no superan los 4.5 cm.

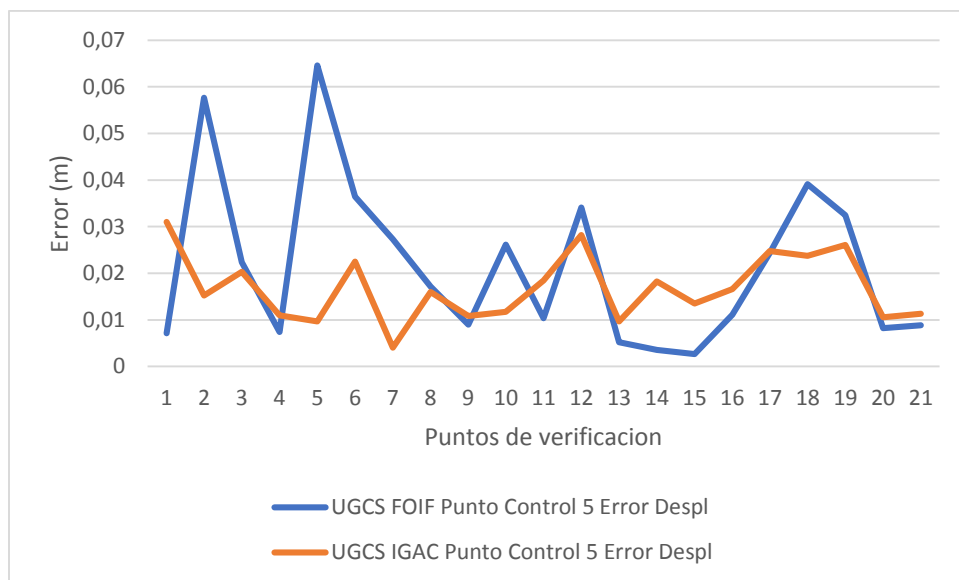


FIGURA 6. Error de desplazamiento con 5 puntos de control, software de vuelo UGCS

En la figura 6, se evidencia que los modelos generados con el software de vuelo UGCS, el que mejor se comporta es el generado con la implementación de la antena activa del IGAC, puesto que

los errores de desplazamiento no superan los 3.5cm, mientras que el modelo generado con la antena FOIF A90, el punto con mayor error está sobre los 6cm.

Error de desplazamiento calculado con cada método empleado

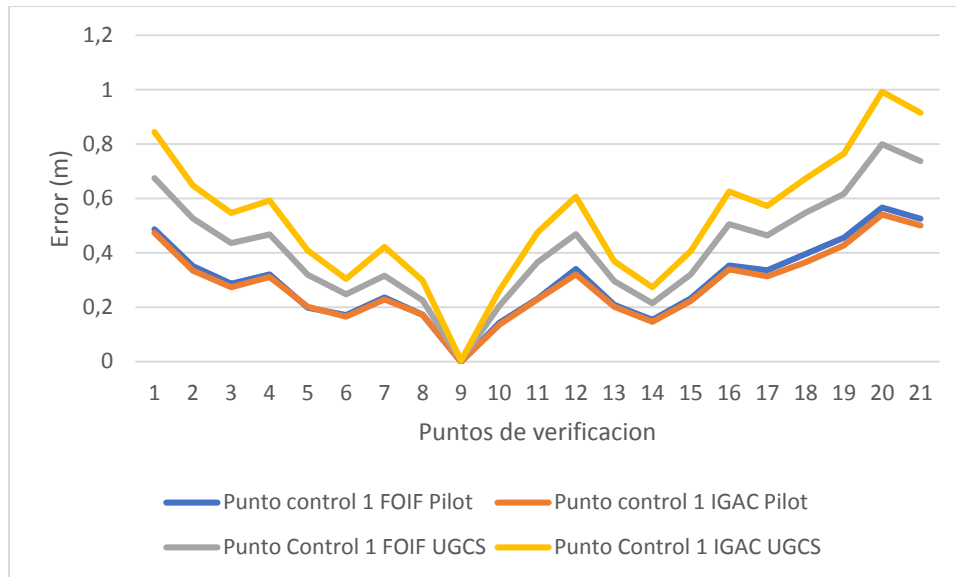


FIGURA 7. Error de desplazamiento de los modelos generados con solo un punto de control

La figura 7, muestra el resumen de todos los modelos generados utilizando los dos softwares de vuelo y los dos tipos de antenas empleadas en el proceso. Aquí los que menor error de desplazamiento muestra son los modelos generados con el software de vuelo Pilot.

En la figura 7 tenemos el resumen de todos los procesos desarrollados con un solo punto de control, al compararlos y ver en la tabla 7, el error medio cuadrático calculado según las ecuaciones planteadas por el IGAC en su resolución 471 del 2020, vemos que casi en su totalidad excepto el desarrollado con la antena del IGAC y software UGCS, cumplen con los requisitos en cuanto a exactitud horizontal establece el IGAC en la tabla 6. Dichos resultados son aceptables en este caso.

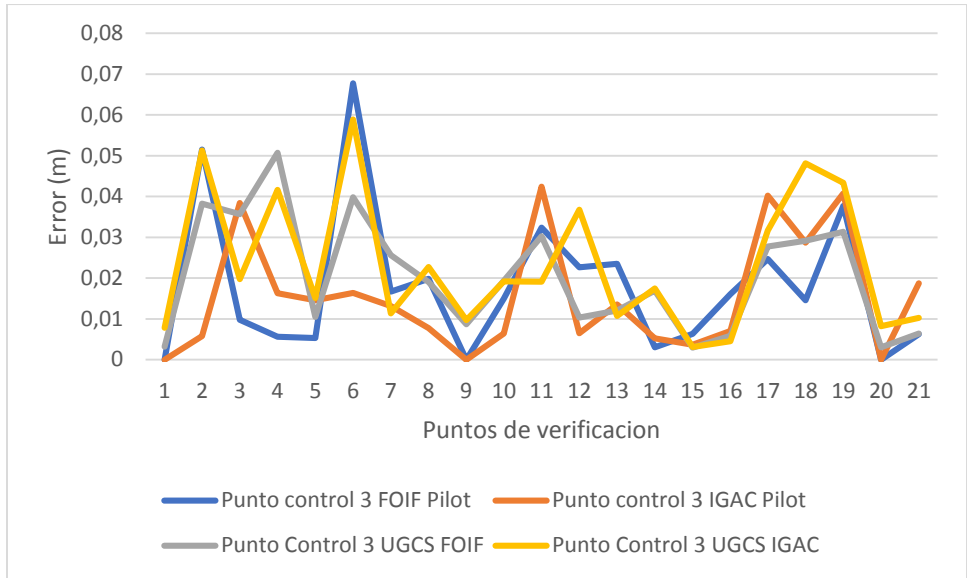


FIGURA 8. Error de desplazamiento de los modelos generados con 3 puntos de control

En la figura 8, se detalla los errores de desplazamiento de todos los modelos generados utilizando tres puntos de control. Aquí en comparación a los modelos con un solo punto de control los errores bajan, ajustándose aún más a la realidad, con errores que no superan los 7cm.

Cuando se observa la figura 7 vemos el comportamiento de cada uno de los puntos obteniendo resultados mucho mejores que utilizando solo un punto de control, y si observamos la tabla 7, donde se encuentra el error medio cuadrático de cada uno de los procesos, en este caso los obtenidos con los productos generados con los tres puntos de control, vemos que todos son por debajo de los aceptados por el IGAC en la tabla 6. Por lo que aquí nos estamos acercando a productos con mayores grados de exactitud. Ya que los errores medios cuadráticos están por debajo de los 3cm, productos que se acercan mucho más a la realidad del terreno.

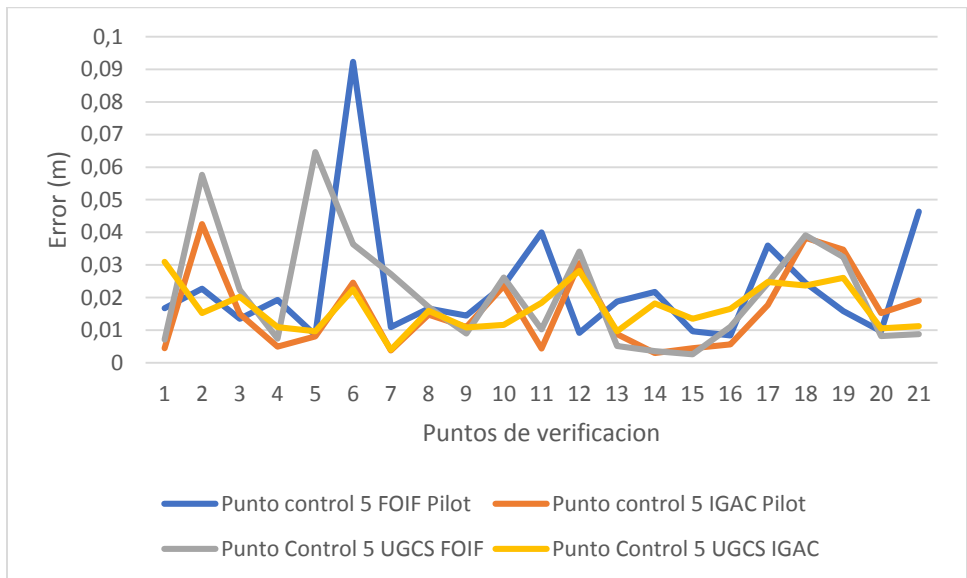


FIGURA 9. Error de desplazamiento de los modelos generados con 5 puntos de control

La figura 9, muestra los errores de desplazamiento de los modelos generados utilizando cinco puntos de control, aquí se destaca el modelo que mayor se ajusta a la realidad el generado con la utilización del software de vuelo UGCS y la antena activa del IGAC, puesto que los mayores errores no superan los 3 cm, lo cual representa una alta confianza del modelo generado.

Aquí en la figura 9 se obtienen productos que según la tabla 7, en los cálculos de los errores medio cuadráticos están por debajo de los requeridos por el IGA tabla 6, los productos generados demuestran tener mayor detalle, ya que dichos errores no sobre pasan los 3cm, algo muy similar a los productos obtenidos con los métodos de tres puntos de control.

Error de las alturas sobre el nivel del mar calculado con los diferentes métodos

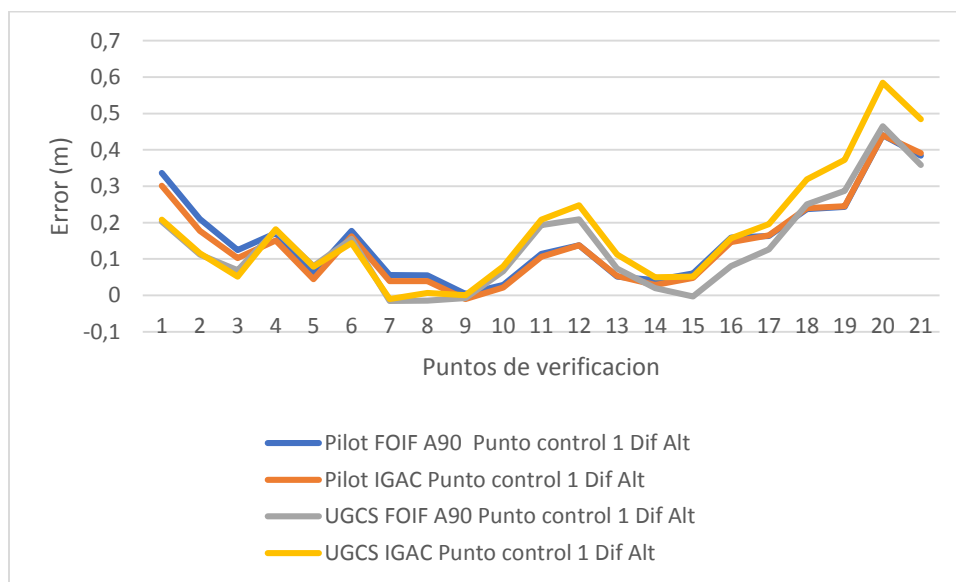


FIGURA 10. Error de la altura sobre el nivel del mar utilizando un solo punto de control

La figura 10, muestra como es el comportamiento del error de las alturas sobre el nivel del mar calculados con los diferentes modelos, aquí el comportamiento es similar, los errores están sobre los 60 cm. El modelo que más se ajusta a la realidad es el generado con el software de vuelo UGCS y la antena FOIF A90, el punto con mayor margen de error es el 20, el cual está sobre los 40 cm de error.

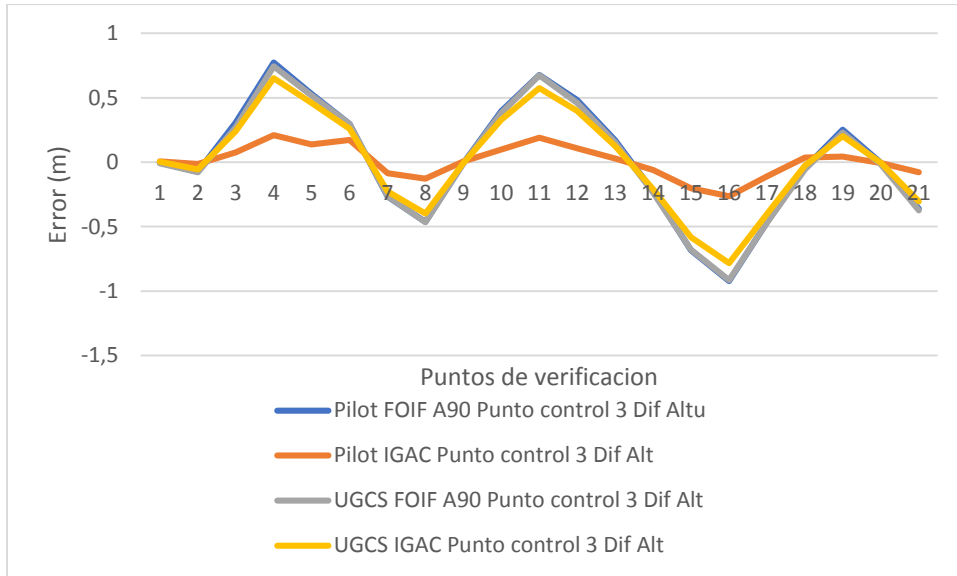


FIGURA 11. Error de la altura sobre el nivel del mar utilizando tres puntos de control

la figura 11, se detalla los errores en la horizontal de los diferentes modelos generados empleando tres puntos de control, se muestran errores que van casi hasta el metro de error, en el punto 16. El modelo que más se ajusta a la realidad es el generado con la implementación del software de vuelo Pilot y la antena activa del IGAC, los errores no superan los 27 cm en su punto más crítico que es el 16.

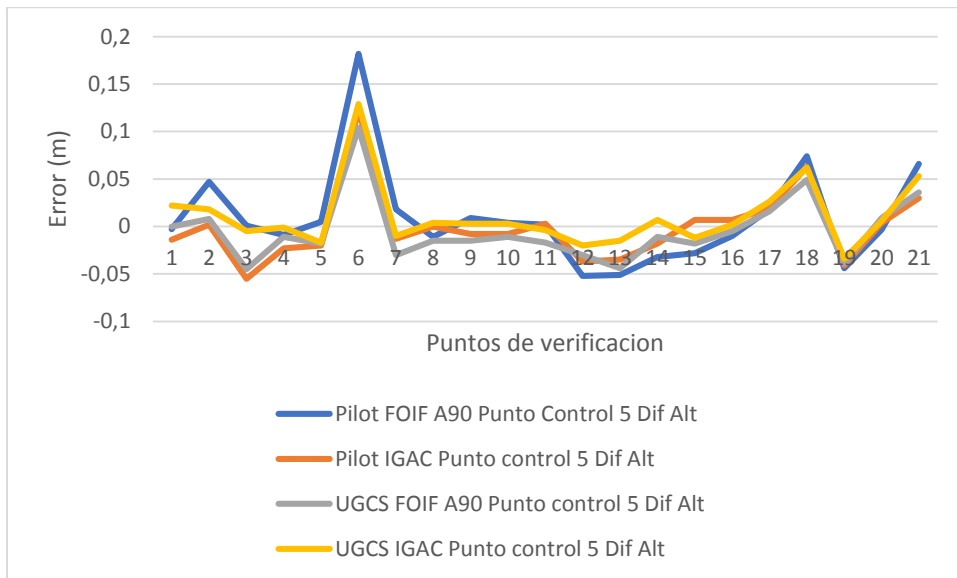


FIGURA 12. Error de la altura sobre el nivel del mar utilizando cinco puntos de control

Los modelos que menor error en la horizontal presentaron, fueron los generados con la implementación de cinco puntos de control, en la figura 12, se pueden evidenciar que los errores no superan los 20 cm, que para todos los modelos se presentó en el punto 6. El modelo más ajustado a la realidad fue el generado con el software de vuelo UGCS y la antena activa del IGAC.

CONCLUSIONES

La implementación de la metodología del IGAC para la georreferenciación de los puntos mojones en el lote de estudio posibilitó el trabajo con datos reales y georreferenciados, lo que garantiza una mayor precisión en la recopilación de información. Esto se logró gracias a la triangulación de los datos de navegación de la antena que rastreó durante el tiempo calculado de 90 minutos, en conjunto con la antena activa del IGAC, permitiendo un ajuste en las coordenadas de los puntos, lo cual permite el cumplimiento de los requisitos del IGAC, para los levantamiento y obtención de productos cartográficos en el territorio colombiano.

La implementación de la metodología PPK demuestra su eficacia al proporcionar resultados satisfactorios. Esta metodología ofrece ventajas significativas, como la agilidad en la toma de datos en campo y la capacidad de cubrir áreas extensas en levantamientos topográficos. Además, es especialmente adecuada para terrenos con relieves pronunciados, donde el sistema RTK podría enfrentar limitaciones. La precisión de la información obtenida mediante la metodología PPK es excelente, con errores medios cuadráticos que se mantienen en el rango de centímetros. Teniendo productos con 7 milímetros de error y otros con 54cm, aquí es donde se demuestra la necesidad de que haya puntos de control de manera bien distribuida en el terreno.

Los resultados de la evaluación de los softwares de vuelo son positivos, ya que los productos obtenidos muestran una precisión aceptable cumpliendo con los requisitos del IGAC. Sin embargo, es importante destacar que el software Pilot, cuando se utiliza en conjunto con la antena FOIF, presenta menor error medio cuadrático con 7 milímetros. En lo que respecta a la utilización de puntos de control, los modelos indican que los mejores resultados se lograron al emplear tres y cinco puntos de control ya que el modelo que mayor error medio cuadrático presentó fue de 5,3 cm, por lo que con la utilización de tres puntos de control es más que suficiente para obtener productos confiables con errores medios cuadráticos de centímetros, pero estos puntos tienen que estar distribuidos uno en el centro del terreno y los otros dos a cada extremo del terreno, lo cual garantiza que los productos obtenidos cumplen con los requisitos del IGAC.

REFERENCIAS

Abel Nájera Ramos, R. V. (Febrero de 2019). Propuesta metodológica para la generación de ortofotos y modelos digitales de elevación de alta resolución a través de vuelos con drones no-fotogramétricos. ResearchGate. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/331222864>

Furtado, M. F. (2003). Comparación de altimetría entre puntos obtenidos con GPS RTK y fotogrametría digital. Tesis Maestría, Universidad de San Carlos. Recuperado de <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-01102015-152915/es.php>

Helix North. (24 de enero de 2020). Helix North. Recuperado el 9 de junio de 2022, de <https://www.helixnorth.com/blog/sistema-georreferenciado-de-datos-rtk-y-ppk-cul-es-mejor>

Instituto Geografico Agustin Codazzi. (2004). Adopción del marco Geocéntrico Nacional de referencia Magna - Sirgas. <http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/4b831c00469f7616afeebf923ecdf8fe/adopcion.pdf?MOD=AJPERES>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (30 de mayo de 2018). Resolución 643 IGAC. Recuperado el 27 de abril de 2022, de https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/resolucion_igac_643-18_adopta_especificaciones_tecnicas_levantamientos_planimetricos_y_topograficos.pdf

Llano, M. R. (2019). Fotogrametría Digital terrestre de rango cercano aplicada como una herramienta de análisis en un basurero prehispánico del sitio arqueológico San Pedro, Sucre. Tesis de maestría, Universidad de Antioquia.

Muneta, M. R., Arbelo, J. M., & Jiménez, M. (2012). Gestión de bases de datos visuales empleando sistemas de información geográfica. DYNA Ingeniería e Industria, 87, 345-353. doi:10.6036/4428

Muro Morales, J. I., Urteaga, L., & Nadal, F. (2002). La fotogrametría terrestre en España (1914-1958). Investigaciones Geográficas, (27), 151-172. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17602707>

Nieto Ortega, J. J., Lara Castellanos, W., & Galindo Garzón, L. M. (2019). Elaboración de modelos digitales de terreno por medio de fotogrametría obtenida por tecnología drone, relacionado con el método convencional, en la intersección de la vía Saboyá-Sutamarchán con la ruta 45A, Boyacá - Colombia. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

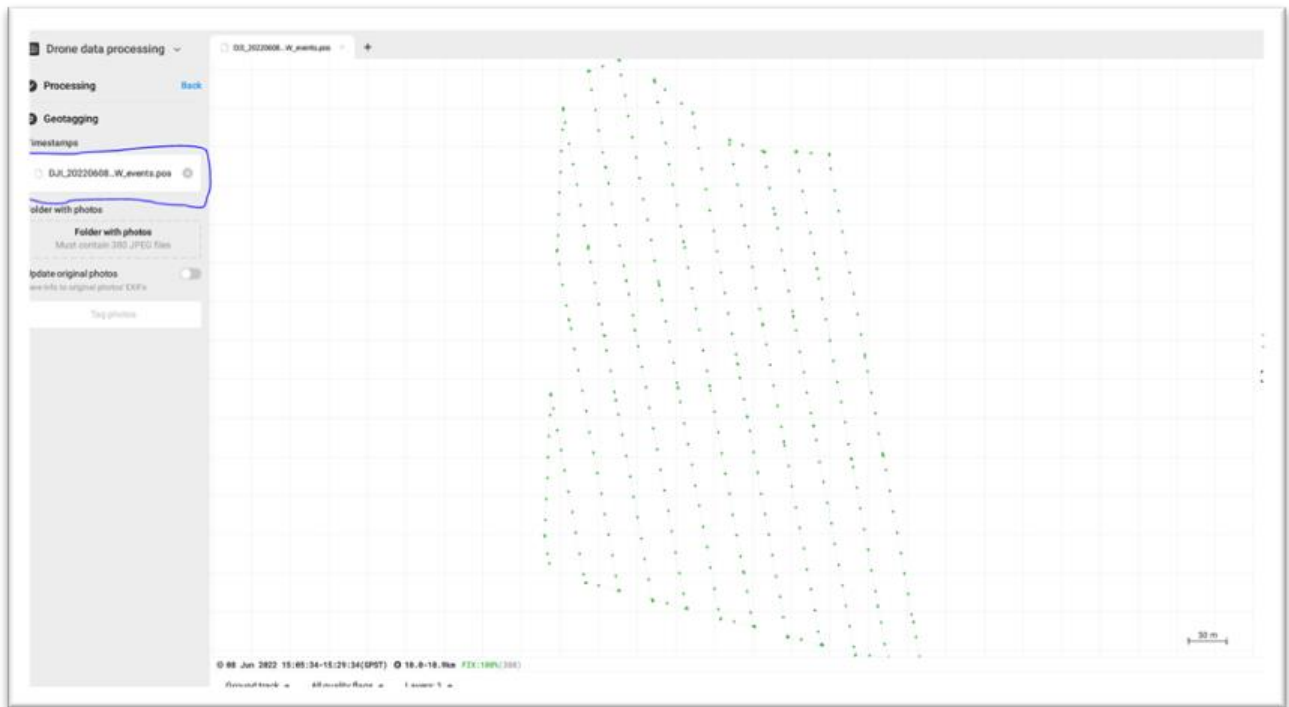
Tello-Cifuentes, L., Sotelo-Priego, M. A., & Martínez-Pérez, A. (2020). Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales. Tecnológicas, 24(50), e1686. doi:10.22430/22565337.1686

Oliveira, M. J. (2000). Aplicación de la fotogrametría para el registro y evaluación de defectos superficiales en pavimentos flexibles. Tesis de maestría, Universidad de Sao Paulo. Recuperado de <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-06032018-110728/es.php>

Settin Lugo, V., & Rosso, F. R. (2019). Comparación de resultados topográficos altimétricos en el relevamiento de una cantera, utilizando drone fotogramétrico, drone rtk/ppk y estación escáner. Montevideo: Universidad de la República Uruguay.

Viana, C. D. (2021). Fotogrametría digital multiescala para la adquisición de datos estructurales. Tesis de doctorado, Universidad de Sao Paulo. doi:10.11606/T.44.2021.tde-18012022-122057

ANEXOS



ANEXO 1. Geotiquetado de las imágenes



ANEXOS 2. Rastreo estático con equipo FOIF A90



ANEXOS 3. Replanteo de los puntos en campo.