DETERMINACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE ORTOMOSAICOS Y MODELO DIGITAL DE TERRENO (DTM) CAPTURADOS MEDIANTE EL USO DE PLATAFORMAS RPAS CON DIFERENTES MÉTODOS DE GEORREFERENCIACIÓN. EN EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE LA CALERA. CUNDINAMARCA

Presentado por:

Andrés Sebastián Avellaneda Estupiñán

Nicolas Alexander Viasus Valero

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Proyecto curricular Ingeniería Topográfica

Bogotá D.C., 2022

DETERMINACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE ORTOMOSAICOS Y MODELO DIGITAL DE TERRENO (DTM) CAPTURADOS MEDIANTE EL USO DE PLATAFORMAS RPAS CON DIFERENTES MÉTODOS DE GEORREFERENCIACIÓN. EN EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE LA CALERA. CUNDINAMARCA

Presentado por:

Andrés Sebastián Avellaneda Estupiñán **Cód: 20172732009**
Nicolas Alexander Viasus Valero **Cód: 20172732011**

Trabajo de grado presentado en la modalidad de monografía para optar por el título de:
Ingeniero Topográfico.

Director:

Julio Hernán Bonilla Romero
Ing. Civil; Msc. En Geomática

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Proyecto curricular Ingeniería Topográfica

Bogotá D.C., 2022

Nota aclaratoria

Artículo 117:

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas

No será responsable de las ideas expuestas

Por el graduado en el trabajo de grado

Según el acuerdo 029 de 1988.

Nota de aceptación

El comité de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas aprueba el trabajo de grado titulado "DETERMINACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE ORTOMOSAICOS Y MODELO DIGITAL DE TERRENO (DTM) CAPTURADOS MEDIANTE EL USO DE PLATAFORMAS RPAS CON DIFERENTES MÉTODOS DE GEORREFERENCIACIÓN. EN EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE LA CALERA. CUNDINAMARCA" en cumplimiento a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Topográfico.

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

Director: Ing. Julio Hernán Bonilla Romero

Agradecimientos

Quiero expresar el agradecimiento a mis padres, hermano y hermana por seguir de cerca todo mi proceso académico, brindando con total sinceridad su apoyo incondicional y las herramientas necesarias para la culminación de mis estudios, también a mi compañero de trabajo por todo el aprendizaje y complemento integral adquirido en estos años.

Igualmente, a los ingenieros Carlos Alfredo Rodríguez y Julio Bonilla Romero por todo el conocimiento, acompañamiento y experiencia transmitida en desarrollo del proyecto y mi formación académica, personal y profesional, también a la empresa eCompass SAS por el apoyo humano, logístico y brindarnos las herramientas que permitieron la ejecución del proyecto en su totalidad.

Finalmente agradecer a la Universidad Distrital y el proyecto curricular de ingeniería topográfica, sus administrativos, docentes y personal en general, que son los que hacen posible el acceso a educación de calidad a gran cantidad de personas que ven en la academia la única oportunidad de cambiar su vida y las de sus familias.

Sebastián Avellaneda.

En primera instancia agradezco a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por haberme permitido ser parte de tan gloriosa institución, de igual manera a los docentes quienes brindaron orientación y conocimiento durante el proceso.

Agradezco a los ingenieros Carlos Alfredo Rodríguez y Julio Hernán Bonilla Romero por brindar su experticia, conocimiento y disponibilidad en el desarrollo de este proyecto.

Finalmente agradecer a mi familia, compañeros, colegas y a todos quienes de una u otra manera aportaron y enriquecieron en mi formación profesional y personal.

Nicolas Viasus Valero.

Resumen

El desarrollo de estudios y procesos oficiales y/o privados relacionados con la topografía y la producción de cartografía debe estar ligado a los avances tecnológicos en cuanto a metodologías y equipos de captura. Las plataformas RPAS y diferentes métodos de georreferenciación forman parte de estas tecnologías y su uso es cada vez más frecuente en ingeniería, sin embargo, es importante medir el alcance y precisión de los productos obtenidos para contemplar su viabilidad en el desarrollo de proyectos de pequeña y mediana extensión, cumpliendo con especificaciones técnicas de calidad.

En el presente trabajo se tomó como referencia los procedimientos metodológicos y de calidad establecidos en especificaciones de uso nacional, como la resolución 471 y 529 de 2020 del IGAC sobre producción de productos cartográficos y la NTC6271 de 2018 sobre información geográfica y estudios topográficos, con el fin de determinar la exactitud posicional de productos fotogramétricos derivados de la captura con plataformas RPAS y por diferentes métodos de georreferenciación.

Se ejecutaron diferentes técnicas de georreferenciación, RTK y PPK en los vuelos fotogramétricos, que permitieron contrastar la precisión y calidad de los datos, así como la influencia de los puntos de control y verificación en tierra, para estimar la exactitud posicional de productos geográficos derivados de esta metodología de captura. De igual forma, se reflejan algunas recomendaciones y consideraciones para la captura y procesamiento de dicha información.

PALABRAS CLAVE: Exactitud Posicional, precisión, Ortofoto, DTM, fotogrametría, RPA, RTK, PPK, cartografía.

Abstract

The development of official and/or private studies and processes related to topography and the production of cartography must be linked to technological advances in terms of capture methodologies and equipment. RPAS platforms and different georeferencing methods are part of these technologies and their use is becoming more frequent in engineering, however, it is important to measure the scope and accuracy of the products obtained to contemplate their viability in the development of construction projects. small and medium extension, complying with quality technical specifications.

In the present work, the methodological and quality procedures established in specifications for national use were assumed as a reference, such as resolution 471 and 529 of 2020 of the IGAC on cartography production and NTC6271 of 2018 on geographic information and topographic studies, with in order to determine the positional accuracy of photogrammetric products from RPAS platforms by different georeferencing methods.

For this purpose, different georeferencing techniques were executed, such as RTK and PPK to an RPA flight, allowing to contrast the precision and quality of the data, as well as the influence of the ground control and verification points, in order to estimate the positional accuracy. of geographic products derived from photogrammetric processes. In the same way, some recommendations and considerations are reflected for the capture and processing of said information.

KEYWORDS: Accuracy, precision, RPA, RTK, PPK, cartography, Ortofoto, DTM, photogrammetry.

Tabla de Contenidos

Resumen ... 7
Introducción ... 14
Antecedentes ... 16
Justificación ... 19
Problema de investigación ... 21
Objetivos ... 22
General ... 22
Específicos ... 22
Marco teorico ... 23
Teledetección ... 23
Radiación electromagnética. ... 23
Espectro electro magnético. ... 24
Sensores remotos. ... 25
Tipos de cámaras ... 26
Plataformas de captura. ... 26
Vehículos Aéreos No Tripulados UAV ... 27
Fotogrametría ... 29
Parámetros del proceso fotogramétrico. ... 30
Proceso fotogramétrico. ... 33
Sistema de posicionamiento global (GNSS) ... 35
Principio básico de posicionamiento GNSS. ... 36
Métodos de posicionamiento GNSS. ... 37
Posicionamiento simple. ... 38
Posicionamiento diferencial. ... 38
Posicionamiento estático. ... 38
Posicionamiento estático. ... 39
Posicionamiento estático rápido. ... 39
Posicionamiento cinemático. ... 39
Posicionamiento cinemático “stop and go”. ... 39
Posicionamiento RTK (Real Time Kinematic). ... 40
Posicionamiento NTRIP (Networked Transporto f RTCM via internet protocol). ... 41
Posicionamiento Post-Processed Kinematic (PPK). ... 42
Evaluación de la exactitud posicional. ... 42
Métodos de evaluación de exactitud posicional ... 43
National Map Accuracy Standard (NMAS). ... 44
Engineering Map Accuracy Standard (EMAS). ... 44
National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA). ... 45
Spatial Accuracy Specification for Large Scale Topographic Maps (ASPRS). ... 46
Metodología ... 49
Planificación de captura de la información. ... 49
Zona de trabajo ... 50
Plan de vuelo ... 51
Puntos de control Terrestre ... 53

Puntos de verificación 54
Levantamiento de información. 56
Captura de fotografías aéreas con diferentes métodos de georreferenciación 57
Puntos de control terrestre y verificación 59
Procesamiento de la información 60
Procesamiento de fotografías método de georreferenciación RTK 61
Procesamiento de fotografías método de georreferenciación PPK 61
Procesamiento de coordenadas puntos de control y verificación 63
Cálculos de exactitud Posicional 64
Desarrolló de la propuesta 66
Captura de Fotografías 66
Ocupación puntos de control y verificación 68
Procesamiento de Fotografías Aéreas 71
Método de georreferenciación RTK NTRIP 71
Método de georreferenciación PPK 73
Procesamiento GNSS 76
Procesamiento Fotogramétrico 77
Cálculo de Exactitud Posicional 82
Analisis de resultados 88
Precisión relativa de las fotografías 88
Red de puntos de control y verificación. 92
Variación de coordenadas de las aerofotografías por método de georreferenciación 93
Variación de coordenadas ajustadas en la aerotringulación 95
Diferencia Absoluta de coordenadas por cada método de georreferenciación. 97
Error medio coordenadas ajustadas en la aerotringulación por cada método. 98
Cálculo de exactitud absoluta de posición con puntos de verificación. 99
Cálculo de exactitud absoluta de posición en puntos de control 105
Conclusiones 106
Recomendaciones 110
Bibliografia 112

Lista de tablas

Tabla 1 Numero de puntos de verificacion recomendados. 47
Tabla 2 Nivel de detalle de productos..... 47
Tabla 3 Exactitud absoluta de posición horizontal y vertical. 48
Tabla 4 Parámetros sistema de coordenadas local, Datum MAGNA. 61
Tabla 5 Captura aerofotografías planeadas y obtenidas. 66
Tabla 6 Estadística precisión aerofotografías método RTK 72
Tabla 7 Estadística precisión aerofotografías método PPK..... 76
Tabla 10 Resultado ajuste de puntos de control y de verificación..... 77
Tabla 11 Desviaciones estándar horizontales y verticales puntos ocupados. 77
Tabla 12 Parámetros de procesamiento fotogramétrico..... 78
Tabla 13 Resultados procesamiento fotogramétrico..... 78
Tabla 14 Exactitud posicional absoluta método PPK y GCP 83
Tabla 15 Exactitud posicional absoluta método PPK..... 84
Tabla 16 Exactitud posicional absoluta método RTK. 85
Tabla 17 RSME y precisión al 95% de confianza exactitud posicional. 86
Tabla 18 Exactitud posicional absoluta método PPK + GCP. 87
Tabla 20 Diferencias fotocentros ajustados método PPK y RTK..... 95
Tabla 21 Error procesamiento bloque fotogramétrico, método PPK + GCP, PPK y RTK. 98

Lista de Figuras

Figura 1 Espectro electromagnético. 25
Figura 2 Recubrimiento longitudinal de un bloque fotogramétrico. 31
Figura 3 Recubrimiento Longitudinal de un Bloque fotogramétrico. 31
Figura 4 Arreglo matricial de una imagen. 32
Figura 5 Orientación interna de la imagen. 34
Figura 6 Medición por GNSS 36
Figura 7 Clasificación métodos de observación GNSS. 38
Figura 8 Posicionamiento geodésico mediante RTK. 40
Figura 9 Protocolo de comunicación NTRIP. 41
Figura 10 Relación entre Exactitud o veracidad y precisión. 43
Figura 11 Metodología general del proyecto. 49
Figura 12 Planificación de captura de la información. 50
Figura 13 Casco urbano municipio la Calera-Cundinamarca. 51
Figura 14 Plan de vuelo. 52
Figura 15 Plan de vuelo, vista tridimensional. 52
Figura 16 Líneas de vuelo y puntos de control terrestre GCP. 53
Figura 17 Representatividad de puntos de verificación de acuerdo al polígono de vuelo. 55
Figura 18 Aleatoriedad puntos de verificación. 56
Figura 19 Levantamiento de información. 57
Figura 20 Corrección diferencial. Ejecución plan de vuelo. 58
Figura 21 Ocupación vértice geodésico IGAC. 58
Figura 22 Punto de verificación VER19. Demarcación en campo. 59
Figura 23 Ocupación punto de verificación VER19. 60
Figura 24 Procesamiento datos PPK 62
Figura 25 Resultados de procesamiento de datos PPK. 62
Figura 26 Procesamiento líneas base GNSS. 64
Figura 27 Formato cálculo de exactitud posicional absoluta. 65
Figura 28 Líneas de vuelo, Vuelo fotogramétrico No 1 67
Figura 29 Líneas de vuelo, Vuelo fotogramétrico No 2 67
Figura 30 Líneas de vuelo, Vuelo fotogramétrico No 3 68
Figura 31 Puntos de control finales. 69
Figura 32 Puntos de verificación finales. 70
Figura 33 metadatos aerofotografías 71
Figura 34 Solución RTK aerofotografías 73
Figura 35 Procesamiento PPK aerofotografías vuelo 1. 74
Figura 36 Procesamiento PPK aerofotografías vuelo 2 74
Figura 37 Procesamiento PPK aerofotografías vuelo 3 75
Figura 38 Resultados procesamiento PPK aerofotografías. 75
Figura 39 Precisión orientación externa bloque fotogramétrico. 79
Figura 40 Precisión orientación externa bloque fotogramétrico 79
Figura 41 Ortomosaico final. 80
Figura 42 Nube de puntos clasificada. 81
Figura 43 Modelo Digital de Terreno DTM. 81
Figura 44 Media precisión fotografías por el método RTK y PPK. 89
Figura 45 Precisión horizontal de las fotografías por el método RTK y PPK. 90

Figura 46 Precisión vertical de las fotografías por el método RTK y PPK 91
Figura 47 Desviación estándar conjunto de datos CDR 92
Figura 48 Desviación estándar puntos de control y verificación. 93
Figura 49 Diferencia de coordenadas RTK y PPK. 94
Figura 50 Diferencias coordenadas crudas PPK y RTK 94
Figura 51 Fotocentros ajustados aerotringulación 96
Figura 52 Diferencias fotocentros ajustados PPK + GCP respecto al método RTK y PPK. 97
Figura 53 Error procesamiento bloque fotogramétrico, método PPK + GCP, PPK y RTK. 99
Figura 54 Evaluación de exactitud posicional NSSDA, Métodos RTK, PPK y PPK y GCP..... 100
Figura 55 Residuales exactitud posicional test NSSDA 101
Figura 56 Residuales exactitud posicional y desviación de puntos de verificación 102
Figura 57 Residuales evaluación exactitud posicional NSSDA, horizontal y vertical 104
Figura 58 Evaluación exactitud posicional NSSDA sobre puntos de control y verificación. 105

Introducción

Las plataformas RPAS han presentado un crecimiento exponencial en cuanto al alcance y calidad de productos derivados de procesos fotogramétricos, además de la inclusión de diferentes métodos de georreferenciación para la captura de aerofotografías. Su uso es cada vez más frecuente en la ingeniería y así mismo en procesos cartográficos oficiales, sin embargo, es importante dimensionar el alcance contemplando aspectos técnicos y estándares oficiales que permitan analizar su viabilidad en el desarrollo de proyectos de pequeña y mediana extensión

Para cuantificar y determinar la calidad de productos fotogramétricos y topográficos existen varios métodos, uno de estos es el cálculo de la exactitud absoluta de posición, el cual cuantifica la proximidad de valores extraídos respecto a un sistema de referencia asumido como real. En este trabajo se estimará la exactitud posicional de Ortomosaico y modelo digital de terreno por diferentes técnicas de georreferenciación, generados a partir de métodos fotogramétricos capturados mediante el uso de plataformas RPAS en un área de 465 ha en el municipio de la Calera – Cundinamarca.

En el desarrollo de este proyecto se tendrán como referencia los procedimientos metodológicos y de calidad establecidos en especificaciones de uso nacional, como lo es la resolución 471 y 529 de 2020 del IGAC sobre producción de cartografía y la NTC6271 de 2018 sobre información geográfica y estudios topográficos, esta última teniendo como base los estándares internaciones de precisión posicional para datos geoespaciales de la ASPRS.

Los resultados obtenidos permitirán contrastar con los requerimientos de calidad establecidos en estas resoluciones, y de esta manera ofrecer una alternativa viable en el desarrollo de proyectos de esta índole a profesionales, estudiantes y entidades públicas y/o privadas.

Antecedentes

El uso de plataformas RPA (Remote Pilot Aircraft) ha tenido un auge y desarrollo exponencial en los últimos años gracias a las ventajas y posibilidades que estos ofrecen en diferentes ámbitos de la ingeniería, medio ambiente, cartografía entre otros. Sin embargo, en el campo de la producción cartográfica su vinculación ha sido restringida por la incertidumbre en la precisión y exactitud de los productos generados.

En este sentido, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se han desarrollado algunos trabajos de grado para proporcionar una visión acertada desde la academia sobre las precisiones y exactitudes que estas plataformas brindan a la producción cartográfica, los cuales son descritos a continuación.

Mediante el trabajo de grado "ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA DEL CASCO URBANO DE SAN ALFONSO – HUILA UTILIZANDO TECNOLOGÍA RPAS", (Catherin Lizeth Castillo C & Jessica Andrea Escobar R, 2017) describen un procedimiento técnico para la generación de cartografía a escala 1:2000 mediante plataformas RPAS bajo las normas técnicas establecidas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. En él se concluyen algunas consideraciones técnicas acerca del desarrolló técnico. Sin embargo, no se determinaron parámetros de exactitud posicional.

(ANDRES FELIPE CASTRO TOVAR & JEISON EDUARDO URREGO FUQUENE, 2018), en su trabajo de grado "EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN GENERADA CON RPAS- (REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEM)" realizaron una comparativa entre diferentes parámetros de vuelo tal como la altura de vuelo AGL. el recubrimiento lateral y longitudinal de las líneas de vuelo y con diferente cantidad de puntos de control, así mismo bajo diferentes características

topográficas (Relieve), determinando la precisión de los componentes XY y Z bajo los diferentes escenarios allí planteados.

Por otra parte, (María Alejandra Guzmán Tunaroza & Paula María Rincón González, 2017) mediante el trabajo de grado "LEVANTAMIENTO CON EL SISTEMA DE AERONAVE PILOTEADA REMOTAMENTE (RPAS) DEL PREDIO AGUAS CLARAS EN EL MUNICIPIO VILLAVIEJA – HUILA" realizaron la actualización cartográfica de un predio para la delimitación de linderos bajo los estándares requeridos por el INCODER.

Y Finalmente (JUAN SEBASTIAN ALVAREZ LOPEZ, 2021) mediante el trabajo de grado "PLANEACIÓN TOPOGRÁFICA PARA RECTIFICACIÓN DE LINDEROS A TRAVÉS DE LEVANTAMIENTOS RTK, NTRIP Y VUELOS RPAS" sintetiza las consideraciones a tener en cuenta por parte de un profesional en las áreas de la cartografía para la recolección de información espacial mediante técnicas RTK y RPA bajo las resoluciones vigentes del IGAC. Sin embargo, no se concluye acerca de la precisión y exactitud obtenida en la ejecución de este tipo de proyectos.

Adicionalmente (Arico Ortiz Sebastián Ricardo, 2021) en su trabajo de grado "EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL EN ORTOFOTOS A ESCALA 1:5.000 GENERADAS CON PROGRAMAS FOTOGRAMÉTRICOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DRONES" de la Universidad Central de Ecuador, determina la exactitud posicional obtenida sobre productos fotogramétricos empelando diferente software y sus ventajas y desventajas sobre los mismos.

En relación a estos proyectos desarrollados desde la academia, es importante analizar de forma puntual los beneficios de esta tecnología en el desarrollo de posibles proyectos oficiales, siguiendo los estándares de captura, procesamiento y calidad de los productos en un escenario similar a las condiciones para las cuales se proyecta el uso de estas tecnologías, estableciendo referencias

complementarias a lo desarrollado anteriormente y posibles nuevos análisis que se puedan derivar de ello.

Justificación

En el desarrollo de procesos oficiales de cartografía y estudios catastrales en Colombia, se definieron requerimientos técnicos de calidad para ortofotografías y modelos digitales de terreno con sensores transportados por aeronaves tripuladas, para la captura de imágenes de gran y mediano formato, muestra de ello son las especificaciones técnicas de cartografía básica del año 2016 y la NTC 6271 (ICONTEC, 2018). Con el surgimiento de nuevas tecnologías como las plataformas RPAS, en el año 2020 mediante la Resolución 471 y su modificación parcial en la resolución 529 de 2020, el IGAC amplía el uso de diferentes metodologías de captura siempre y cuando se cumplan con los estándares de calidad y exactitud absoluta de posición. Sin embargo, este tipo de tecnologías ofrecen alternativas de georreferenciación diferentes a las convencionales que podrían cumplir con los estándares antes mencionados.

Desde el surgimiento de estas plataformas orientadas a la captura de información de carácter cartográfica y topográfica se han desarrollado diferentes investigaciones y proyectos dirigidos a cuantificar, evaluar la precisión y exactitud de los Ortomosaico y modelos digitales de elevación derivados de esta tecnología (Zhang et al., 2019). Con la reciente publicación de estas resoluciones oficiales, dirigidas al desarrollo de proyectos de gran importancia para el país, es significativo estimar la exactitud posicional de dichos productos con el uso de vehículos aéreos no tripulados y sensores de última tecnología que permitan dimensionar su alcance en relación a los requerimientos técnicos de calidad.

En cuanto a la determinación de la exactitud posicional, en el tiempo han evolucionado los diferentes métodos, desde el método NMAS en 1947, el EMAS en 1983 y el más reciente NSSDA en el cual se basa el estándar ASPRS, estándar internacional y de obligatorio cumplimiento en EEUU. y en el cual se basan los estándares de la NTC6271 y la resolución 471 y 529 del IGAC,

motivo por lo cual se estimará la exactitud horizontal del orto mosaico y vertical del MDT en referencia a estas especificaciones. También se desarrollarán las metodologías y recomendaciones expuestas en la (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015) y la Guía Para la Evaluación de la Exactitud Posicional de Datos Espaciales del Instituto Panamericano de Geografía e Historia del año 2017, en cuanto a trabajo de campo y oficina, cantidad y distribución de puntos de evaluación y los aspectos estadísticos a considerar.

Considerando las condiciones físicas y características representativas del territorio colombiano, se estableció como zona de estudio en el presente proyecto el casco urbano del municipio de la calera Cundinamarca, teniendo en cuenta la variabilidad de su superficie y su configuración, siendo referencia para proyectos que se requieran desarrollar en otros municipios del país.

Problema de investigación

El escenario actual del país, en referencia a los procesos de actualizaciones catastrales y cartográficas, generan que se contemple el uso de nuevas tecnologías y metodologías de trabajo que permitan optimizar tiempos de ejecución, procesamiento, logística y costos de los proyectos, encontrando en la tecnología RPAS un recurso accesible y de mayor oferta, dada su evolución en cuento a equipos, sensores, software de procesamiento y precisión esperada de la información, sin embargo, la calidad de los productos prevalece sobre el método y/o equipo, motivo por el cual es importante realizar ejercicios prácticos siguiendo los lineamientos metodológicos y especificaciones técnicos de calidad de las entidades oficiales que regulan este tipo de proyectos para de esta forma establecer el alcance del uso de este tipo de tecnología.

Por lo mencionado anteriormente, el presente proyecto planteo el desarrollo de una serie de actividades que buscan dimensionar el alcance de los productos derivados del uso de tecnología de captura de fotografías con RPAS y métodos modernos de georreferenciación, específicamente en cuento al cumplimiento de la exactitud absoluta de posición y desde allí poder plantear alternativas o identificar aspectos a considerar en futuros proyectos de esta índole.

Objetivos

General

Determinar la exactitud absoluta de posición en Ortomosaicos y Modelos Digitales de Terreno, generados de la captura de fotografías con plataformas RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) y los métodos georreferenciación PPK (Post Processed Kinematic) Y RTK (Real Time Kinematic), en aproximadamente 465 hectáreas del municipio La Calera - Cundinamarca.

Específicos

1. Establecer la metodología de captura de información geodésica y fotogramétrica de acuerdo a recomendaciones teóricas y prácticas de entidades oficiales y las condiciones propias de la zona de estudio.
2. Determinar un conjunto de datos de referencia jerárquico superior CDR mediante técnicas como insumo para el procesamiento de información fotogramétrica y de evaluación de calidad sobre los productos finales.
3. Capturar las aerofotografías por métodos de georreferenciación RTK y PPK con el equipo RPA ebeeX para posterior procesamiento fotogramétrico y generación de productos en el software Agisoft Metashape.
4. Analizar los resultados y comparaciones derivadas del cálculo de exactitud absoluta de posición horizontal y vertical de acuerdo a lo establecido en la resolución 471 y 529 del IGAC y la NTC 6271 sobre las ortofotos y los modelos digitales de terreno.

Marco teorico

Teledetección

La Teledetección conocida como “Remote Sensing” es la técnica por la cual se captura, procesa y analiza información terrestre mediante imágenes obtenidas por sensores remotos a través de la interacción de energía por una fuente natural como el sol o una fuente artificial, entre el dispositivo y la superficie objeto de estudio.

En este sentido desde la captura hasta el producto final existe un sistema de teledetección, el cual abarca: (i) Fuente de energía, necesaria para capturar la información a través de la anteriormente escrita interacción energética en donde se contemplan dos tipos. (Sensores pasivos y sensores activos); (ii) Superficie terrestre, la cual absorbe la energía del sensor y la refleja de acuerdo a su firma espectral; (iii) Sistema sensor. Compuesto por el sensor de captura, la plataforma que lo transporta y el dispositivo que transmite la información; (iv) Sistema de recepción y comercialización, es el conjunto que recibe la información, procesa, transforma, almacena y distribuye en formatos analizables por el analista y consumidor final. (Chuvieco, 1990)

Radiación electromagnética.

Según (Chuvieco, 1990) La energía se propaga en el vacío en forma de onda de manera continua y armónica a la velocidad de la luz, las características físicas de las ondas son longitud de onda; distancia entre los picos y la frecuencia; Número de ciclos en una unidad de tiempo determinada. Estos parámetros son inversamente proporcionales a la velocidad de la luz, por lo cual se define como ecuación elemental. Tal como se muestra en la ecuación (1).

$$c = \lambda F \qquad (1)$$

Donde c es velocidad de la luz, λ es longitud de onda y F la frecuencia.

De lo anterior, se infiere que a mayor longitud de onda habrá una menor frecuencia y viceversa, Así mismo a partir de la teoría cuántica, la energía que transmite un fotón está determinada por la siguiente ecuación.

$$Q = h\,F \qquad (2)$$

En donde se tiene que Q hace referencia a la energía radiante por un fotón, F la frecuencia y h la constante de Planck. Con base en la ecuación (1) y (2) se concluye que a mayor longitud de onda (o menor frecuencia) la cantidad de energía radiada será menor. Por tanto, para espectros de una longitud de onda amplía su detección será de mayor complejidad requiriendo de sensores más sofisticados.

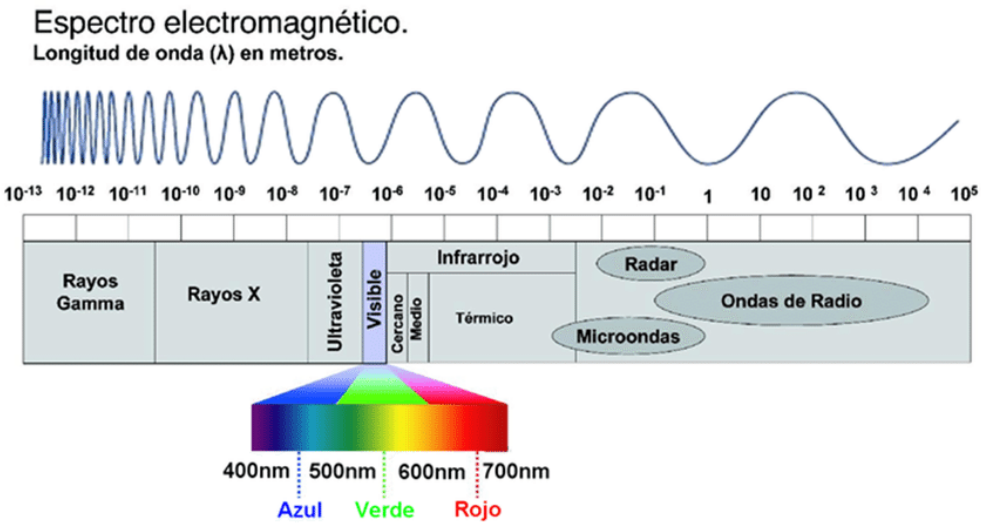
Espectro electro magnético.

De acuerdo con (Chuvieco, 1990) a partir de los principios físicos de las ondas se puede describir y categorizar ampliamente los diferentes tipos de energía que se presentan en el universo. Esta categorización se le conoce como espectro electromagnético (Figura 1), el cual abarca consecutivamente diferentes frecuencias y longitudes de ondas agrupadas en bandas de acuerdo a sus características.

En el espectro electromagnético se encuentran continuamente las longitudes de onda más cortas como lo son los rayos X (< 10x10−9m), rayos Gamma (< 10x10−12m) hasta las longitudes de onda mayores como las telecomunicaciones.

Cabe resaltar el espectro visible comprendido entre los 400 hasta los 700 nanómetros, el cual es la región perceptible ante los ojos del ser humano integrado a su vez por las bandas comúnmente conocidas como RGB, en donde se encuentran rojo (Reed) 400 a 500 nm; verde (Green) que abarca desde los 500 nm hasta los 600 nm y azul (Blue) comprendido desde los 600 nm a los 700 nm.

Figura 1 Espectro electromagnético.



Fuente: Perla Marlene Viera-Gonzalez. Recuperado de: https://www.researchgate.net/

Sensores remotos.

Los dispositivos de captura de información tales como cámaras se clasifican a partir de la fuente de energía requerida para su funcionamiento. A estos se les conoce como Pasivos y Activos.

Un sensor Activo genera su propia fuente de energía sin depender del medio externo o una fuente de energía independiente, es decir que su funcionamiento es continuo sin sometimiento alguno del entorno.

Dentro de estos sensores los más comunes y ampliamente usados son el sistema LIDAR (Light And Detectión Ranging) y el sistema RADAR (radio detection and ranging). El rango de espectro electromagnético es de microondas.

Por otra parte. Un sensor pasivo requiere de una fuente de energía externa para su funcionamiento proveniente de la luz del entorno, el cual opera en el rango del espectro visible y del infrarrojo.

A partir de las imágenes obtenidas tanto de sensores pasivos como activos se genera cartografía temática a partir de procesos fotogramétricos y de tratamiento de datos espaciales a diferentes escalas. (Quiroga Velásquez et al., 2019, p. 14)

Tipos de cámaras.

Dentro de los sensores ópticos se encuentran fraccionados en dos grandes grupos como lo son las cámaras métricas y las cámaras no métricas. Por una parte, las cámaras métricas son empleadas en la producción de cartografía oficial de pequeña y mediana escala en donde sus parámetros como distancia focal, marcas fiduciales entre otros son de gran precisión y previamente se conoce la curva de distorsión del lente. Así mismo los parámetros de orientación interna son constantes y perdurables en el tiempo y en consecuencia su valor comercial es elevado.

Por otra parte, las cámaras no métricas son cámaras más accesibles al mercado dado que no son cámaras diseñadas con el propósito fotogramétrico y en consecuencia sus parámetros son de geometría variable de acuerdo al conjunto de datos capturado tal como la distancia focal y aún más impórtate la curva de distorsión del lente no se conoce lo cual en una comparación respecto a una cámara métrica tiende a reducir su precisión y aumentar las distorsiones.

Hoy en día las cámaras métricas son ampliamente usadas por vehículos aéreos no tripulados debido a sus ventajas en cuanto a costos, transportabilidad y adaptación a la plataforma.(Quiroga Velásquez et al., 2019)

Plataformas de captura.

En el contexto de la teledetección existen diferentes plataformas para los sensores remotos los cuales cada uno brinda unas ventajas y desventajas frente a otros y su uso, será determinado por la resolución requerida dentro del análisis.

Dentro de las plataformas se encuentran los satélites, los cuales son constantes en el tiempo dada su vida útil con una resolución temporal de 10 a 20 días de acuerdo al programa espacial (Landsat, Sentinel, Quickbird entre otros) funcionan con diferentes bandas electromagnéticas, es decir multiespectrales, permitiendo una mayor cantidad de análisis ambientales; La resolución espacial de estas imágenes suele ser muy amplia para programas oficiales abiertos en donde se encuentran desde 10 hasta 30 metros y programas privados con resoluciones desde 30 cm. La huella de la imagen abarca grandes extensiones.

Otra plataforma son los vuelos tripulados en donde se hace uso de cámaras métricas para la producción de cartografía temática y oficial de pequeña y mediana escala (> 1:25000). La resolución espacial a partir de estas plataformas se encuentra por debajo de los 3 m. A partir de un vuelo tripulado se abarcan grandes extensiones de terreno, sin embargo, su costo es elevado y requiere un vehículo aéreo convencional (helicóptero, avión).

Por otra parte, se encuentran los UAV (Unmanned Aerial Vehicle) los cuales son los más recientes y brindan grandes ventajas respecto a las plataformas anteriormente descritas. Logran brindar una alta resolución espacial de orden centimetrito (< 15 cm) y otorgar mayor precisión, así mismo sus costos son bajos respecto a un vuelo fotogramétrico tripulado. Sin embargo, su cobertura se encuentra limitada al alcance del equipo y autonomía de vuelo.

Vehículos Aéreos No Tripulados UAV

"un vehículo aéreo no tripulado es una aeronave sin piloto en el sentido del Artículo 8 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional, que vuela sin un piloto al mando a bordo y que se controla a distancia y plenamente desde otro lugar (tierra, otra aeronave, espacio) o que ha sido

programada y es plenamente autónoma".(ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL OACI, 2011, p. 3)

Los vehículos aéreos no tripulados UAV son aeronaves de uso militar y civil las cuales son controladas desde una estación en tierra y no cuentan con una tripulación a bordo; Estos vehículos han sido desarrollados a lo largo de los avances tecnológicos en términos de aeronáutica, computación y otras disciplinas que permitieron la integración de diferentes herramientas para realizar actividades industriales, comerciales, ingenieriles, vigilancia e investigación.

Se clasifican de acuerdo a sus características físicas, técnicas y de aplicación, sin embargo, la principal clasificación es el tipo de empuje de la aeronave, como lo es:

- Ala Fija: Son aeronaves que cuentan con un alta aerodinámica y un diseño emulativo a una aeronave tradicional con dos alas y generalmente una sola propela, su sustentación depende de la velocidad ejercida por sus motores o propelas en la parte posterior del equipo.

  Dadas sus condiciones aerodinámicas puede tener mayor autonomía de vuelo disminuyendo el consumo de energía en vuelo y en caso de pérdida de potencia tiene la capacidad de mantener sustentación y recuperarse, sin embargo, requiere de una amplia zona de aterrizaje, así como de despegue y sus costos son elevados respecto a otro tipo de drones.
- Ala Rotatoria: Son aeronaves de uno o más rotores de despegue vertical, en donde se destacan los cuadricópteros (cuatro rotores), hexacopteros (seis rotores) y los octacopteros (ocho rotores). Este tipo de drone es más estable respecto al tipo de ala fija debido a que el equipo en vuelo brinda mayor estabilidad y permite un vuelo

estacionario; Sin embargo, no cuenta con una gran aerodinámica lo cual disminuye la autonomía y el alcance del mismo.

- Drone VTOL (Vertical take-off and landing): Es un dron hibrido con despegue y aterrizaje vertical, el cual permite combinar la autonomía y aerodinámica de un drone tipo ala fija con la ventaja de maniobras de ascenso y descenso vertical suprimiendo la necesidad de grandes espacios para realizar vuelos.

Fotogrametría

La fotogrametría es una ciencia y técnica que busca determinar la ubicación, dimensiones y forma de un objeto o porción de terreno de manera precisa a partir de la correlación geométrica y matemática de dos o más fotografías consecutivas entre sí mediante estereoscopia[1], por lo cual se entiende como una serie de mediciones indirectas.(Santamaria Peña & Sanz Méndez, 1998)

A lo largo del desarrollo y avances tecnológicos en el ámbito, la fotogrametría según (Konecny, 2014) se clasifica en 4 categorías:

- Fotogrametría de una sola imagen (Single image photogrammetry): entre los años 1850 y 1900 se incursiona y desarrollan las primeras concepciones de realizar mediciones sobre fotografías.
- Fotogrametría análoga (Analogue stereo photogrametry): Fue el principio de la medición estereoscópica alrededor del año 1900 lo que permitió la automatización de la restitución.
- Fotogrametría analítica (Analytical Photogrametry): a partir de la década de 1950 el auge de sistemas computacionales permiten la automatización de procesos dirigidos

[1] *Estereoscopia: Es el principio físico por el cual se genera información tridimensional e ilusión de profundidad sobre un estereograma, una imagen 3D o estereográfica.*

por un intérprete y se desarrollan los primeros algoritmos de procesamiento de imágenes.

- Fotogrametría Digital (Digital Photogrametry): es la fotogrametría empleada en la actualidad en donde se hace uso de imágenes digitales en donde se realizan procesos de aerotringulación automatizada, derivación de modelos digitales de elevación, análisis e integración en sistemas GIS.

Con el uso creciente de UAV para la producción cartográfica las cámaras no métricas son ampliamente usadas, y en menor medida las cámaras fotogramétricas; Sin embargo, ello implica un diseño y proceso fotogramétrico diferente, especialmente en cuanto al recubrimiento se refiere.

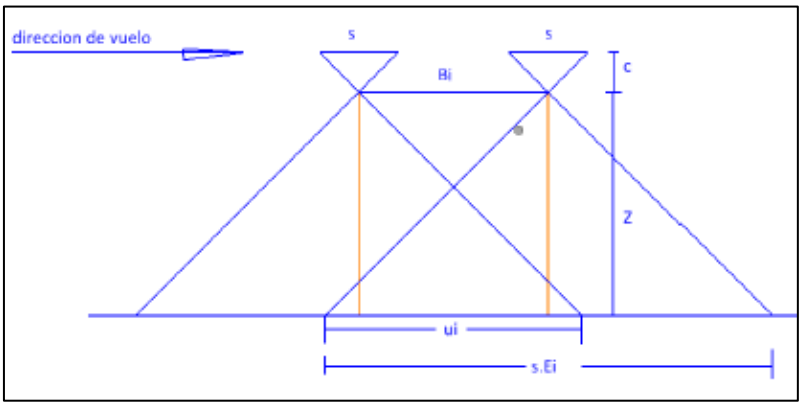
Este debe ser mayor respecto a la fotogrametría digital a partir de cámaras métricas dado que no se conoce la curva de calibración de la cámara, para disminuir las distorsiones sobre la imagen. En un proceso fotogramétrico mediante cámaras métricas, el recubrimiento es del 30% transversalmente y del 60 % longitudinalmente en las mayorías de las veces; a partir de cámaras no métricas se debe aumentar el recubrimiento desde un 65% hasta un 90% de acuerdo a las características del relieve.

Parámetros del proceso fotogramétrico.

Para la consecución de información espacial a partir de fotografías es necesario una serie de parámetros técnicos en la captura de la información; Estos parámetros principalmente son el recubrimiento, altura de vuelo, distancia focal entre otros los cuales a partir de estereoscopia y gracias a la fotogrametría digital correlación de puntos homólogos, se generan las respectivas orientaciones para ajustar los bloques fotogramétricos y por consiguiente conseguir el conjunto de datos tridimensionales.

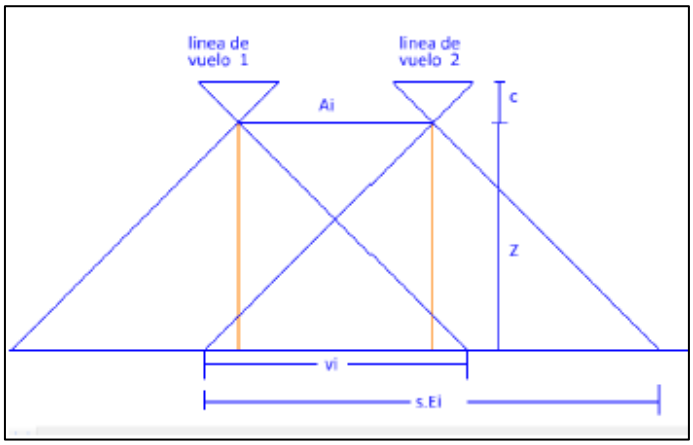
Dicha información se planifica previamente a partir de un vuelo fotogramétrico, el cual busca determinar el trayecto adecuado de la aeronave para obtener una consecución se imágenes traslapadas paralela y longitudinalmente, es decir, el recubrimiento. Esté expresado en términos porcentuales indica la cantidad homologa entre dos imágenes bien sea longitudinal como transversalmente(Quiroga Velásquez et al., 2019).

Figura 2 Recubrimiento longitudinal de un bloque fotogramétrico.



Tomado de: (Quiroga Velásquez et al., 2019, p. 26)

Figura 3 Recubrimiento Longitudinal de un Bloque fotogramétrico.

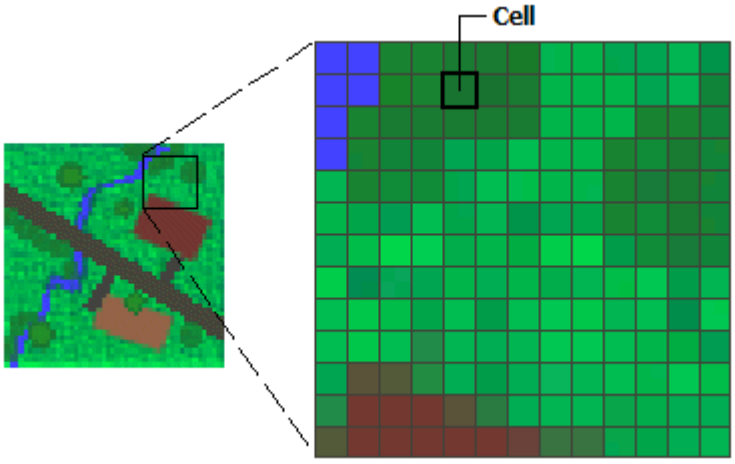


Tomado de: (Quiroga Velásquez et al., 2019, p. 26)

De acuerdo con la Figura 2 y Figura 3**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se aprecia que la separación entra cada fotografía está determinada matemáticamente por los parámetros antes mencionados; Altura de vuelo (z), distancia focal del sensor (c), ancho o lado de la fotografía (s) y el área abarcada por la misma. Estos parámetros determinarán la cantidad de líneas de vuelo e imágenes por cada una garantizando el recubrimiento adecuado para lograr generar el bloque fotogramétrico. Sin embargo, en el proceso fotogramétrico digital, se incluyen y adaptan los principios básicos en función del tamaño de pixel, el cual es la unidad mínima de almacenamiento en una imagen digital.

Los sensores digitales almacenan la información de manera matricial a través de pixeles, por lo cual de acuerdo a cada sensor se conoce el tamaño total del arreglo matricial (resolución de la imagen) y el tamaño de cada pixel. Por tanto, una vez definidos la cantidad de pixeles, el tamaño de un pixel y el área abarcada por una imagen a determinada altura de vuelo se podrá determinar el GSD (Ground Sample Distance).

Figura 4 Arreglo matricial de una imagen.



Fuente esri (2016) Recuperado de: https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm

El GSD es la distancia entre el centro de dos pixeles contiguos del mosaico fotogramétrico medido en el terreno cartografiado. De acuerdo a la escala deseada se determina el GSD, puesto que a un tamaño de pixel o GSD mayor menor será la resolución espacial y mayor la escala.

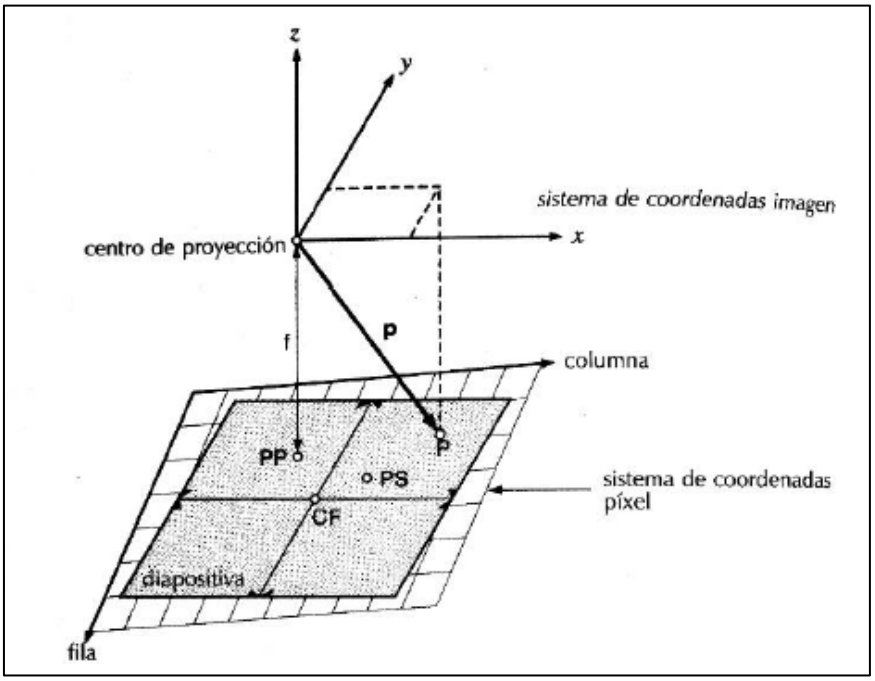
Proceso fotogramétrico.

A partir del plan de vuelo diseñado y consigo las imágenes capturadas y debidamente traslapadas de acuerdo a dicha planeación se procede a la generación de los modelos o bloques fotogramétricos; Para ello es necesario resolver y adaptar la geometría del espacio capturado a través de los fotogramas a la realidad de la superficie terrestre de manera concisa.

Lo anterior se logrará de acuerdo a la reconstrucción de los haces y puntos homólogos mediante orientaciones encadenadas entre sí, en las cuales los errores obtenidos durante cada etapa serán acumulativos. (Sánchez Sobrino, 2001, p. 15)

Inicialmente se requiere de la orientación interna. Esta consiste en determinar el focal (distancia principal), el cual es un parámetro constante de acuerdo a la calibración del objetivo, y el punto principal estableciendo una transformación del sistema matricial en pixeles (filas y columnas) a un sistema métrico expresado en milímetros cuyo origen será el punto principal de la fotografía. Consecuentemente se define la posición y la orientación angular de la imagen al momento de la captura también conocido como orientación externa.

Figura 5 Orientación interna de la imagen.



Tomado de: (Quiroga Velásquez et al., 2019, p. 41)

Posteriormente se lleva a cabo la orientación relativa; La cual busca correlación espacial y geométricamente las imágenes decretando los puntos homólogos para reconstruir los haces y finalmente conformar el modelo estereoscópico.

De acuerdo con (Quirós, 2014) esta reconstrucción se logra mediante la condición de coplaneidad. La cual establece que el centro de proyección de cada imagen en el par estereoscópico para un punto proyectado cualquiera en ambas imágenes se encuentra alineado en el mismo plano.

Finalmente, se realiza la orientación absoluta. En esta etapa se traslada el modelo fotogramétrico debidamente orientado en sus etapas previas a la posición espacial correspondiente, apoyándose de puntos de control terrestre, escalando y nivelando el modelo fotogramétrico a un datum especifico.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{pmatrix} + HR_{\Omega\phi K} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix} \quad (3)$$

En esta etapa, el problema se describe matemáticamente en un sistema de ecuaciones tal como se muestra en (3) en donde se debe trasladar y escalar el modelo desde un DATUM definido por el intérprete a partir de coordenadas arbitrarias (Xm Ym Zm) con un factor de escala del terreno (H) y sus respectivas rotaciones en los tres giros ($R_{\Omega\phi K,}$), obteniendo el modelo fotogramétrico ajustado y orientado de manera absoluta.(Quiroga Velásquez et al., 2019, p. 44)

Sistema de posicionamiento global (GNSS)

GNSS (Global navigation systems) es el término que enmarca la navegación satelital en el globo terráqueo el cual funciona de manera autónoma y con sistemas de aumentación. Este sistema permite determinar con exactitud la ubicación o posición en términos de coordenadas geográficas de manera continua y bajo las diferentes condiciones atmosféricas y climáticas. (Berné et al., 2014)

La cobertura mundial se consigue a partir de la distribución de varios satélites agrupados en una constelación. Normalmente una constelación cuenta con 24 a 27 satélites distribuidos en planos orbitales a diferentes alturas. De acuerdo a la altura en que se encuentre requerirá de mayor frecuencia y potencia de la señal, sin embargo, se ha determinado que a una altura media (21000 km aproximadamente) se consigue una cobertura mundial con pocos satélites (aproximadamente 21).

La constelación de mayor uso y trayectoria es la NAVSTAR-GPS (Global Position System) desarrollada por E.E.U.U. en la década de los 60, la cual cuenta con 24 satélites a una altura media de 20.200 km y un periodo de 12 horas (Koolhaas, 2003). Simultáneamente la constelación GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) es bastante similar respecto a

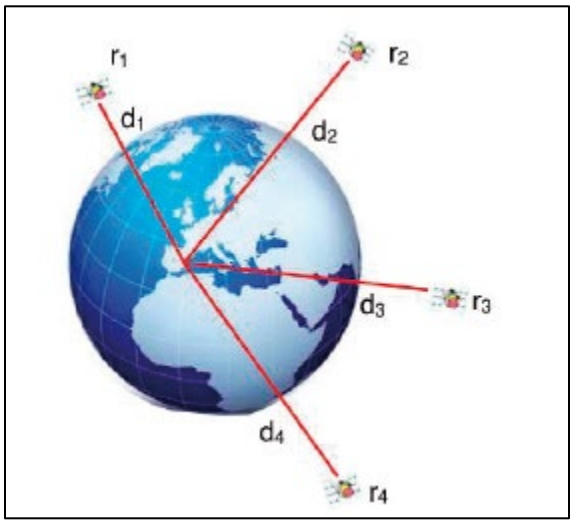
la anterior, también conformada por 24 satélites distribuidos en tres planos orbitales, cada uno de 8 a una altura media de 19100 km.

En la actualidad existen diferentes constelaciones y sistemas de posicionamiento global tal como GALILEO, BEIDOU entre otras, las cuales han sido desarrolladas por diferentes países y organizaciones las cuales buscan aumentar la cobertura y exactitud del posicionamiento global. Algunos de uso civil, a diferencia de GPS y GLONASS los cuales tienen sus inicios a partir de avances militares.

Principio básico de posicionamiento GNSS.

El posicionamiento por GNSS se basa en determinar la posición de un punto sobre la superficie terrestre a partir de la triangulación de mínimo cuatro satélites. El receptor determina la distancia entre él y el satélite a partir de la diferencia de fase transmitida denominada observable. Esta medición depende estrictamente de conocer la ubicación precisa de los satélites (efemérides) (Koolhaas, 2003)

Figura 6 Medición por GNSS



Tomado de: (Berné et al., 2014, p. 99)

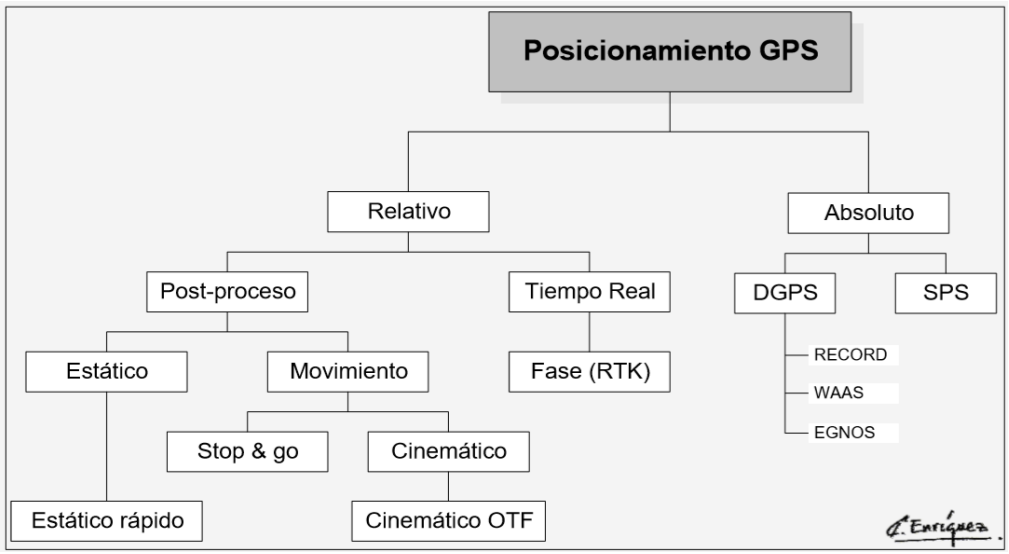
El observable se basa en la emisión de ondas en el vació a la velocidad de la luz en donde se puede determinar la distancia a través de la mecánica clásica (d=vt). Esta distancia es denominada pseudodistancia. Dado el nivel de cifras cualquier variación en la diferencia de tiempo influirá certeramente en el resultado de la pseudodistancia. Es por esto que los satélites hacen uso de relojes atómicos los cuales tienen un alto grado de estabilidad y compensación (10-13-10-14 segundos/día).

Métodos de posicionamiento GNSS.

Para obtener una posición en la superficie terrestre a partir del servicio GNSS existen diferentes técnicas las cuales van enfocadas al método de determinación de la solución y a la precisión que dicho método puede brindar.

De acuerdo con (Niño, n.d.) Los métodos de observación se clasifican en la manera en que se determina la posición. Absoluto y relativo, Cuando se refiere a Absoluto se basa únicamente a partir de la triangulación de los satélites disponibles mientras que relativo se basa en determinar la posición a partir de la triangulación de los satélites disponibles y en función de una estación de mayor jerarquía asumida libre de error o error tolerable.

Figura 7 Clasificación métodos de observación GNSS.



Tomado de (Carlos Enríquez Turiño, 2006)

Posicionamiento simple.

En este método se obtiene una posición a partir de las pseudodistancias y el error es indeterminado y no controlado, el cual se encuentra sobre los 15 metros.

Posicionamiento diferencial.

En esta técnica de observación se cuenta con estaciones de referencia que determinan la posición mediante la triangulación de las pseudodistancias. Debido a que las coordenadas de las estaciones se conocer es posible determinar el error obteniendo una precisión de 3 metros.

Posicionamiento estático.

El método estático se realiza para líneas base superiores a 20 kilómetros logrando precisiones de hasta 5 mm + 1 ppm, se caracteriza por tiempos de observación largos y es comúnmente empleado para trabajos de orden geodésico (ICONTEC, 2018, p. 38). Dentro de las aplicaciones se encuentran las redes nacionales y continentales, control tectónico, control geodésico, control estructural de infraestructura entre otros.

Posicionamiento estático.

El método estático se realiza para líneas base superiores a 20 kilómetros logrando precisiones de hasta 5 mm + 1 ppm, se caracteriza por tiempos de observación largos en donde principalmente se deben obtener soluciones fijas (resolviendo ambigüedades) y es comúnmente empleado para trabajos de orden geodésico (ICONTEC, 2018, p. 38). Dentro de las aplicaciones se encuentran las redes nacionales y continentales, control tectónico, control geodésico, control estructural de infraestructura entre otros.

Posicionamiento estático rápido.

Así mismo cuando se requiere un grado de precisión alto, pero no se trata de trabajos geodésicos se hace uso de la observación estático rápido, la cual requiere de tiempos de observación más cortos para líneas base de hasta 20 km y la precisión varia de centímetros a milímetros de acuerdo a las condiciones atmosféricas, las cuales deben ser similares para las estaciones inmersas en la sesión.

Posicionamiento cinemático.

Como su nombre lo indica, se refiere a una ocupación cinemática (en movimiento) en donde se debe contar con una estación de referencia operando continuamente para realizar la respectiva corrección geodésica, bajo esta ocupación se programa el receptor para almacenar información en intervalos seleccionados previamente y la precisión se encuentre de 1 hasta 2 cm +1 ppm. Se emplea en el levantamiento de información masiva tal como puntos de terreno, batimetrías, carreteras entre otros.(Carlos Enríquez Turiño, 2006)

Posicionamiento cinemático "stop and go".

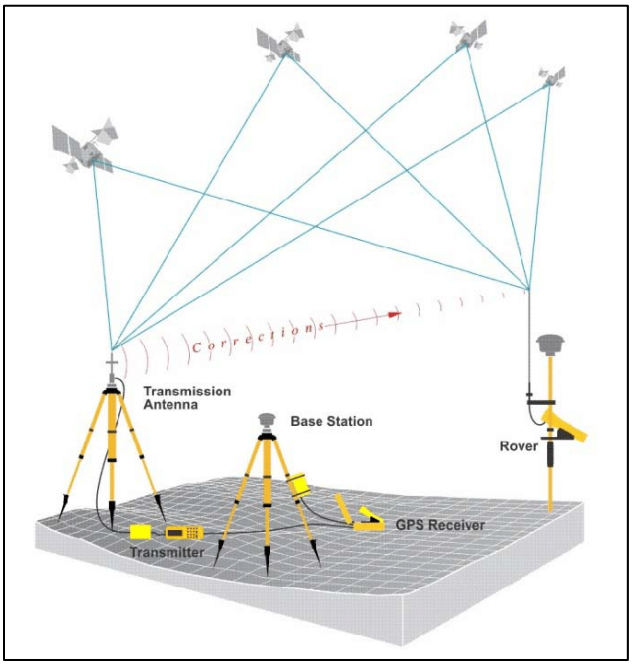
Es una variante del estático rápido y del cinemático, dado que cuenta con características de ambos métodos. Consiste en posicionar puntos de interés teniendo una estación de referencia y un

receptor móvil. Iniciando la captura de información en modo cinemático y así mismo se deben resolver las ambigüedades y mantener al menos 4 satélites, obteniendo precisiones de centímetros (1 a 2 cm +1 ppm) mediante el post-procesamiento. Sus aplicaciones se centran en levantamientos topográficos, ingeniería civil, puntos de terreno entre otros.(Niño, n.d.)

Posicionamiento RTK (Real Time Kinematic).

Es una observación la cual permite determinar la posición de un punto en tiempo real con precisión de 1 a 2 cm + 1ppm. Se debe contar con una estación de referencia RTK la cual rastrea información en modo estático, mientras el receptor en modo cinemático recibe la corrección a partir de la estación de referencia mediante señal de telecomunicaciones (GSM,UHF). Debido a que la transmisión de la corrección se realiza por señal de telecomunicaciones, el alcance de este tipo de observaciones depende estrictamente del alcance y potencia de la señal de telecomunicaciones.

Figura 8 Posicionamiento geodésico mediante RTK.



Tomado de: Framing a Satellite Based Asset Tracking (SPARTACUS) within Smart City Technology - Scientific F

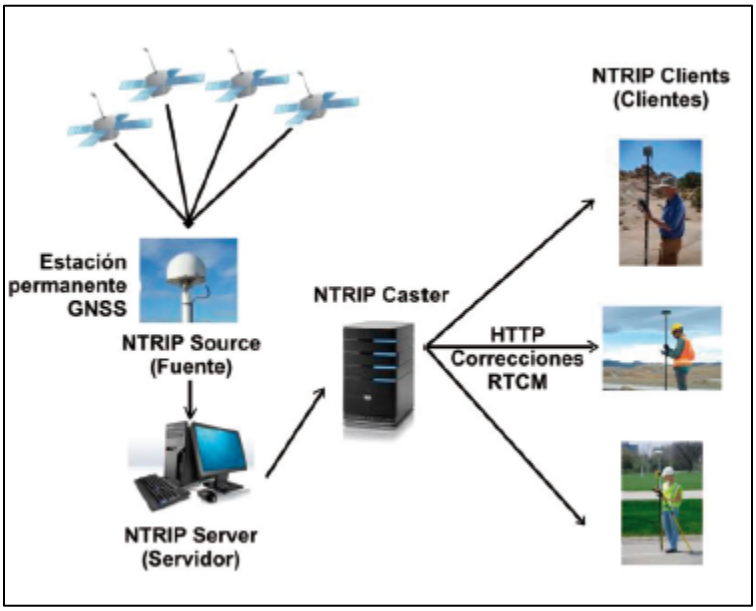
recuperado de www.ResearchGate.com

Posicionamiento NTRIP (Networked Transporto f RTCM via internet protocol).

Es una observación en tiempo real al igual que la observación RTK. Sin embargo, se sustituye la estación base por una estación permanente denominada CORS la cual transmite la corrección vía internet mediante redes GSM. La cadena de datos es enviada desde un servidor al receptor móvil a través de una dirección IP. Todo el conjunto que integra esta observación se le conoce como protocolo NTRIP, en donde se cuenta con varios apartes los cuales son:

- **NTRIP Sources.** Estaciones permanentes GNSS que proporcionan permanentemente información GNSS
- **NTRIP Server.** software que transmite las correcciones en formato RTCM.
- **NTRIP Caster.** Servidor HTTP, el cual hace las veces de nodo distribuidor
- **NTRIP Client.** Es el software que recibe la corrección en el receptor GNSS.

Figura 9 Protocolo de comunicación NTRIP.



Tomado de (Berné et al., 2014)

Posicionamiento Post-Processed Kinematic (PPK).

Es una observación alterna en tiempo real RTK con la ventaja de poder efectuar el procesamiento de los datos brutos posteriormente lo cual disminuye el margen de información sin corrección debido a que almacena los ficheros nativos y al mismo tiempo sirve de respaldo de la información (Back up).

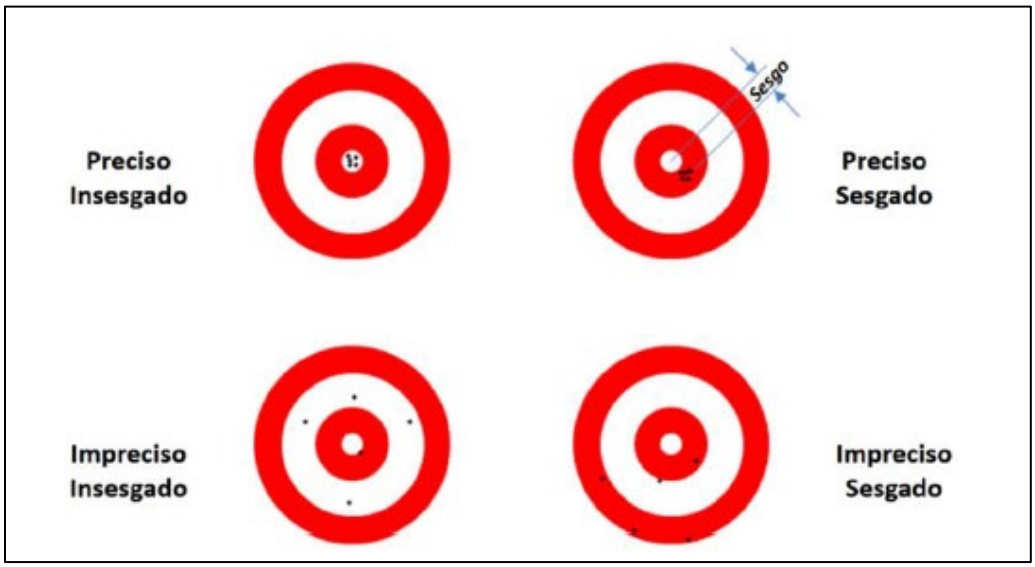
Evaluación de la exactitud posicional.

La fidelidad y conformidad de la localización en productos cartográficos siempre se ha considerado un aspecto decisivo y esencial de la calidad del producto, ya que afecta factores como la geometría, la topología y la calidad temática, y está directamente relacionada con la interoperabilidad de los datos espaciales (Ariza López, 2002).

En ese sentido, es importante establecer una barrera diferenciadora entre exactitud y precisión dado que son términos ampliamente usados en la producción cartográfica con definiciones diferentes. La exactitud posicional es una estadística que busca determinar la cercanía y consistencia de un conjunto de datos (CDE) respecto a un sistema de referencia con un orden jerárquico superior (CDR) mientras que precisión de acuerdo con (Ariza López et al., 2019) se refiere a "la proximidad de la concordancia entre los diferentes resultados y por tanto no tiene relación en el valor verdadero o valor de referencia aceptado". De igual manera veracidad se refiere a la cercanía (sesgo) a la media aritmética de un CDE y un CDR.

$$Exactitud = Veracidad\ (Trueness)\ +\ Precisión\ (precision) \tag{4}$$

Figura 10 Relación entre Exactitud o veracidad y precisión.



Tomado de (Ariza López et al., 2019)

Con el desarrollo de metodologías para la producción cartográfica se han desarrollado y evolucionado las pruebas o test para cuantificar la exactitud. El más antiguo es el estándar NMAS (National Map Accuracy Standard) del año 1947 hasta el más reciente ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data del año 2015.

Métodos de evaluación de exactitud posicional.

Como se ha comentado anteriormente la exactitud posicional de los productos cartográficos ha sido de gran relevancia y objeto de estudio sirviendo de base científica en el desarrollo de estos desde la década de los años 30. Así las cosas, existen varias pruebas para controlar y estimar la calidad de los productos cartográficos.

Sin embargo, debido a la extensión de los proyectos inherente de pequeña, mediana o gran escala resulta imposible evaluar completamente la exactitud posicional. Motivo por el cual las pruebas se realizan sobre muestras representativas, al mismo tiempo se debe determinar la finalidad de la prueba; De aceptación o rechazo del CDE (Métodos de control) o de establecer una

cuantificación fiable (métodos de estimación) los cuales buscan establecer la desviación, varianza o sesgo dentro de un intervalo de confianza. (Ariza López et al., 2019, p. 20)

National Map Accuracy Standard (NMAS).

De acuerdo con (Fuentes González et al., 2018, p. 15). El NMAS fue desarrollado por la sociedad americana de fotogrametría en 1937 que posteriormente fue adoptado por el servicio geológico de los estados unidos (USGS) y publicado en 1947. Este test busca evaluar la exactitud de la producción cartográfica mediante la muestra de unos puntos coordenados conocidos y sus respectivos en el mapa. Este test fue desarrollado para escalas mayores a 1:20,000 y para formatos impresos.

Este método, consiste en una prueba de control, es decir la finalidad del test es aprobar o rechazar el producto cartográfico. Su aceptación será conforme al 10% aprobados dentro de la muestra horizontalmente y verticalmente, para escalas mayores a 1:20000 tolerancia de 0.085 cm medidos a escala y menores a 1:20000, 0.05 cm y verticalmente la mitad de la equidistancia entre curvas de nivel. En la prueba no se especifica la cantidad de muestra sin embargo no se requiere de una gran cantidad de tamaño de muestra (Ariza López et al., 2019, p. 22).

Engineering Map Accuracy Standard (EMAS).

Desarrollado en 1983 por la American Society of Civil Engineers ASCE como variación al NMAS proveyendo un estándar más acorde a las especificaciones técnicas de instrumentos y técnicas de la época.

Es una prueba paramétrica empleando una muestra de mínimo 20 puntos con dos ensayos (Prueba T-student y Chi cuadrado), la primero busca determinar el sesgo de la muestra y el segundo la dispersión. Sin embargo, es considerado una prueba de control restrictiva dado que se deben

superar las dos estadísticas y categorizándolas de acuerdo a la escala del mapa conforme a lo establecido en la ASCE de 1983 (Fuentes González et al., 2018, p. 16)

National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA).

Desarrollado en 1998 por el Federal Geographic Data Committee para reemplazar el estándar NMAS y el ASPRS de 1990 como medida vanguardista a la tendencia de los datos digitales, adicionalmente es de base teórica para el estándar ASPRS del año 2015. Este test implementa una metodología estadística de tipo paramétrica mediante RSME o error medio cuadrático asumiendo una distribución normal de los datos a partir de una muestra de puntos coordenados bien definidos en la cartografía y en los puntos de orden jerárquico superior.

A diferencia del Test EMAS no brinda umbrales de exactitud, por lo que cada usuario o entidad debe definir los límites permisibles; Así mismo no es una prueba de control puesto que no indica la conformidad del CDE y no relaciona el tamaño de la muestra con el tamaño de la población (Fuentes González et al., 2018, p. 20).

La prueba se debe realizar a una muestra de mínimo 20 puntos de verificación bien distribuidos mediante la estimación de la exactitud a partir del error medio cuadrático *(5)* bajo un nivel de confianza del 95% por lo cual, se asume que los errores sistemáticos se han limitado al máximo y estos se distribuyen normal e independientemente.

$$RSME_x = \sqrt{\frac{\sum e_{xi}^2}{n}} \qquad RSME_y = \sqrt{\frac{\sum e_{yi}^2}{n}} \qquad RSME_z = \sqrt{\frac{\sum e_{zi}^2}{n}} \qquad (5)$$

De acuerdo con la (ASPRS 2015, p. 20) el test NSSDA es una prueba aplicable generalmente para polígonos rectangulares y sin vegetación por lo cual la evaluación del componente vertical se

deberá realizar sobre zonas de suelo desnudo, arena, hierba corta dentro del percentil 95 del $RSME_Z$ y de igual manera para el componente horizontal $RSME_r$.

$$RSME_r = \sqrt{RSME_x^2 + RSME_y^2} \tag{6}$$

$$NSSDA\ Precision\ horizontal\ a\ nivel\ de\ confianza\ del\ 95\%\ ACCr\ = RSME_r * 1.7308 \tag{7}$$

$$NSSDA\ Precision\ vertical\ a\ nivel\ de\ confianza\ del\ 95\%\ ACCz\ = RSME_z * 1.9600 \tag{8}$$

Spatial Accuracy Specification for Large Scale Topographic Maps (ASPRS).

Según (Fuentes González et al., 2018) es una prueba desarrollada por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) a partir de la revisión del NSSDA para producciones de pequeña y gran escala en cuanto al cálculo del error medio cuadrático RSME sin embargo, establece umbrales para productos digitales planimétricos y verticales en términos de precisión, escala y exactitud.

De acuerdo con (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015) se debe contar con un mínimo de 20 puntos de verificación para la evaluación de la exactitud posicional, así mismo se instituye la cantidad de puntos de verificación de acuerdo a la extensión del proyecto.

Tabla 1 Numero de puntos de verificacion recomendados.

Área del proyecto (Kilómetros cuadrados)	Evaluación de la exactitud horizontal de orto imágenes y planimetría	Evaluación de la exactitud horizontal y vertical de conjuntos de datos de elevaciones		
	N° total de puntos estáticos de verificación (Puntos bien definidos)	Nº de puntos estáticos de evaluación 3D en terreno no vegetado	Nº de puntos estáticos de evaluación 3D en terreno vegetado	Nº total de puntos estáticos de evaluación 3D
≤500	20	20	5	25
501-750	25	20	10	30
751-1000	30	25	15	40
1001-1250	35	30	20	50
1251-1500	40	35	25	60
1501-1750	45	40	30	70
1751-2000	50	45	35	80
2001-2250	55	50	40	90
2251-2500	60	55	45	100

Tomado de (Ariza López et al., 2019, p. 36)

Para el caso de Colombia mediante la NTC6271 y la Resolución 471 del año 2021 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi adoptó el estándar ASPRS 2015 de la American Society Photogrammetry and Remote Sensing para controlar la conformidad de los datos cartográficos. Estableciendo los limites en la producción cartográfica tal como se muestra en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2 Nivel de detalle de productos.

Escala	Orto imágenes GSD (cm)	Modelos digitales de terreno Grilla/Malla (m)
1:1000	10	1
1:2000	20	2
1:5000	50	5
1:10000	100	10
1:25000	250	25

Tomado de (Resolucion 471 de 2020, 2020, p. 4)

Tabla 3 Exactitud absoluta de posición horizontal y vertical.

GSD (m)	RSMEr y RSMEz (m)	Exactitud horizontal a un nivel de confianza del 95% (m)
0.1	0.3	0.52
0.2	0.6	1.04
0.5	1.5	2.60
1	3	5.2
2.5	7.5	13

Tomado de (Resolucion 471 de 2020, 2020)

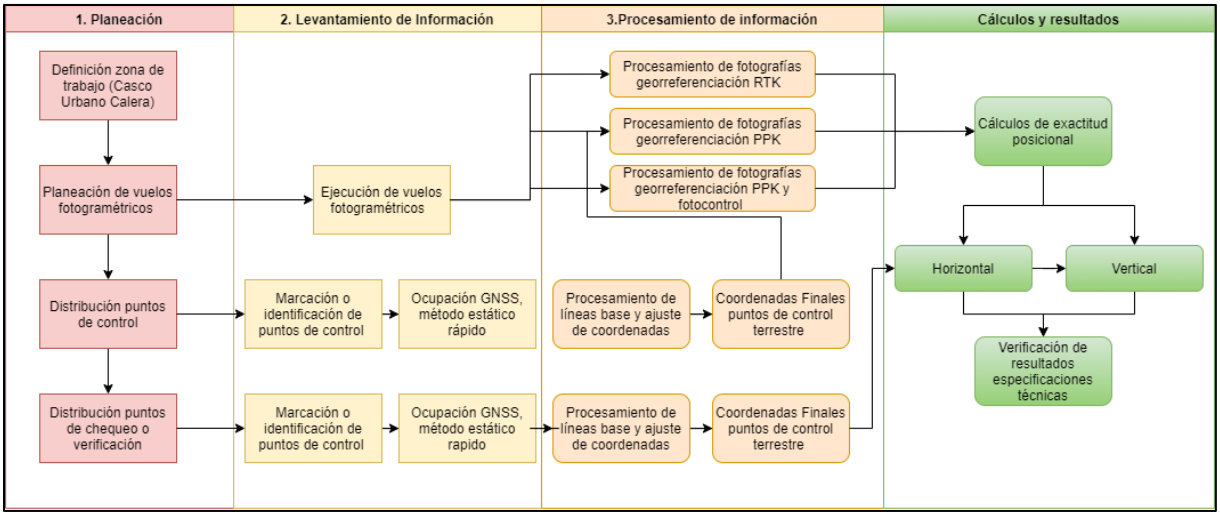
De acuerdo a la exactitud obtenida de un CDE el productor deberá indicar si es conforme o no conforme tal como se establece en la NTC6271 y la resolución 471 del año 2021 del IGAC.

Metodología

Para el desarrollo de los objetivos planteados se establecieron una serie de procedimientos y actividades que dan confiabilidad a los resultados del levantamiento fotogramétrico y posterior cálculo de la exactitud posicional. Estos procesos están basados en recomendaciones y estándares de entidades oficiales y/u organizaciones pioneras en los procesos de levantamientos fotogramétricos y control de calidad.

La definición de estos procesos va desde la planeación del levantamiento, ejecución, procesamiento y análisis de los resultados, la metodología general del proyecto se resume en la Figura 11.

Figura 11 Metodología general del proyecto.

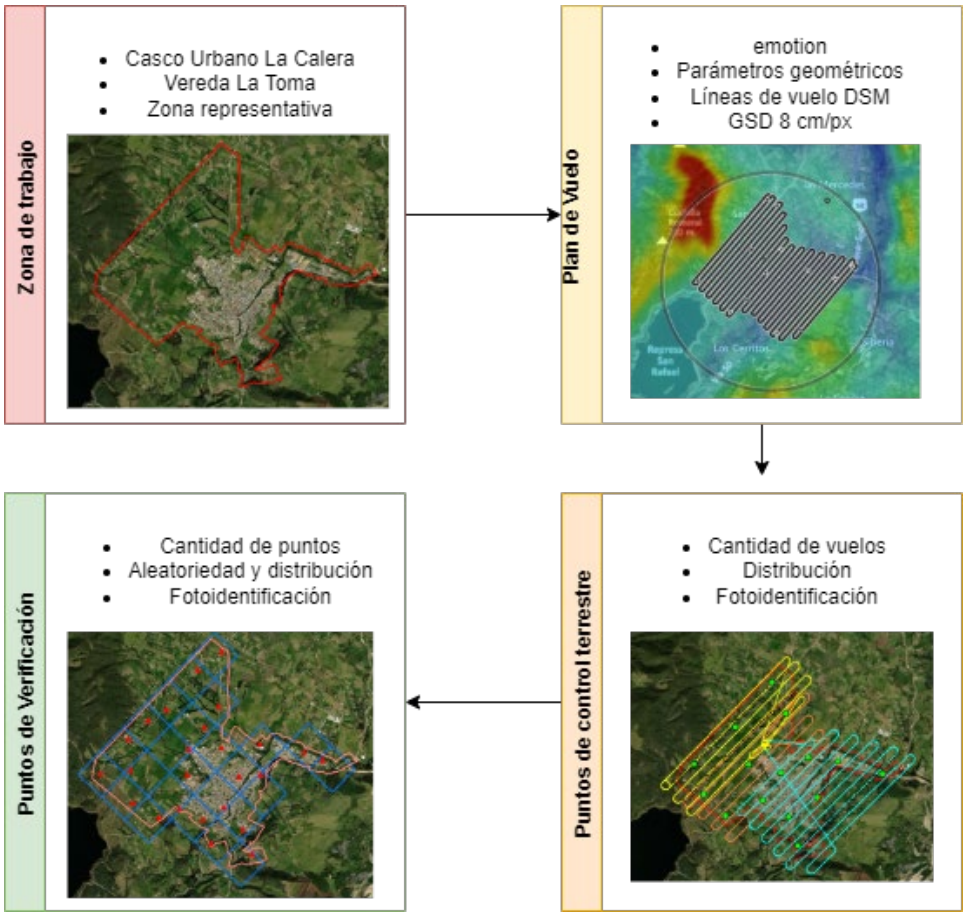


Fuente propia

Planificación de captura de la información.

En esta etapa se definieron todas las metodologías, procedimientos y proyección de las actividades de campo, específicamente al levantamiento de información fotogramétrica y los puntos de verificación para el cálculo de la exactitud posicional.

Figura 12 Planificación de captura de la información.

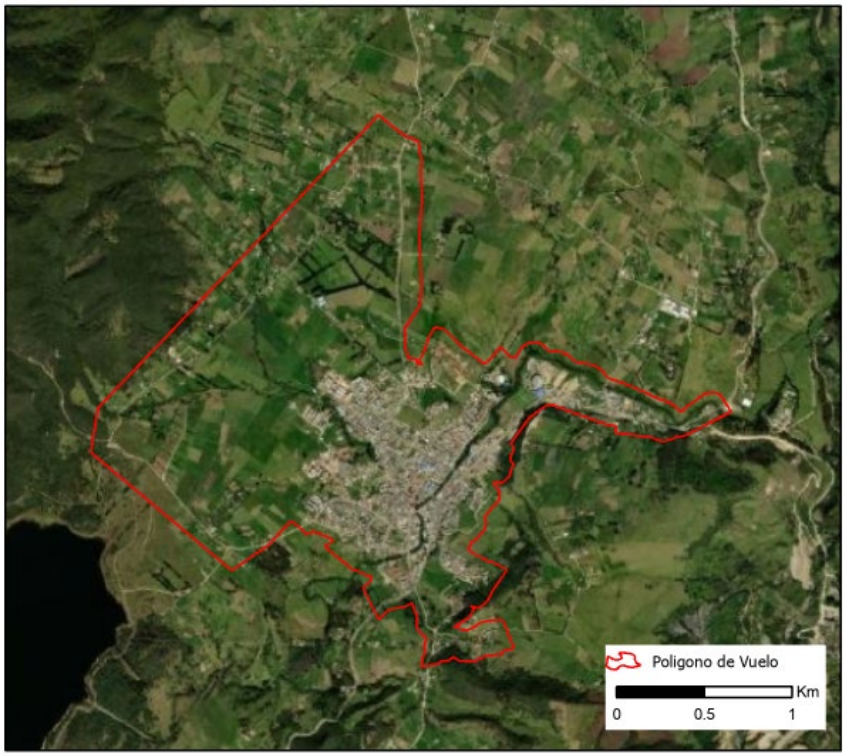


Fuente propia.

Zona de trabajo

Para la zona de trabajo se estableció el sector urbano municipio de la Calera – Cundinamarca, y parte rural, específicamente la vereda la toma, buscando tener una zona representativa en conformación, área y condiciones físicas a otros municipios del territorio sobre los cuales se pudieran desarrollar este tipo de actividades fotogramétricas y cartográficas.

Figura 13 Casco urbano municipio la Calera-Cundinamarca.



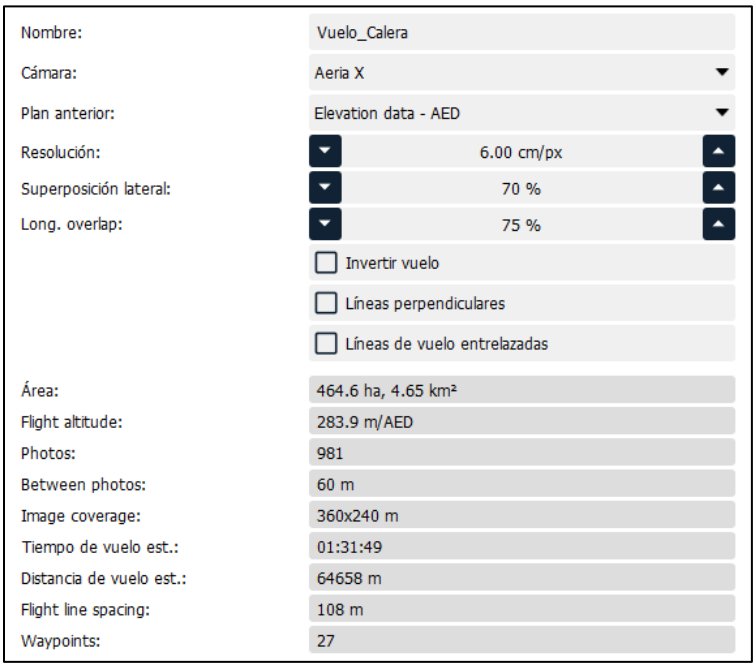
El polígono sobre el cual se desarrollaron las actividades tiene un área de 422.8 ha. Fuente propia

Plan de vuelo

Sobre la zona de estudio en el software eMotion del fabricante Sensefly, se realizó la planeación de los vuelos fotogramétricos, la planeación contemplo el cumplimiento de condiciones mínimas de ejecución del IGAC en cuento a traslapó longitudinal y lateral, GSD máximo (Escala 1:1000) y resolución radiométrica.

La resolución 1392 de 2016 en el Anexo 1, el IGAC define como parámetros mínimos de vuelo recubrimiento longitudinal mínimo del 60% y lateral del 30%, por lo cual, conociendo que estas especificaciones están direccionadas al uso de aeronaves tripuladas y sensores métricos, se definen parámetros que cumplan con estos estándares y brinden confiabiabilidad a la captura de datos con RPAS, teniendo en cuenta que se usó una cámara fotogramétrica se establecieron los siguientes parámetros:

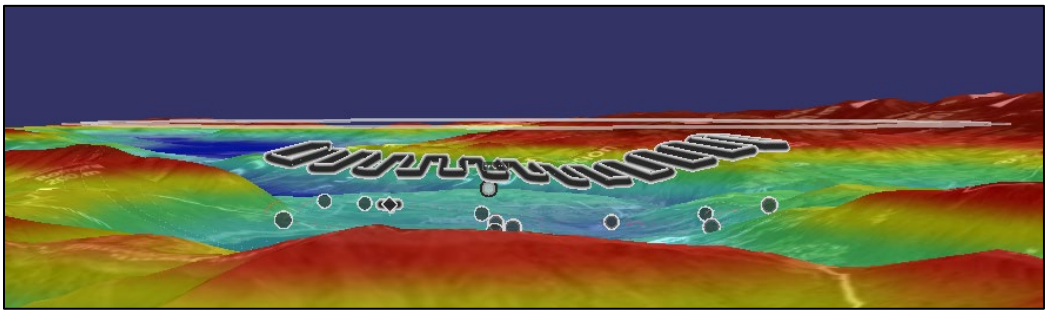
Figura 14 Plan de vuelo.



Variables fotogramétricas de acuerdo al polígono de vuelo y equipo ebee con sensor Aeria X. Fuente: Software eMotion.

Además de estos parámetros se consideraron aspectos como la dirección y altura de las líneas de vuelo en referencia al Modelo Digital de Superficie, buscando mantener constantes las alturas relativas al terreno y con ello mantener la escala en las imágenes y garantizar el GSD medio del ortomosaico, lo anterior orientando las líneas de vuelo en paralelo a las curvas de nivel.

Figura 15 Plan de vuelo, vista tridimensional.



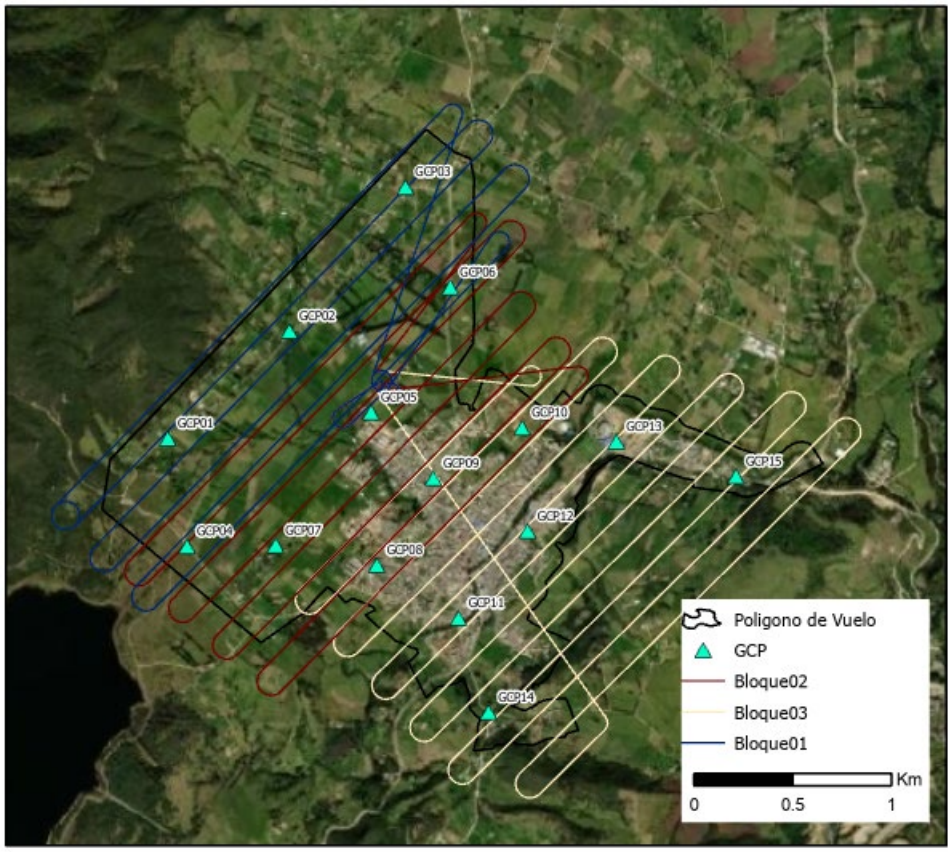
Plan de vuelo manteniendo elevación de la aeronave de acuerdo a modelo digital de terreno. Fuente Propia.

Puntos de control Terrestre

Para la distribución de puntos de control se consideraron la cantidad de vuelos y distribución en la totalidad de zona de estudio, en zona urbana y rural, buscando las zonas comunes entre vuelos tuvieran como mínimo 3 puntos de control, la ubicación fue proyectada de acuerdo a las condiciones esperadas de acceso y foto identificación.

Con la cantidad total de vuelos necesarios resultantes de la planeación, se exportaron las líneas de vuelo con el objetivo de identificar las zonas en las cuales se proyectaron las ubicaciones aproximadas de los puntos de control, garantizando distribución en la totalidad de la zona de estudio y foto identificación en vuelos sucesivos, como se observa en la Figura 16.

Figura 16 Líneas de vuelo y puntos de control terrestre GCP.



Fuente propia.

En total se ubicaron 15 puntos de control terrestre en la totalidad del área de estudio, estos puntos se ubicaron en zonas proyectadas para la correcta foto identificación y ocupación GNSS, además en zonas públicas que faciliten el acceso.

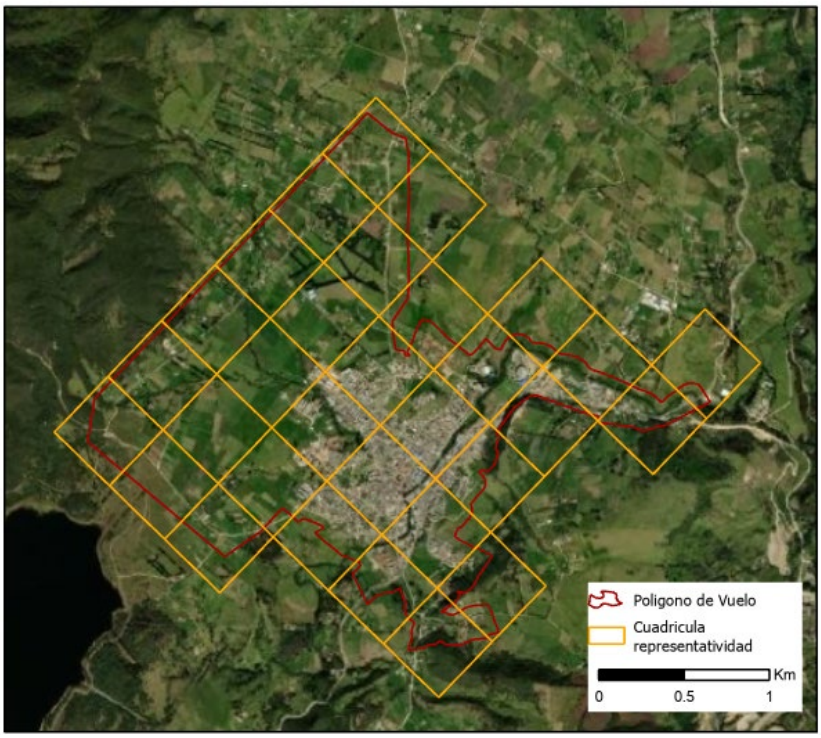
Puntos de verificación

Para los puntos de verificación se tomó referencia la Guía de evaluación de la exactitud posicional de datos espaciales del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, basado en el ASPRS 2014, documentos en los cuales se establece la cantidad de puntos recomendada y los criterios para su distribución, por lo cual se desarrolló una metodología que garantizara cumplir con los criterios de aleatoriedad y representatividad.

De acuerdo con el criterio de cantidad de puntos de verificación para el cálculo exactitud posicional en relación a la extensión de la zona de estudio de esta guía, se determinó la ubicación de 25 puntos de verificación de los 20 necesarios, debido a los posibles problemas de acceso u ocupación que se pudieran presentar, adicionalmente esta cantidad de puntos cumple con el requerimiento especificado en la resolución 471 de 2020 de IGAC.

El primer parámetro considerado fue la representatividad en la totalidad de la zona de estudio, motivo por el cual se decidió crear una grilla de 25 cuadrados, cuya extensión es el resultado de la división del área total en el número de puntos proyectado, esto con el objetivo de garantizar la existencia de un punto de verificación en cada cuadro de la grilla, logrando distribución en la totalidad del polígono, como se observa en la Figura 17.

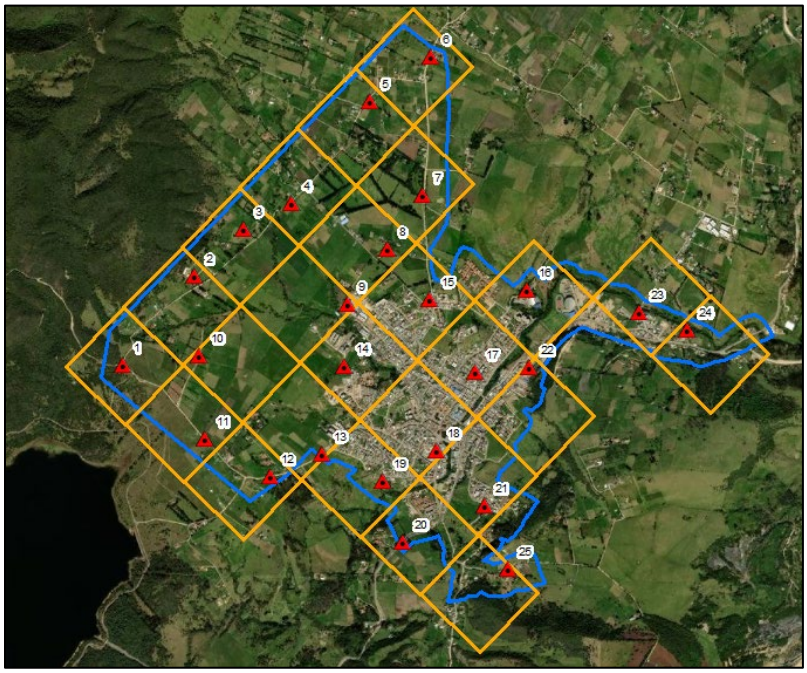
Figura 17 Representatividad de puntos de verificación de acuerdo al polígono de vuelo.



Fuente propia.

El segundo parámetro considerado fue el de la aleatoriedad, para lo cual mediante el uso de un software GIS se ejecutó una herramienta de creación aleatoria de puntos en polígonos, estableciendo que creara un punto en cada polígono de la grilla, reduciendo de esta manera la manipulación del operador en la ubicación de los puntos, como lo recomienda la guía de cálculo de exactitud posicional y el ASPRS 2014, el resultado de este procedimiento se observa en la Figura 18.

Figura 18 Aleatoriedad puntos de verificación.

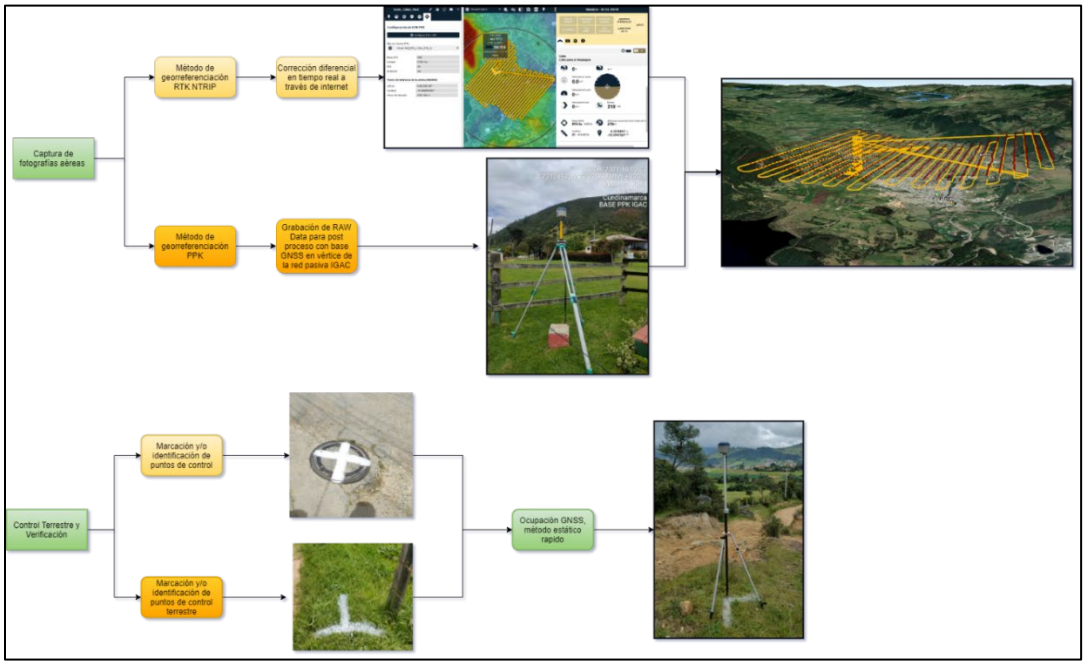


Fuente propia

Levantamiento de información.

La captura de fotografías aéreas, la marcación y ocupación de los puntos de control y verificación constituyeron las actividades principales de esta etapa del proyecto.

Figura 19 Levantamiento de información.



Fuente propia

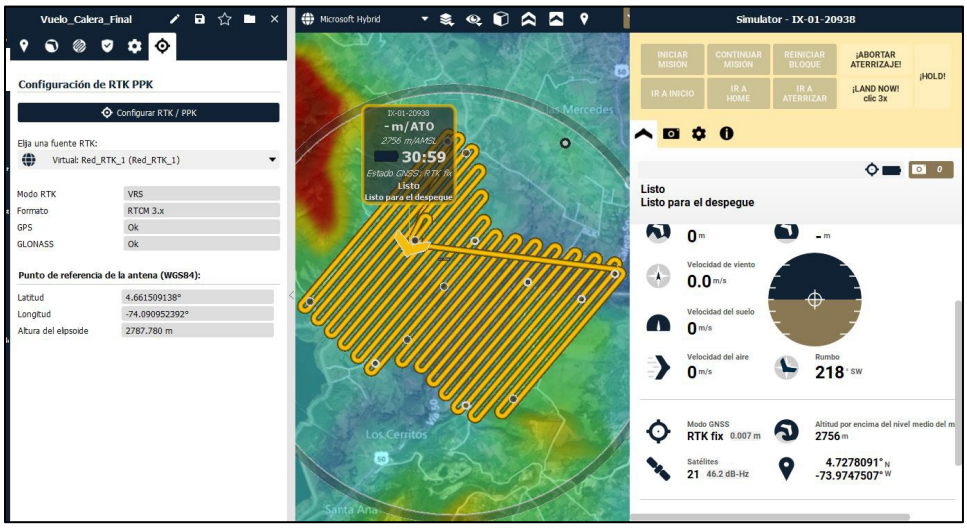
Captura de fotografías aéreas con diferentes métodos de georreferenciación

Para el desarrollo del proyecto y sus objetivos se planteó calcular de forma diferenciada la exactitud posicional de orto mosaicos y DTM derivados de 3 diferentes métodos de georreferenciación, productos derivados de determinación de coordenadas por el método RTK NTRIP, PPK y PPK con puntos de control terrestre.

En la práctica, las fotografías recibieron la corrección en tiempo real RTK y a su vez el RPA almaceno información RAW Data para el postproceso de fotografías tomando como referencia el rastreo con equipo GNSS en el vértice de la red pasiva del IGAC.

La red de corrección NTRIP configurada para la corrección pertenece a la empresa Geosystem Ingeniería y su funcionamiento durante la ejecución de vuelos se observa la Figura 20.

Figura 20 Corrección diferencial. Ejecución plan de vuelo.



Fuente software eMotion.

En la siguiente imagen se puede observar la ocupación GNSS del vértice IGAC durante la ejecución de los vuelos para el posterior post proceso PPK.

Figura 21 Ocupación vértice geodésico IGAC.

Fuente propia.

Puntos de control terrestre y verificación

La primera actividad de campo relacionada a este componente consistió en la marcación o determinación de posición de los puntos de control, se contempló el uso de características físicas de elementos en la zona de estudio, tales como líneas de demarcación, cajas de servicios públicos y/o contrastes de material, esto presente generalmente en zonas urbanas. En las zonas rurales se marcaron puntos foto identificables de longitud mínima de 5 veces el GSD (40 cm).

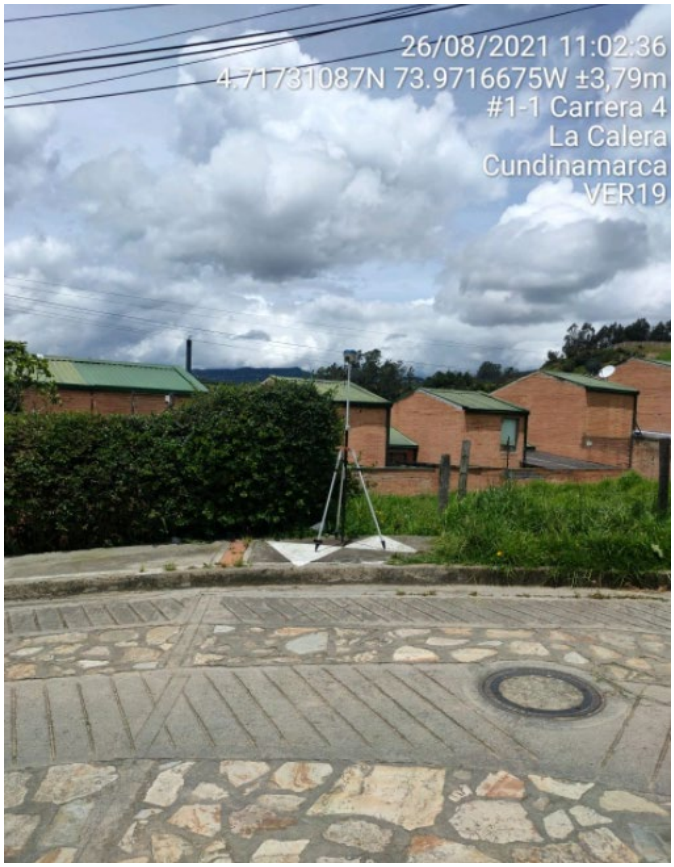
Esto se definió y marco antes de la ejecución de los vuelos con el objetivo de que la totalidad de puntos de control y verificación se identificaran claramente en las fotografías.

Figura 22 Punto de verificación VER19. Demarcación en campo.

Fuente propia.

Posterior a los vuelos, se realizaron los posicionamientos GNSS de los puntos de control y verificación para obtener coordenadas por el método estático rápido, el tiempo de rastreo mínimo por cada punto fue de 5 minutos y se ejecutaron con equipos doble frecuencia, multi constelación y antenas registradas en la NOAA, cumpliendo con los requerimientos del IGAC en cuento a equipos y métodos para el control terrestre.

Figura 23 Ocupación punto de verificación VER19.



Fuente propia.

Procesamiento de la información

El procesamiento de información se dividió en dos actividades, el procesamiento de fotografías aéreas para la generación de orto mosaicos y nube de puntos por cada método de

georreferenciación, y el post proceso GNSS para la determinación de coordenadas de los puntos de control terrestre y verificación.

Procesamiento de fotografías método de georreferenciación RTK

Las coordenadas resultantes del vuelo con corrección diferencial en tiempo real para las fotografías pasan por un proceso de cambio a época de referencia 2018.0 y proyección al sistema de coordenadas planas cartesianas origen local, cuyos parámetros se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4 Parámetros sistema de coordenadas local, Datum MAGNA.

PARÁMETROS SISTEMA DE COORDENADAS PCS_Calera - DATUM MAGNA	
Semieje a	6378137
Semieje b	6356752.3
Achatamiento	1/298257
Nombre	PCS_Calera
Código EPSG	N/A
Tipo de Proyección	Transverse_Mercator
Falso Este	1012077.374
Falso Norte	1013869.966
Meridiano central	-73.96864812
Factor de escala	1.000420969321
Latitud de Origen	4.721619308
Unidad	Metros

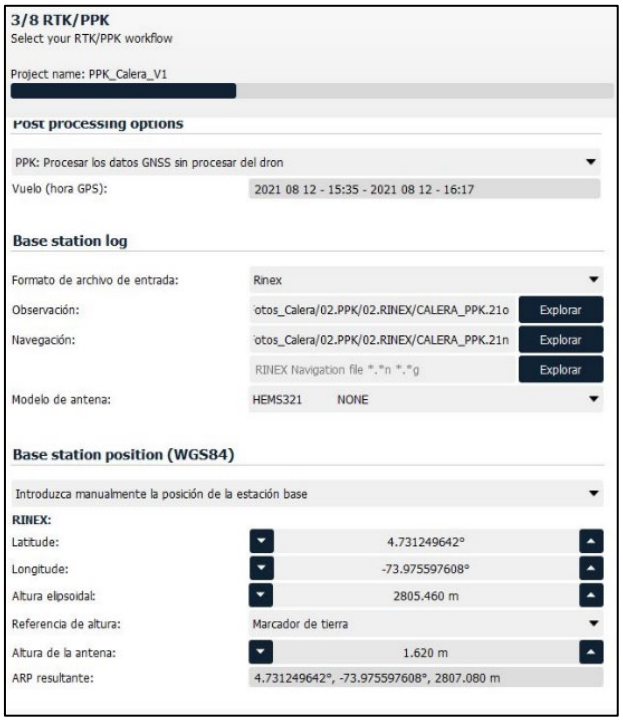
Con estas nuevas coordenadas se procedió a realizar la configuración y creación del proyecto de procesamiento en el software Agisoft Metashape, este procesamiento tuvo como objetivo la aerotringulación del bloque, generación de nube de puntos y orto mosaico.

Procesamiento de fotografías método de georreferenciación PPK

El archivo RawData con información GNSS de la trayectoria de los vuelos y foto centros se postproceso con la información de la ocupación GNSS en el vértice del IGAC, este postproceso se

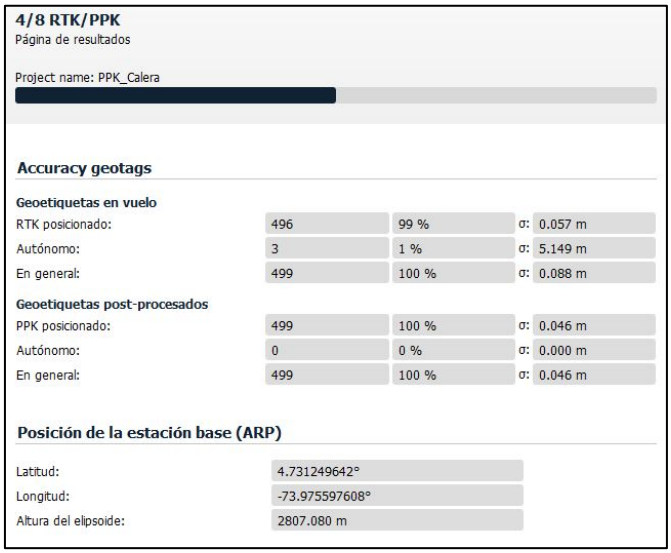
realizó en el software eMotion y tuvo como objetivo ajustar las coordenadas de cada fotografía procesándolas como un levantamiento cinemático, como se observa en la Figura 24 y Figura 25.

Figura 24 Procesamiento datos PPK



Fuente software eMotion.

Figura 25 Resultados de procesamiento de datos PPK.



Fuente software eMotion.

Estas coordenadas resultantes se llevaron a época de referencia 2018.0 y sistema de coordenadas planas cartesianas locales.

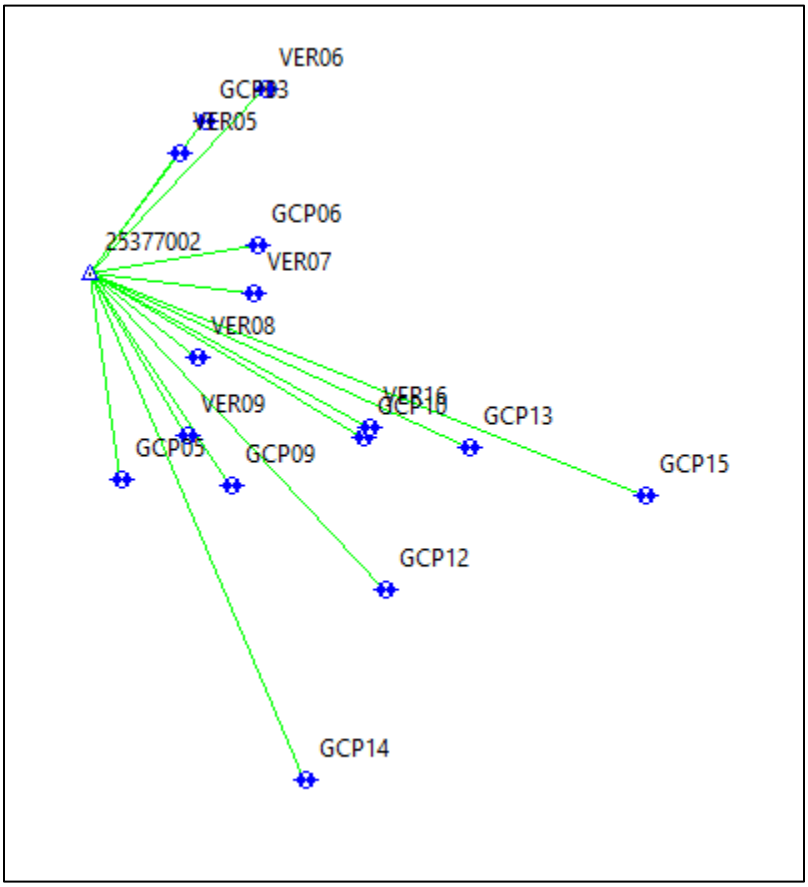
La configuración del proyecto y parámetros de procesamiento fueron los mismos que en el procesamiento RTK, con el objetivo de tener un garantizar las mismas condiciones en todos los productos sobre los cuales se calculará la exactitud posicional.

Procesamiento de coordenadas puntos de control y verificación

Este proceso se realizó con el uso del software Magnet Tools del fabricante Topcon, y consistió en el procesamiento de líneas base GNSS y ajuste de coordenadas para cada uno de los puntos de control terrestre y puntos de verificación, estas coordenadas están referidas al Datum Magna Sirgas en el Sistema de Coordenadas Planas Cartesianas Locales Origen La Calera, y el Datum Vertical a Buenaventura con el modelo de Geoide GEOCOL2004 para referir las alturas sobre el nivel medio del mar.

El procesamiento tuvo como referencia o base del procesamiento el vértice de la red pasiva del IGAC 25377002, los parámetros de configuración del procesamiento, precisión y resultados están basados en la resolución 643 de 2018 del IGAC, en donde se establecen los lineamientos y parámetros técnicos para levantamientos topográficos.

Figura 26 Procesamiento líneas base GNSS.



Procesamiento de datos GNSS software Magnet tools. Fuente propia.

Cálculos de exactitud Posicional

Para los cálculos de exactitud posicional se implementó el método NSSDA (National Standard For Spatial Data Accuaracy) en el cual se basa el cálculo de exactitud horizontal y vertical de la resolución 471 y 529 de 2020 del IGAC y el estándar ASPRS 2014, para lo cual se tomaron como valores más cercanos a la realidad o reales las coordenadas ajustadas resultantes del Postproceso GNSS y como datos de evaluación las coordenadas extraídas de los productos geográficos (Ortofotografías y MDT) por cada uno de los métodos de interpolación.

La extracción de las coordenadas de los productos geográficos se hizo por creación de puntos por medio de identificación visual del elemento medido y visible en la ortofotografía en software

SIG, de los cuales posteriormente se extrajeron valores de coordenadas y alturas mediante herramientas de cálculo de propiedades espaciales.

Figura 27 Formato cálculo de exactitud posicional absoluta.

EVALUACIÓN DE EXACTITUD POSICIONAL NSSDA									
Punto ID	Valores derivados del mapa			Valores verificados de puntos levantados			Residual (errores)		
	Coordenadas Norte	Coordenadas Este	Elevación	Coordenadas Norte	Coordenadas Este	Elevación	Coordenadas Norte	Coordenadas Este	Elevación (h)
	Metros	Metros	Metros	Metros	Metros	Metros	Metros	Metros	Metros
Número de puntos de verificación									
Error medio (m)									
Desviación estándar (m)									
RMSE (m)									
RMSE r (m)									
Precisión Horizontal a 95% de nivel de confianza									
Precisión Vertical a 95% de nivel de confianza									

Tomado de: (ICONTEC, 2018, p. 53)

Finalmente, el conjunto de coordenadas y valores de elevación se ingresaron en el formato de cálculo de exactitud horizontal y vertical respectivamente, en el cual se formularon las fórmulas de calculo que arrojaron los resultados para cada uno de los métodos de georreferenciación.

Desarrolló de la propuesta

De cada una de las etapas definidas en el desarrollo del proyecto, captura de información, procesamiento de información y cálculo de la exactitud, se realizaron una serie de actividades de las cuales se derivaron los resultados que se muestran en el presente capitulo y se muestra a continuación;

Captura de Fotografías

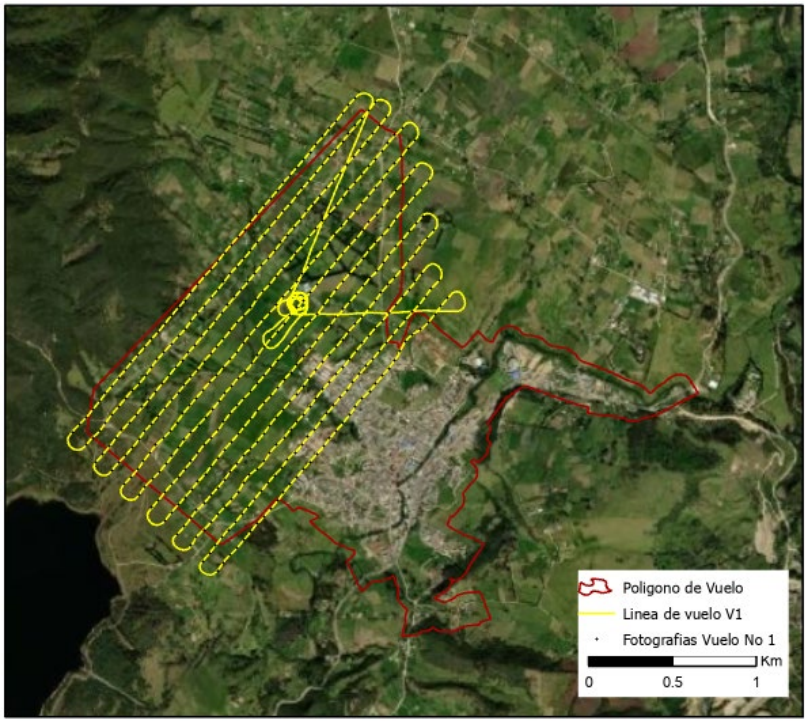
Como resultado de esta actividad se ejecutaron un total de 3 vuelos fotogramétricos que cubrieron la totalidad de la zona de estudio, La configuración de georreferenciación durante cada misión fue corrección RTK NTRIP a cada fotografía y grabación de RAW Data para postproceso PPK, las condiciones de captura fueron optimas, el rendimiento del equipo adecuado y la captura respecto al plan de vuelo no presento novedades, en la siguiente tabla se presenta el resumen de la captura de las aerofotografías:

Tabla 5 Captura aerofotografías planeadas y obtenidas.

Ítem	Planeación	Ejecución
Número de Vuelos	3	3
Tiempo de vuelo	1 H 31 Min	1 H 22 m
Cantidad de Fotografías	981	999

En el primer vuelo se capturaron un total de 499 fotografías:

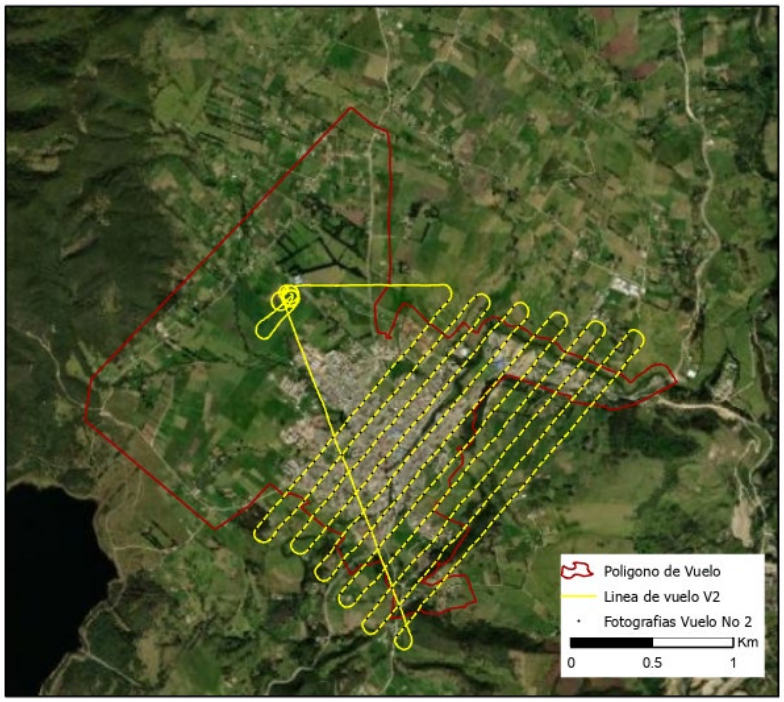
Figura 28 Líneas de vuelo, Vuelo fotogramétrico No 1



Líneas de vuelo ejecutadas Fuente software eMotion.

En el segundo vuelo se Capturaron un total de 386 fotografías:

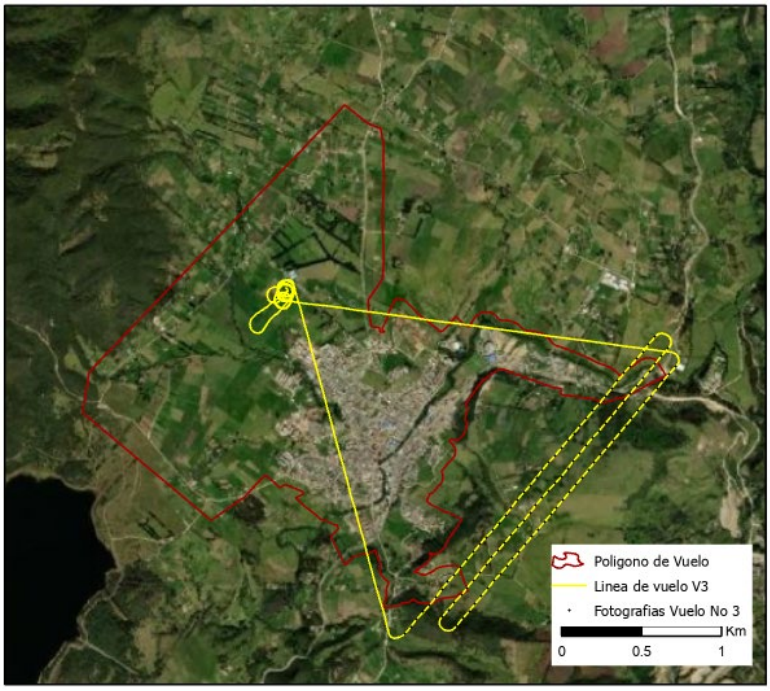
Figura 29 Líneas de vuelo, Vuelo fotogramétrico No 2



Líneas de vuelo ejecutadas Fuente software eMotion.

En el tercer vuelo se capturaron un total de 114 fotografías:

Figura 30 Líneas de vuelo, Vuelo fotogramétrico No 3



Líneas de vuelo ejecutadas Fuente software eMotion.

Las fotografías finales se almacenaron en formato .JPG y la geo etiqueta del RTK NTRIP en el metadato de cada una de estas, además de esto los archivos correspondientes a las cajas de vuelo, en las cuales se almacena la información RAW Data para el procesamiento PPK.

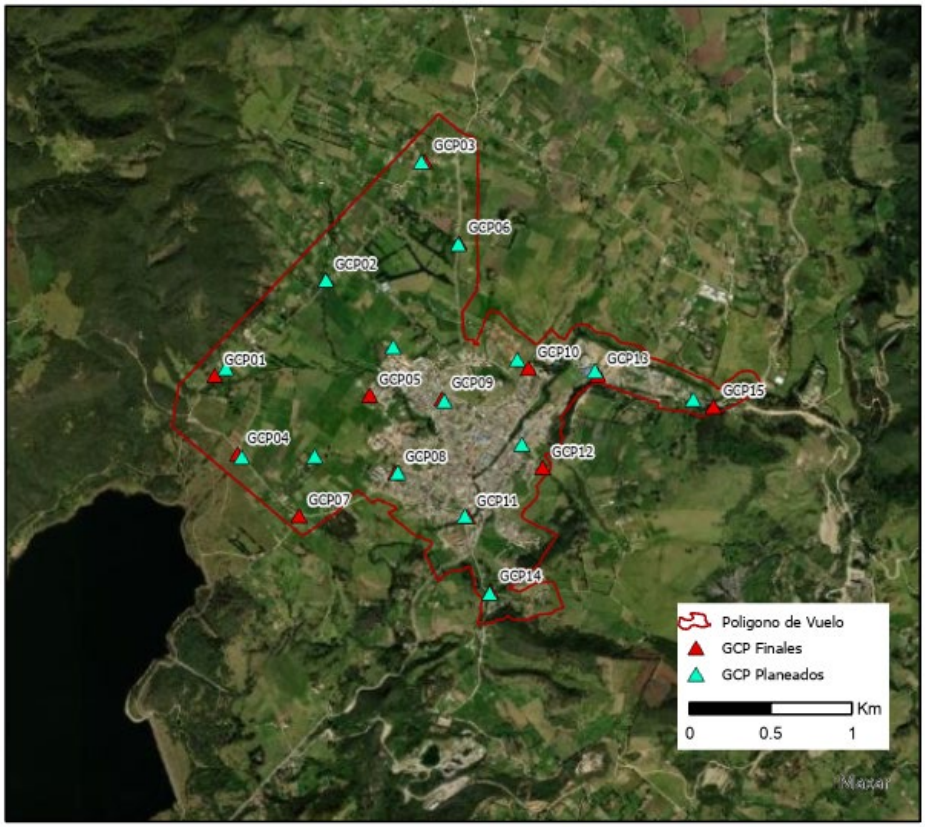
Ocupación puntos de control y verificación

Posterior al reconocimiento de la totalidad de la zona de estudio y la ubicación aproximada que se definió en la etapa de planeación, se marcaron y ocuparon con los equipos GNSS los puntos de control y verificación conforme las condiciones de accesibilidad a la zona principalmente, otro aspecto importante fue el análisis de las condiciones físicas de la zona por la presencia de obstáculos que impidieran la correcta recepción de información satelital y con ello la calidad del postproceso de coordenadas.

En referencia a lo anterior se marcaron y ocuparon la totalidad de puntos definidos en la etapa de planeación (15 GCP), en cuanto a los puntos de chequeo o verificación para el cálculo de la exactitud posicional se marcaron y ocuparon 21 de los 25 planeados, consecuencia de la imposibilidad de acceso a las zonas, sin embargó, se cumplió con la cantidad mínima de 20 puntos requerida para el cálculo de exactitud para esta área.

En la Figura 31 se puede observar la ubicación final de los puntos de control en comparación con la planeación:

Figura 31 Puntos de control finales.

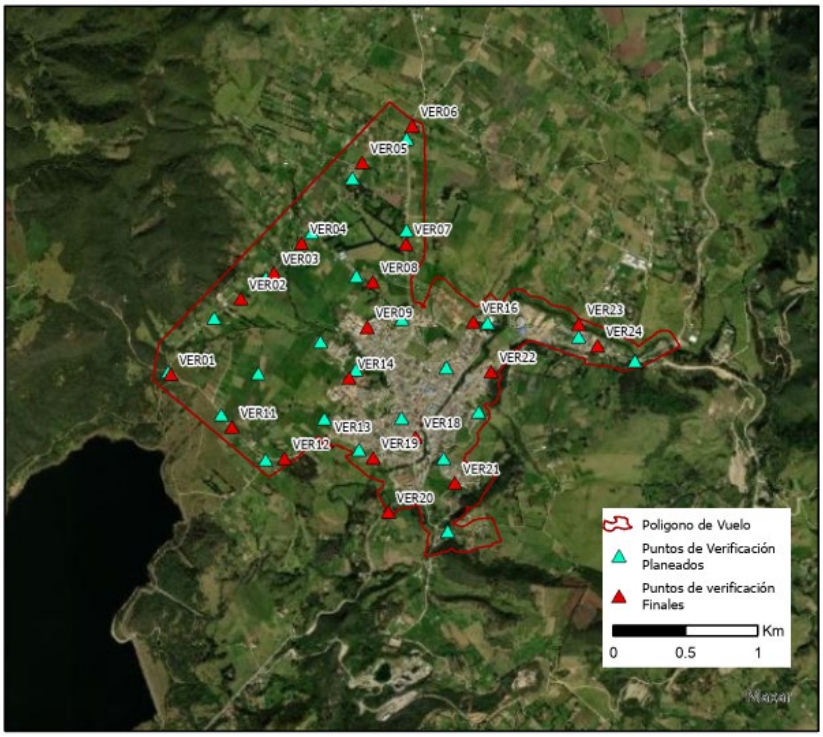


Fuente propia.

Como se puede evidenciar en la imagen los puntos de control conservan la distribución y cantidad considerada en la planeación para la correcta georreferenciación de la aerotringulación.

En cuento a la distribución final de los puntos de chequeo o verificación respecto a los planeados se observa la Figura 32.

Figura 32 Puntos de verificación finales.



Fuente propia.

Si bien algunos puntos no pudieron ser ocupados respecto a lo planeado, se considera que la distribución final permite de igual manera, obtener resultados que permitan analizar la exactitud en el total de la zona de trabajo de forma adecuada, aclarando que estos puntos tienen la función de ser insumo en el cálculo de exactitud posicional y otros análisis, no en la georreferenciación durante el procesamiento fotogramétrico, por lo cual no afecta de forma directa o indirecta en la calidad de los productos.

Procesamiento de Fotografías Aéreas

Método de georreferenciación RTK NTRIP

Las fotografías capturadas en vuelo tienen en su metadato, las coordenadas resultantes de la georreferenciación por el método RTK NTRIP, sin embargo, fue necesario realizar el análisis de precisión de cada una de las fotografías y del conjunto de datos, motivo por el cual en el software de vuelo eMotion se cargaron los archivos de vuelo y las fotografías con el objetivo de extraer la información de cada uno de los vuelos, como se puede observar en las siguientes figuras:

Figura 33 metadatos aerofotografías

Geoetiquetas en vuelo				
RTK posicionado:	496	99 %	σ:	0.057 m
Autónomo:	3	1 %	σ:	5.149 m
En general:	499	100 %	σ:	0.088 m
Geoetiquetas en vuelo				
RTK posicionado:	386	100 %	σ:	0.059 m
Autónomo:	0	0 %	σ:	0.000 m
En general:	386	100 %	σ:	0.059 m
Geoetiquetas en vuelo				
RTK posicionado:	111	97 %	σ:	0.056 m
Autónomo:	3	3 %	σ:	0.549 m
En general:	114	100 %	σ:	0.069 m

Fuente software eMotion

De lo anterior se puede observar que 6 fotografías que representan el 0.6% del total de fotografías (999) no obtuvieron solución durante la ejecución de los vuelos, algo que es totalmente esperado, dado que al igual que en levantamientos RTK convencionales se pueden presentar obstáculos y problemas de recepción y señal durante la captura, sin embargo, el impacto en los resultados y la posible afectación se podrá analizar, dado que en procesamiento fotogramétrico se ajustan las fotografías en bloques, lo cual puede mejorar la precisión de estas y su impacto en el insumo final.

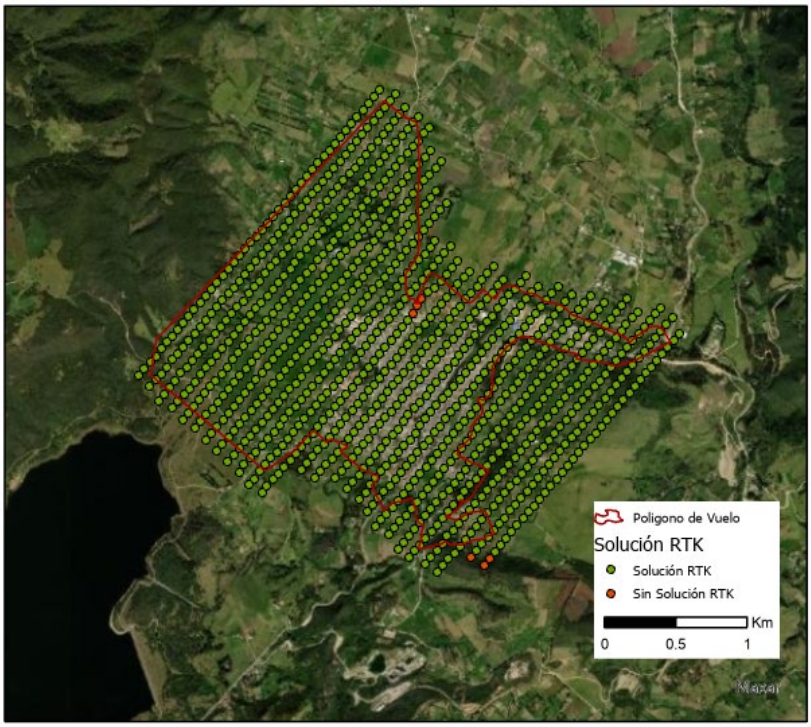
Adicionalmente se realizó un análisis estadístico del conjunto de datos, con el objetivo de poder observar el comportamiento de las precisiones horizontales y verticales de las fotografías, obteniendo un parámetro de análisis en los resultados que se obtuvieron de los cálculos de la exactitud posicional para este método de georreferenciación, en la siguiente tabla se observan los datos estadísticos del conjunto de datos:

Tabla 6 Estadística precisión aerofotografías método RTK

Parámetro	***RTK Accuracy_X/Y_(m)***	***RTK Accuracy_Z_(m)***
Media	*0.047*	*0.058*
Mediana	*0.038*	*0.042*
Moda	*0.038*	*0.041*
Desviación estándar	*0.158*	*0.287*
Mínimo	*0.037*	*0.036*
Máximo	*3.56*	*6.435*
Nivel de confianza (95.0%)	*0.01*	*0.018*

En la siguiente imagen se pueden observar la ubicación de las fotografías que no tuvieron solución RTK durante la ejecución de los vuelos fotogramétricos.

Figura 34 Solución RTK aerofotografías



Fuente propia.

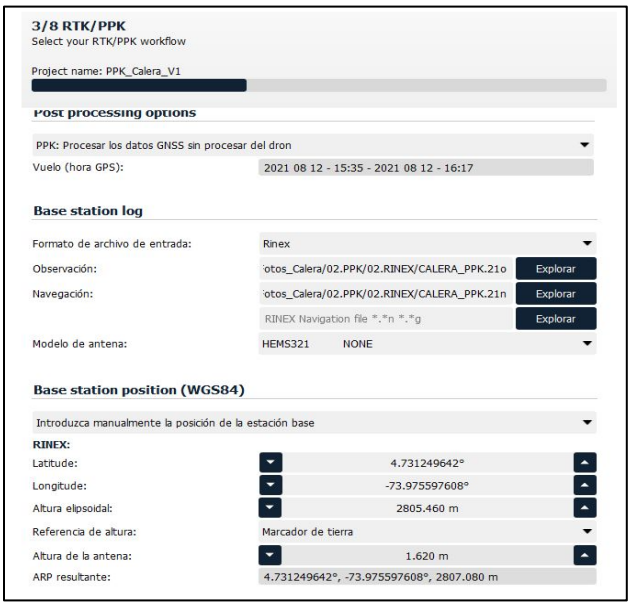
La imagen permite identificar que tres imágenes están localizadas dentro de la zona directa de trabajo, y otras tres fotografías están localizadas en la zona exterior del polígono de trabajo.

Método de georreferenciación PPK

Las fotografías capturadas pasaron por un proceso en el cual la coordenada del fotocentro se ajustó en referencia a la base GNSS posicionada en el vértice de la Red Pasiva del IGAC, que estuvo capturando RAW Data durante la ejecución de los vuelos, que en el software eMotion se procesó con la información de trayectorias de vuelo descargada de la aeronave.

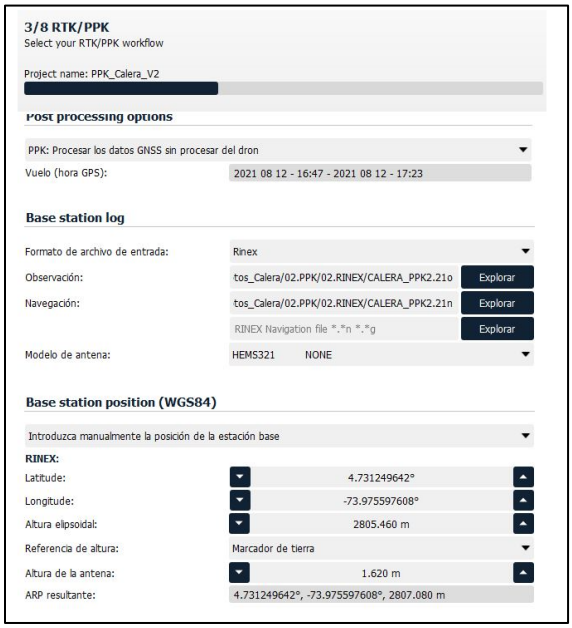
Similar al post-proceso tradicional, se configura la información de la base GNSS en cuanto a las coordenadas, antena y altura instrumental, y como Rover la información de cada fotografía en el momento de su captura. Este procesamiento se realizó de forma diferenciada por vuelo, como se observa en las siguientes imágenes:

Figura 35 Procesamiento PPK aerofotografías vuelo 1.



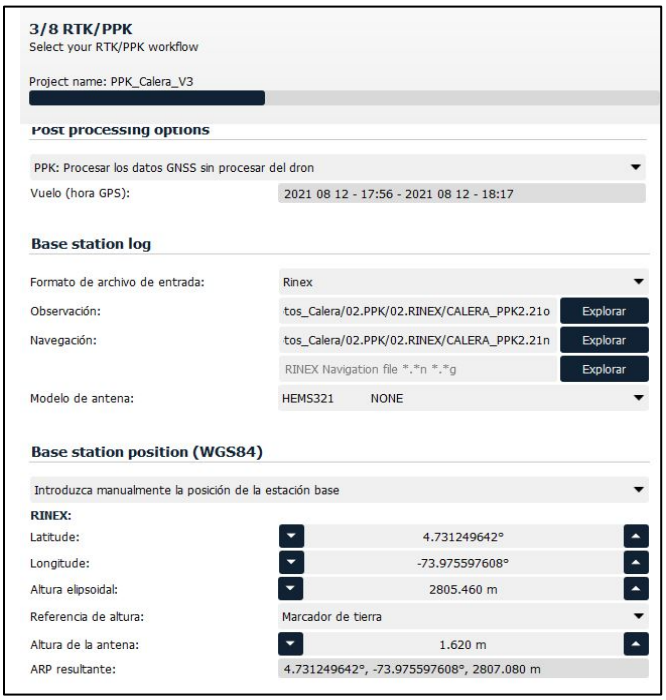
Fuente software eMotion.

Figura 36 Procesamiento PPK aerofotografías vuelo 2



Fuente software eMotion

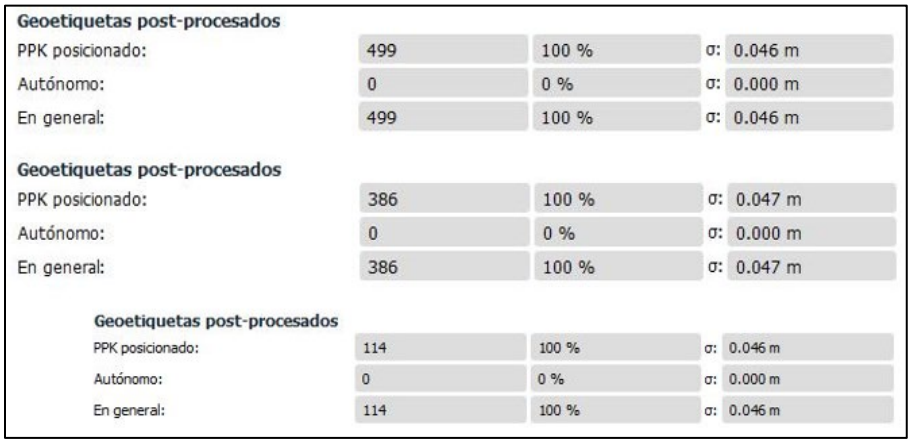
Figura 37 Procesamiento PPK aerofotografías vuelo 3



Fuente software eMotion

Como resultado de este procesamiento, la totalidad de fotografías obtuvieron soluciones y precisiones acordes a lo especificado por el fabricante y las distancias a la base GNSS, como se puede observar en las siguientes imágenes:

Figura 38 Resultados procesamiento PPK aerofotografías.



Fuente software eMotion

De igual manera que en la georreferenciación RTK se realizó un análisis estadístico que permite analizar los resultados en el total del conjunto de datos y con ello poder establecer comparaciones y comportamiento de este método y su impacto en el resultado final de la exactitud posicional, datos estadísticos que se observan a continuación:

Tabla 7 Estadística precisión aerofotografías método PPK

Parámetro	***PPK Accuracy_X/Y_(m)***	***PPK Accuracy_Z_(m)***
Media	*0.033*	*0.032*
Mediana	*0.033*	*0.032*
Moda	*0.033*	*0.032*
Desviación estándar	*0.001*	*0.001*
Mínimo	*0.032*	*0.03*
Máximo	*0.035*	*0.036*
Nivel de confianza (95.0%)	*0.000038*	*0.000077*

Procesamiento GNSS

El procesamiento GNSS se realizó en el software Magnet Tools y se dividió el procesamiento de 3 sesiones o grupos, dadas las fechas en que se capturo la información. En este procesamiento se determinó como base de referencia del estático diferencial el vértice de la red pasiva del IGAC 25377002, a partir del cual se ejecutó el procesamiento de líneas base y posterior ajuste de coordenadas de los puntos de control y verificación.

La totalidad de puntos tuvo solución fija de las líneas base y desviaciones que cumplen con los especificado por el IGAC en este tipo de procesamientos, además del cumplimiento de los valores de PDOP recomendados.

En la siguiente tabla se resumen los resultados del cálculo, específicamente lo relacionado con las desviaciones estándar finales de cada una de las coordenadas derivadas del post proceso GNSS:

Tabla 8 Resultado ajuste de puntos de control y de verificación.

Sesión de Procesamiento	***Media de Estnd Desv n (m)***	***Media de Estnd Desv e (m)***	***Media de Estnd Desv Hz (m)***	***Media de Estnd Desv Vr (m)***	***Cantidad de Puntos***
1	*0.001*	*0.001*	*0.002*	*0.002*	*1*
2	*0.007*	*0.007*	*0.010*	*0.021*	*15*
3	*0.005*	*0.007*	*0.008*	*0.014*	*4*
4	*0.010*	*0.011*	*0.015*	*0.027*	*16*
Total	***0.008***	***0.009***	***0.012***	***0.022***	***36***

De los resultados finales del ajuste se realizó el análisis estadístico correspondiente a las desviaciones estándar horizontales y verticales de los puntos para evaluar la calidad general del proceso y con ello de las coordenadas resultantes.

Tabla 9 Desviaciones estándar horizontales y verticales puntos ocupados.

Parámetro	***Estnd Desv Hz (m)***	***Estnd Desv Vr (m)***
Media	*0.012*	*0.022*
Mediana	*0.009*	*0.016*
Moda	*0.003*	*0.017*
Desviación estándar	*0.009*	*0.017*
Mínimo	*0.002*	*0.002*
Máximo	*0.035*	*0.066*
Nivel de confianza (95.0%)	*0.003*	*0.006*

Las coordenadas resultantes del postproceso se encontraban en época de levantamiento 2021.6, motivo por el cual, con el uso del aplicativo Magna PRO se desarrolló el procedimiento de cambio a época de referencia 2018.0, adicionalmente, con este mismo software se realizó el cálculo de altura Geocol 2004, para referir las alturas sobre el nivel medio del mar, sistema de referencia vertical de los productos.

Procesamiento Fotogramétrico

El procesamiento de fotografías aéreas capturadas con equipos RPAS se realizó en el software Agisoft Metashape, para ello, se definieron parámetros idénticos de procesamiento para cada uno de los métodos de georreferenciación, con el objetivo de igualar las condiciones en cada método

y de esta forma garantizar que la metodología de procesamiento no afecte en mayor medida a uno u otro, además, se planteó que el flujo de trabajo contemplara de forma general lo que normalmente se configura en el desarrollo de proyectos con esta tecnología para poder abarcar los resultados de forma general, el flujo de trabajo se observa en la siguiente tabla:

Tabla 10 Parámetros de procesamiento fotogramétrico.

Etapa	***Parámetro***
Orientación de las fotografías	*Calidad Media y preselección por referencia.*
Optimización de la Orientación	*Adaptativo al modelo Cámara*
Nube de puntos Densa	*Calidad Media y Filtrado de Profundidad Agresivo*
Clasificación Puntos de Terreno	*Ángulo Máximo 35°*
Modelo Digital de Elevaciones	*Interpolación Extrapolada, Puntos de Terreno y No clasificado.*
Ortofoto	*DSM como superficie y refinamiento de líneas de costura.*

Cabe aclarar que el postproceso del método de georreferenciación PPK con puntos de control incluyo el procedimiento de marcación del fotocontrol luego de la orientación del bloque. Como resultado de este procesamiento se obtuvieron los siguientes resultados en cada una de las etapas:

Tabla 11 Resultados procesamiento fotogramétrico.

Etapa	***PPK y GCP***	***PPK***	***RTK***
Puntos de Paso	*604.497*	*604.497*	*604.507*
Mapas de Profundidad	*999*	*999*	*999*
Nube de puntos Densa	*158.612.069*	*158.377.173*	*153,091,348*
Resolución DSM	*26.5 cm/px*	*26.5 cm/px*	*26.5 cm/px*
Ortofoto	*6.63 cm/px*	*6.63 cm/px*	*6.63 cm/px*

En cuento al proceso de fotocontrol, se marcaron la totalidad de puntos y los resultados se pueden observar en la siguiente imagen del reporte de procesamiento del software:

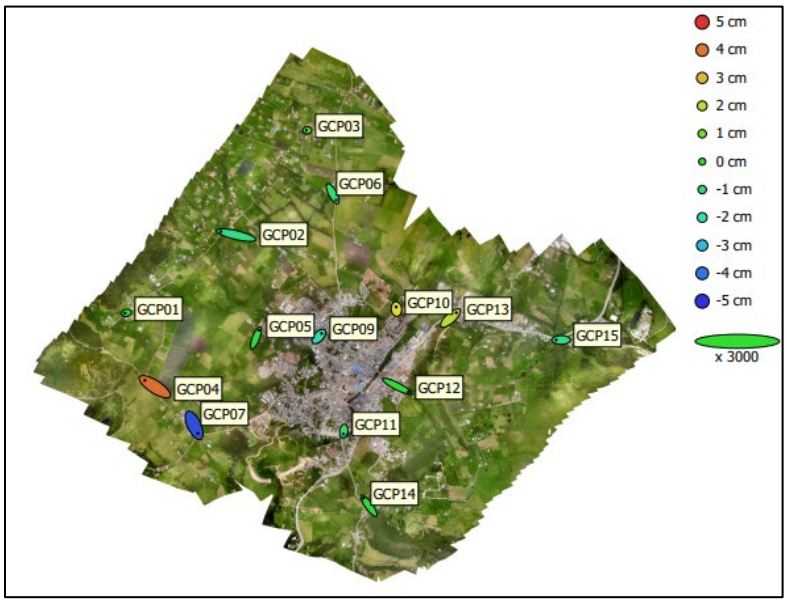
Figura 39 Precisión orientación externa bloque fotogramétrico.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)
GCP01	-0.653405	-0.158918	-0.176374	0.695198
GCP02	-7.25984	1.70211	-1.28935	7.56736
GCP03	-0.405719	-0.0105668	0.233434	0.468199
GCP04	-4.68651	3.01646	4.12775	6.93547
GCP05	1.41237	3.71267	-0.138071	3.97464
GCP06	1.63685	-3.04077	-0.847419	3.5558
GCP07	1.7705	-3.8104	-4.5817	6.21658
GCP09	1.33016	1.44461	-1.80354	2.66626
GCP10	-0.107445	1.00316	2.50697	2.70237
GCP11	-0.176968	-1.3657	-0.826272	1.60598
GCP12	5.40124	-2.75916	-0.0314267	6.06526
GCP13	2.77388	2.53959	1.97981	4.25013
GCP14	-2.59352	3.61966	-0.245704	4.45967
GCP15	-2.34484	-0.00364637	-1.2646	2.66412
Total	**3.09347**	**2.41563**	**2.00564**	**4.40765**

Fuente software Agisoft Metashape

De forma ilustrativa los errores asociados a cada punto se pueden observar en la siguiente imagen:

Figura 40 Precisión orientación externa bloque fotogramétrico



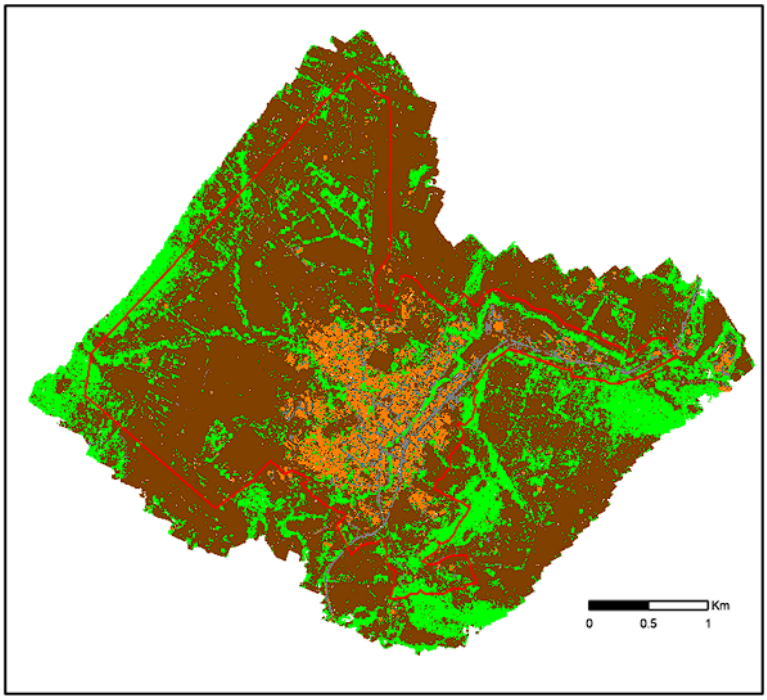
Fuente software Agisoft Metashape

El procesamiento fotogramétrico permitió obtener los dos insumos principales para el procedimiento del cálculo de exactitud posicional, el primero y directo es la Ortofoto, sobre la cual se desarrolló el cálculo horizontal, el segunda e indirecto fue la nube de puntos, que paso por un proceso de revisión y mejoramiento de la clasificación para la obtención del Modelo Digital de Terreno, sobre el cual se calculó la exactitud vertical, esto para cada uno de los métodos de georreferenciación, a continuación, se puede observar la ortofoto y DTM de la zona, evidenciando del cubrimiento total e integridad de los resultados:

Figura 41 Ortomosaico final.

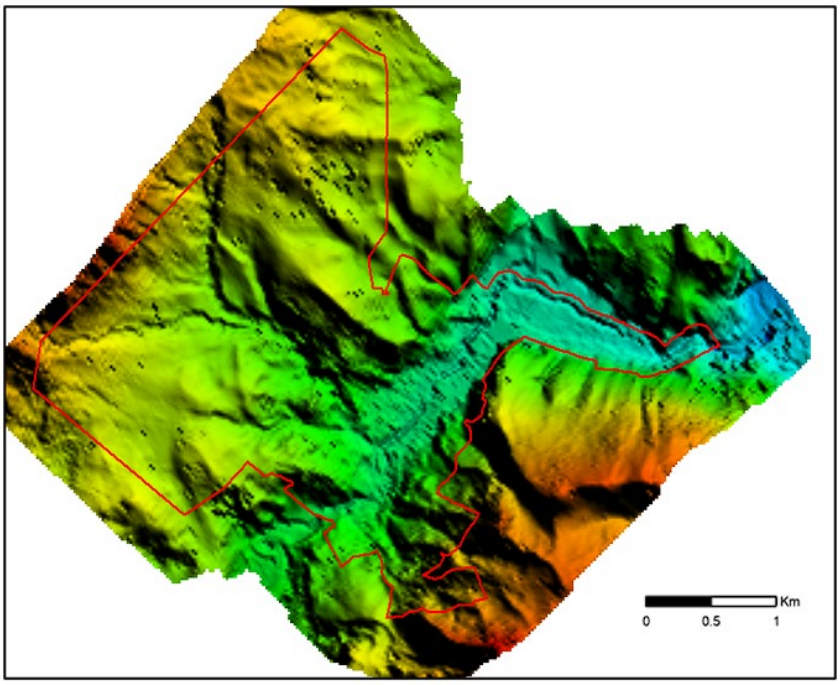
Fuente propia

Figura 42 Nube de puntos clasificada.



Fuente propia

Figura 43 Modelo Digital de Terreno DTM.



Fuente propia

Teniendo en cuenta los parámetros de resolución para la escala 1:1000 de la resolución 471 del IGAC, la resolución final de la ortofoto fue de 7 cm/px y el DTM de 70 cm/px, inferiores a los 10 cm/px y 100 cm/px respectivamente, que son los valores máximos.

Cálculo de Exactitud Posicional

El cálculo de exactitud posicional horizontal y Vertical, según lo expuesto en el presente desarrollo se basa en los establecido en la resolución 471 del IGAC y La norma Técnica Colombiana 6271, basadas en la ASPRS 2014, las cuales usan el método NSSDA para los cálculos y parámetros. Para lo cual en cada uno de los métodos de georreferenciación se tomó como dato real o de mayor nivel de precisión las coordenadas y alturas derivadas del postproceso GNSS.

Para la obtención de la exactitud horizontal sobre cada uno de los ortmosaicos se marcaron y extrajeron las coordenadas de los 21 puntos de verificación, en el caso de la exactitud vertical mediante el uso de herramientas de geoprocesamiento de extrajo la información de altura del DTM.

Estos datos se llevaron al formato de exactitud posicional en el cual se calculó el error medio, la desviación estándar y el RMSE, en los componentes horizontal y vertical, para finalmente obtener las precisiones con un nivel de confianza del 95%, usando los factores establecidos en las especificaciones.

El resultado del cálculo de exactitud posicional para los métodos establecidos; RTK, PPK y PPK con puntos de control se muestran en la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14.

Tabla 12 Exactitud posicional absoluta método PPK y GCP

EVALUACIÓN DE EXACTITUD POSICIONAL NSSDA PPK y GCP									
Punto ID	**Valores derivados del mapa**			**Valores verificados de puntos levantados**			**Residual (errores)**		
	Coordenadas Norte	**Coordenadas Este**	**Elevación**	**Coordenadas Norte**	**Coordenadas Este**	**Elevación**	**Coordenadas Norte**	**Coordenadas Este**	**Elevación (h)**
	Metros	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**
VER01	1013963.872	1010340.604	2816.432	1013963.891	1010340.575	2816.389	-0.019	0.029	0.043
VER02	1014483.233	1010824.541	2780.027	1014483.278	1010824.456	2779.946	-0.045	0.085	0.081
VER03	1014660.801	1011052.993	2771.731	1014660.792	1011052.928	2771.547	0.009	0.065	0.184
VER04	1014864.702	1011243.746	2775.690	1014864.720	1011243.664	2775.447	-0.018	0.082	0.243
VER05	1015419.341	1011662.590	2797.506	1015419.456	1011663.047	2796.841	-0.115	-0.457	0.665
VER06	1015670.818	1012007.302	2773.090	1015670.918	1012007.913	2773.399	-0.100	-0.611	-0.309
VER07	1014859.243	1011964.463	2757.709	1014859.305	1011964.469	2757.961	-0.062	-0.006	-0.252
VER08	1014598.109	1011734.121	2769.849	1014598.012	1011734.816	2770.011	0.097	-0.695	-0.162
VER09	1014287.048	1011697.049	2751.339	1014287.058	1011697.079	2751.302	-0.010	-0.030	0.037
VER11	1013600.040	1010763.617	2767.756	1013600.087	1010763.530	2767.563	-0.047	0.087	0.193
VER12	1013384.544	1011125.722	2765.378	1013384.401	1011125.752	2765.071	0.143	-0.030	0.307
VER13	1013502.115	1011414.289	2753.415	1013502.003	1011414.180	2753.553	0.112	0.109	-0.138
VER14	1013938.691	1011571.440	2719.014	1013938.671	1011571.485	2718.961	0.020	-0.045	0.053
VER16	1014323.137	1012429.228	2687.903	1014323.166	1012428.837	2688.375	-0.029	0.391	-0.472
VER18	1013529.538	1012030.351	2680.617	1013529.532	1012030.293	2680.703	0.006	0.058	-0.086
VER19	1013388.445	1011737.628	2708.526	1013388.472	1011737.757	2708.626	-0.027	-0.129	-0.100
VER20	1013015.555	1011842.628	2718.027	1013015.605	1011842.736	2718.261	-0.050	-0.108	-0.234
VER21	1013215.215	1012300.632	2726.749	1013215.219	1012300.578	2726.889	-0.004	0.054	-0.140
VER22	1013979.572	1012551.301	2672.541	1013980.090	1012551.027	2672.908	-0.518	0.274	-0.367
VER23	1014306.604	1013156.484	2665.426	1014306.645	1013156.288	2665.482	-0.041	0.196	-0.056
VER24	1014159.552	1013286.070	2661.942	1014159.550	1013286.004	2661.702	0.002	0.066	0.240
						Número de puntos de verificación	21	21	21
						Error medio (m)	-0.033	-0.029	-0.013
						Desviación estándar (m)	0.128	0.264	0.264
						RMSE (m)	0.129	0.259	0.258
						RMSE r (m)	0.290		0.258
						Precisión Horizontal a 95% de nivel de confianza	0.501		
						Precisión Vertical a 95% de nivel de confianza	0.505		

Tabla 13 Exactitud posicional absoluta método PPK

EVALUACIÓN DE EXACTITUD POSICIONAL NSSDA PPK									
Punto ID	**Valores derivados del mapa**			**Valores verificados de puntos levantados**			**Residual (errores)**		
	Coordenadas Norte	**Coordenadas Este**	**Elevación**	**Coordenadas Norte**	**Coordenadas Este**	**Elevación**	**Coordenadas Norte**	**Coordenadas Este**	**Elevación (h)**
	Metros	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**
VER01	1013963.898	1010340.631	2816.440	1013963.891	1010340.575	2816.389	0.007	0.056	0.051
VER02	1014483.214	1010824.466	2779.810	1014483.278	1010824.456	2779.946	-0.064	0.010	-0.136
VER03	1014660.785	1011052.870	2771.480	1014660.792	1011052.928	2771.547	-0.007	-0.058	-0.067
VER04	1014864.734	1011243.655	2775.300	1014864.720	1011243.664	2775.447	0.014	-0.009	-0.147
VER05	1015419.346	1011662.524	2797.140	1015419.456	1011663.047	2796.841	-0.110	-0.523	0.299
VER06	1015670.851	1012007.324	2772.880	1015670.918	1012007.913	2773.399	-0.067	-0.589	-0.519
VER07	1014859.333	1011964.495	2757.390	1014859.305	1011964.469	2757.961	0.028	0.026	-0.571
VER08	1014598.145	1011734.028	2769.620	1014598.012	1011734.816	2770.011	0.133	-0.788	-0.391
VER09	1014287.023	1011697.066	2751.120	1014287.058	1011697.079	2751.302	-0.035	-0.013	-0.182
VER11	1013600.085	1010763.494	2767.500	1013600.087	1010763.530	2767.563	-0.002	-0.036	-0.063
VER12	1013384.424	1011125.743	2764.950	1013384.401	1011125.752	2765.071	0.023	-0.009	-0.121
VER13	1013502.003	1011414.334	2753.170	1013502.003	1011414.180	2753.553	0.000	0.154	-0.383
VER14	1013938.650	1011571.523	2718.790	1013938.671	1011571.485	2718.961	-0.021	0.038	-0.171
VER16	1014323.083	1012429.276	2687.830	1014323.166	1012428.837	2688.375	-0.083	0.439	-0.545
VER18	1013529.583	1012030.372	2680.420	1013529.532	1012030.293	2680.703	0.051	0.079	-0.283
VER19	1013388.494	1011737.668	2708.370	1013388.472	1011737.757	2708.626	0.022	-0.089	-0.256
VER20	1013015.603	1011842.716	2717.850	1013015.605	1011842.736	2718.261	-0.002	-0.020	-0.411
VER21	1013215.259	1012300.661	2726.430	1013215.219	1012300.578	2726.889	0.040	0.083	-0.459
VER22	1013979.410	1012551.416	2672.280	1013980.090	1012551.027	2672.908	-0.680	0.389	-0.628
VER23	1014306.556	1013156.316	2665.460	1014306.645	1013156.288	2665.482	-0.089	0.028	-0.022
VER24	1014159.541	1013286.218	2661.770	1014159.550	1013286.004	2661.702	-0.009	0.214	0.068
						Número de puntos de verificación	21	21	21
						Error medio (m)	-0.041	-0.029	-0.235
						Desviación estándar (m)	0.156	0.289	0.242
						RMSE (m)	0.158	0.283	0.333
						RMSE r (m)	0.325		0.333
						Precisión Horizontal a 95% de nivel de confianza	0.562		
						Precisión Vertical a 95% de nivel de confianza	0.653		

Tabla 14 Exactitud posicional absoluta método RTK.

EVALUACIÓN DE EXACTITUD POSICIONAL RTK									
Punto ID	**Valores derivados del mapa**			**Valores verificados de puntos levantados**			**Residual (errores)**		
	Coordenadas Norte	**Coordenadas Este**	**Elevación**	**Coordenadas Norte**	**Coordenadas Este**	**Elevación**	**Coordenadas Norte**	**Coordenadas Este**	**Elevación (h)**
	Metros	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**
VER01	1013963.892	1010340.611	2816.320	1013963.891	1010340.575	2816.389	0.001	0.036	-0.069
VER02	1014483.199	1010824.482	2779.940	1014483.278	1010824.456	2779.946	-0.079	0.026	-0.006
VER03	1014660.760	1011052.883	2771.610	1014660.792	1011052.928	2771.547	-0.032	-0.045	0.063
VER04	1014864.710	1011243.642	2775.480	1014864.720	1011243.664	2775.447	-0.010	-0.022	0.033
VER05	1015419.371	1011662.516	2796.840	1015419.456	1011663.047	2796.841	-0.085	-0.531	-0.001
VER06	1015670.854	1012007.342	2772.860	1015670.918	1012007.913	2773.399	-0.064	-0.571	-0.539
VER07	1014859.319	1011964.464	2757.660	1014859.305	1011964.469	2757.961	0.014	-0.005	-0.301
VER08	1014598.131	1011734.121	2769.730	1014598.012	1011734.816	2770.011	0.119	-0.695	-0.281
VER09	1014287.015	1011697.068	2751.270	1014287.058	1011697.079	2751.302	-0.043	-0.011	-0.032
VER11	1013600.054	1010763.489	2767.550	1013600.087	1010763.530	2767.563	-0.033	-0.041	-0.013
VER12	1013384.388	1011125.726	2764.980	1013384.401	1011125.752	2765.071	-0.013	-0.026	-0.091
VER13	1013502.031	1011414.277	2753.330	1013502.003	1011414.180	2753.553	0.028	0.097	-0.223
VER14	1013938.614	1011571.457	2718.910	1013938.671	1011571.485	2718.961	-0.057	-0.028	-0.051
VER16	1014323.083	1012429.276	2687.910	1014323.166	1012428.837	2688.375	-0.083	0.439	-0.465
VER18	1013529.533	1012030.361	2680.490	1013529.532	1012030.293	2680.703	0.001	0.068	-0.213
VER19	1013388.457	1011737.648	2708.360	1013388.472	1011737.757	2708.626	-0.015	-0.109	-0.266
VER20	1013015.603	1011842.694	2717.960	1013015.605	1011842.736	2718.261	-0.002	-0.042	-0.301
VER21	1013215.229	1012300.661	2726.730	1013215.219	1012300.578	2726.889	0.010	0.083	-0.159
VER22	1013979.380	1012551.437	2672.650	1013980.090	1012551.027	2672.908	-0.710	0.410	-0.258
VER23	1014306.575	1013156.410	2665.940	1014306.645	1013156.288	2665.482	-0.070	0.122	0.458
VER24	1014159.518	1013286.162	2661.890	1014159.550	1013286.004	2661.702	-0.032	0.158	0.188
						Número de puntos de verificación	21	21	21
						Error medio (m)	-0.055	-0.033	-0.120
						Desviación estándar (m)	0.157	0.275	0.222
						RMSE (m)	0.163	0.270	0.248
						RMSE r (m)	0.316		0.248
						Precisión Horizontal a 95% de nivel de confianza	0.546		
						Precisión Vertical a 95% de nivel de confianza	0.486		

Los resultados del error medio cuadrático RSME y de precisión a 95% de nivel de confianza para cada uno de los métodos de georreferenciación y los valores a cumplir en la especificación se consolidan en la siguiente tabla:

Tabla 15 RSME y precisión al 95% de confianza exactitud posicional.

Componente	***Especificación Técnica***	***PPK y GCP***	***PPK***	***RTK***
RSME	***0.30 m***	*0.29*	*0.325*	*0.316*
RSME r	***0.30 m***	*0.258*	*0.333*	*0.248*
Precisión horizontal al 95% de confianza	***0.52 m***	*0.501*	*0.562*	*0.546*
Precisión vertical al 95% de confianza	***0.60 m***	*0.505*	*0.653*	*0.486*

Estos cálculos se realizaron considerando únicamente los valores de los puntos de verificación, sin embargo, la especificación 471 permite el uso de los puntos de control para el cálculo de la exactitud posicional, motivo por el cual se realizó el cálculo de exactitud solo con los puntos de control en el producto de PPK y puntos de control terrestre GCP para considerar su impacto en la totalidad del producto geográfico en cuanto a calidad, resultado que se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 16 Exactitud posicional absoluta método PPK + GCP.

EVALUACIÓN DE EXACTITUD POSICIONAL NSSDA GCP									
Punto ID	**Valores derivados del mapa**			**Valores verificados de puntos levantados**			**Residual (errores)**		
	Coordenadas Norte	**Coordenadas Este**	**Elevación**	**Coordenadas Norte**	**Coordenadas Este**	**Elevación**	**Coordenadas Norte**	**Coordenadas Este**	**Elevación (h)**
	Metros	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**	**Metros**
GCP01	1014236.479	1010479.808	2808.321	1014236.478	1010479.842	2808.36	0.001	-0.034	-0.039
GCP02	1014820.851	1011159.709	2764.794	1014820.775	1011160.033	2764.949	0.076	-0.324	-0.155
GCP03	1015544.471	1011767.277	2793.588	1015544.453	1011767.273	2793.493	0.018	0.004	0.095
GCP04	1013756.089	1010620.710	2775.312	1013756.019	1010620.896	2775.075	0.070	-0.186	0.237
GCP05	1014115.954	1011430.962	2734.204	1014115.858	1011430.876	2734.07	0.096	0.086	0.134
GCP06	1015045.538	1011979.119	2767.911	1015045.642	1011979.027	2768.097	-0.104	0.092	-0.186
GCP07	1013377.582	1010997.037	2760.656	1013377.708	1010996.956	2761.449	-0.126	0.081	-0.793
GCP08	1013641.454	1011589.259	2734.134	1013641.202	1011589.582	2734.555	0.252	-0.323	-0.421
GCP09	1014091.891	1011875.881	2732.200	1014091.793	1011875.833	2732.438	0.098	0.048	-0.238
GCP10	1014281.224	1012405.280	2692.251	1014281.169	1012405.334	2691.968	0.055	-0.054	0.283
GCP11	1013373.175	1012030.229	2683.331	1013373.155	1012030.256	2683.391	0.020	-0.027	-0.060
GCP12	1013672.772	1012492.858	2704.619	1013672.820	1012492.695	2704.647	-0.048	0.163	-0.028
GCP13	1014240.272	1012832.427	2670.180	1014240.161	1012832.309	2669.801	0.111	0.118	0.379
GCP14	1012913.766	1012172.751	2750.347	1012913.583	1012172.838	2750.405	0.183	-0.087	-0.058
GCP15	1014045.377	1013541.325	2664.567	1014045.327	1013541.323	2664.807	0.050	0.002	-0.240
Número de puntos de verificación							15	15	15
Error medio (m)							0.050	-0.030	-0.073
Desviación estándar (m)							0.099	0.148	0.295
RMSE (m)							0.108	0.146	0.294
RMSE r (m)							0.182		0.294
Precisión Horizontal a 95% de nivel de confianza							0.315		
Precisión Vertical a 95% de nivel de confianza							0.576		

Analisis de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos durante las etapas de captura y procesamiento de la información y su correspondiente evaluación de exactitud posicional, se procedió a analizar las precisiones, desplazamientos y errores tanto en las fotografías y puntos ocupados, así como el procesamiento del bloque fotogramétrico con la finalidad de determinar la calidad del dato respecto a los estándares establecidos en la resolución 471 Y 259 del año 2020 del IGAC.

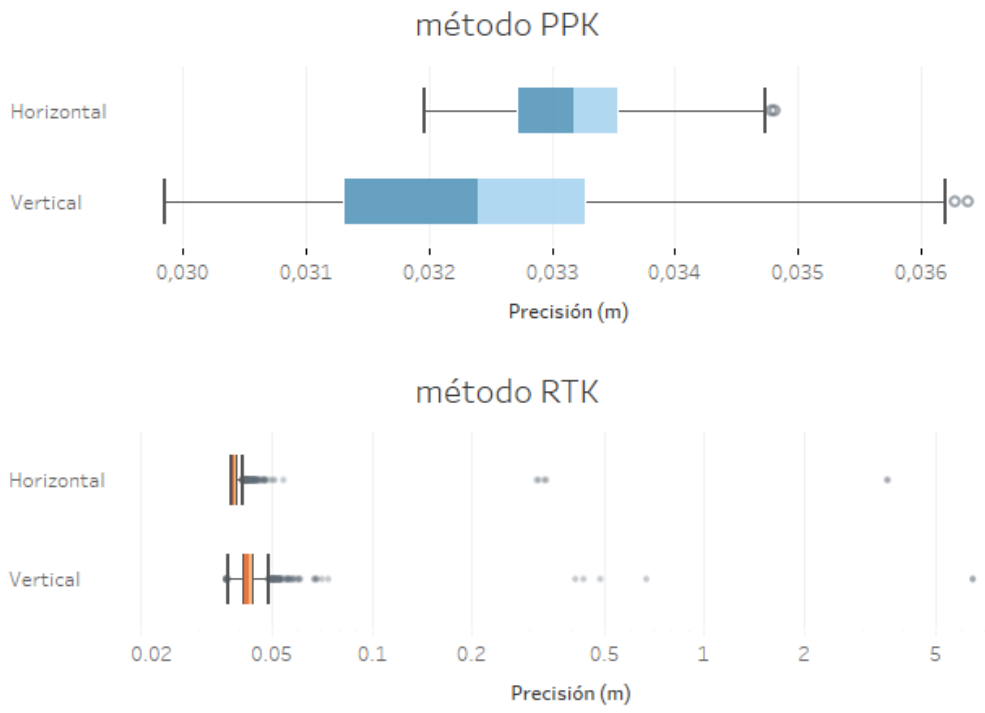
Precisión relativa de las fotografías

Al realizar el análisis de las precisiones de las fotografías capturadas con el equipos RPAS y el método de determinación de coordenadas, se evidencio que por el método RTK el promedio de precisión horizontal fue de 0.047 m y 0.058 m en el componente vertical, siendo mayor al promedio de precisión de las fotografías por el método PPK que fue de 0.033 m en horizontal y 0.032 en vertical, lo cual desde la teoría es un resultado esperado por el orden de precisión que manejan los dos métodos también en levantamientos convencionales.

Respecto a las desviaciones estándar, una vez generada la estadística es notorio el sesgo que producen las fotografías sin solución RTK durante la captura, dado que tiene valores de ±0.158 m en horizontal y ±0.287 m en vertical, mientras que en el método PPK la desviación estándar es de ±0.001 m en los dos componentes, sustentado en este caso, que la mejor precisión relativa se obtuvo de las fotografías georreferenciadas con PPK, además

de que por este método la totalidad del polígono tiene fotografías con valores de precisión mu cercanos entre sí.

Figura 44 Media precisión fotografías por el método RTK y PPK.



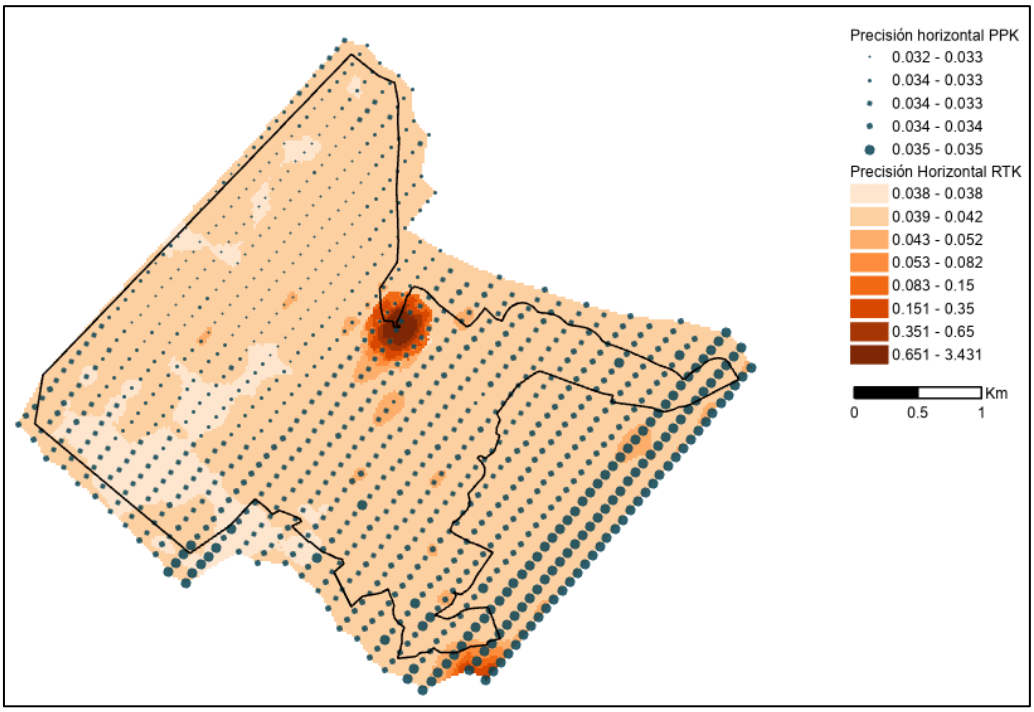
Fuente propia

Para el método PPK horizontalmente el 50% de los datos se encuentran entre 0.0343 m y 0.034 m mientras que verticalmente se encuentran entre 0.031 m y 0.033 m en donde el rango es de 0.006 m; Por otra parte, el método RTK presenta valores atípicos fuera del mínimo y máximo de 0.037 m y 0.048 m, en donde el 50% de los datos horizontalmente se encuentran entre 0.038 m y 0.039 m y verticalmente entre 0.041 m y 0.044 m.

Con base en la información recolectada, el método RTK brinda una precisión del orden de 5 cm, sin embargo, esta precisión se ve comprometida a factores técnicos (alcance de la antena RTK, intermitencias, perdida de conexión a internet, entre otras), condiciones

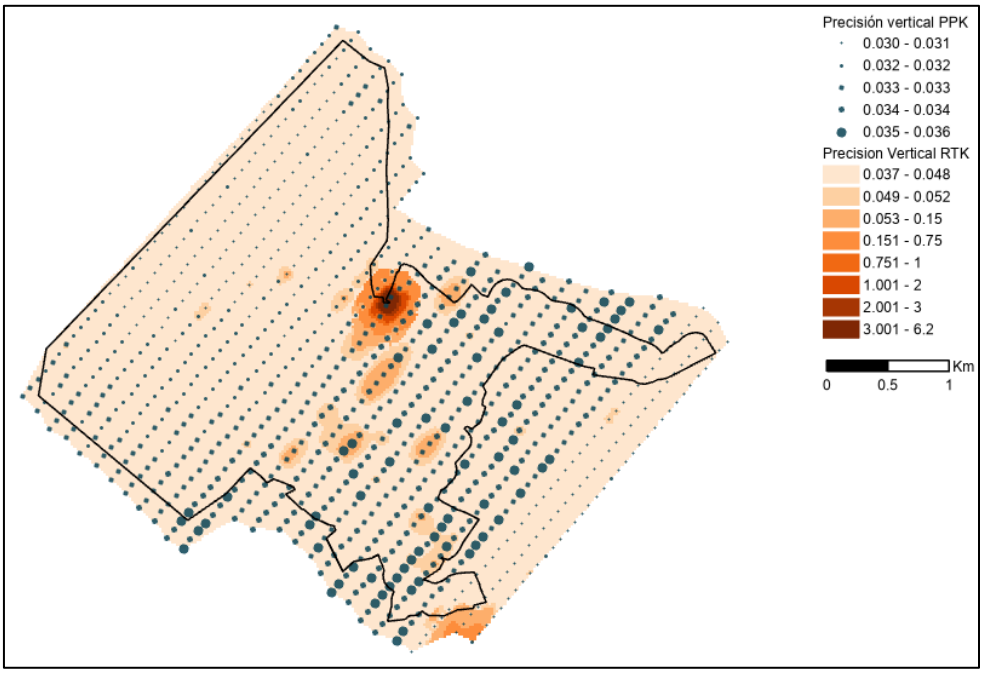
atmosféricas o meteorológicas las cuales influyeron en un porcentaje bajo (0.6%) de las fotografías, en donde la precisión fue superior a esa media alcanzando un máximo de 3.40 m horizontalmente y 6.2 m verticalmente.

Figura 45 Precisión horizontal de las fotografías por el método RTK y PPK.



Fuente propia

Figura 46 Precisión vertical de las fotografías por el método RTK y PPK



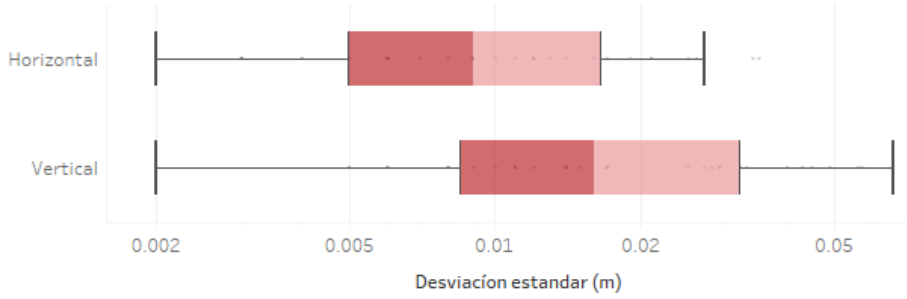
Fuente propia

De acuerdo con las figuras anteriores se puede inferir que el método PPK tiene un comportamiento radial en cuanto precisión de las fotografías, es decir, que cuanto más alejada esta la fotografía de la base, menor es la precisión resultante de la coordenada corregida la disminución, que aunque en el presente proyecto no es considerable, para proyectos de mayor extensión es un factor que puede afectar la calidad del producto en ciertas zonas de captura, mientras que en el RTK el comportamiento es similar en todo el área del proyecto, teniendo alteraciones atípicas en zonas puntales sustentada en posibles problemas de conexión, perdida de señal, obstáculo u otros factores, además de que ser corrección por protocolo de internet su impacto en zonas de pequeña y mediana extensión es menor al del PPK por el mismo alcance de esta tecnología.

Red de puntos de control y verificación.

Los resultados obtenidos del procesamiento geodésico muestran que la media geométrica fue de 0.012 m horizontal y 0.022 verticalmente con una varianza de 0.009 m y 0.017 m respectivamente, asegurando un grado de precisión superior en el conjunto de datos de referencia CDR respecto a la precisión media de las fotografías.

Figura 47 Desviación estándar conjunto de datos CDR

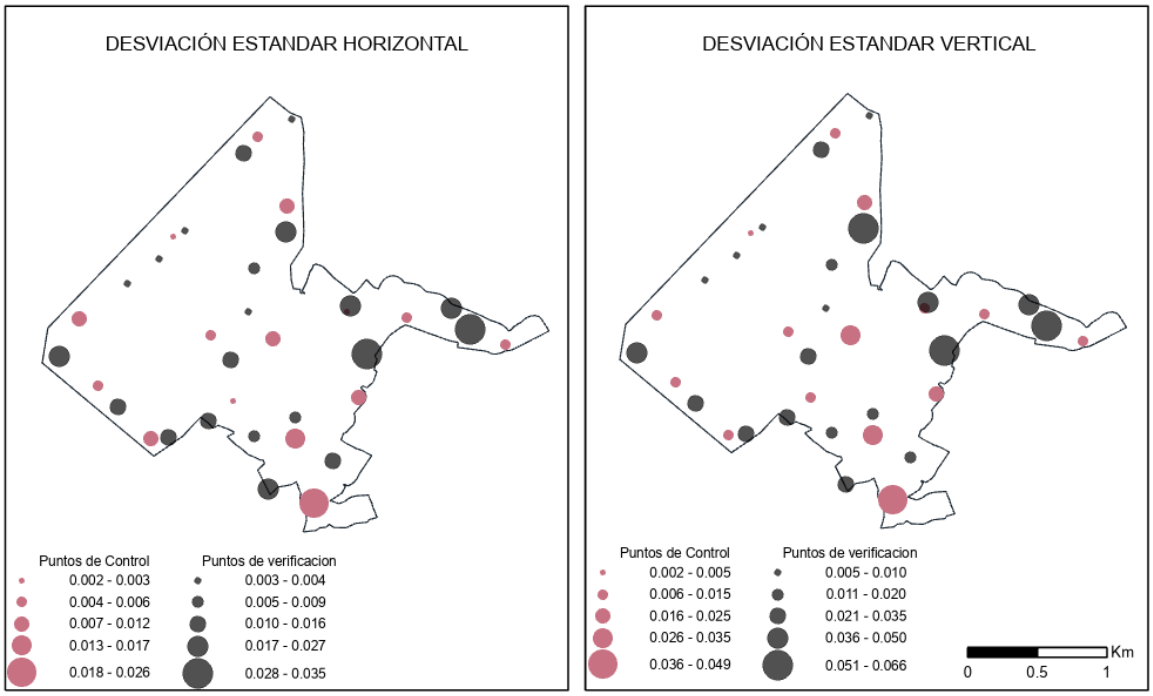


Fuente propia

De acuerdo con la figura anterior, el valor mínimo es de 0.002 m y máximo de 0.027 m horizontal y vertical de 0.066 m en donde el 75% de los datos cuentan con una desviación estándar horizontal inferior a 0.017 m y vertical de 0.032m.

Por otra parte, las mayores desviaciones en los puntos de verificación se encuentran localizados en la zona nororiental con valor de 0.035 m horizontal y 0.066 m verticalmente, mientras que los puntos de control con mayor desviación se encuentran ubicados en la zona sur con 0.026 m horizontal y 0.049 m vertical tal como se muestra en la Figura 48.

Figura 48 Desviación estándar puntos de control y verificación.



Fuente propia

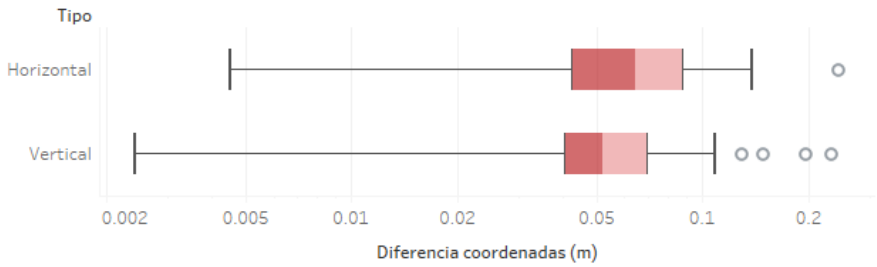
Otro aspecto que se pudo analizar es la relación de la precisión relativa de las fotografías y los posicionamientos, de la cual se puede identificar de forma cualitativa tomando como referencia las Figura 48, que las zonas con menores precisiones en el postproceso GNSS son coherentes con los menores valores de precisión de las fotografías con método RTK, lo cual puede significar, que en estas zonas se presentan condiciones adversas que afectan la calidad de la información capturada y consigo afectar la precisión absoluta de los productos en estas zonas.

Variación de coordenadas de las aerofotografías por método de georreferenciación

Al generar el análisis estadístico entre las coordenadas georreferenciadas mediante el método PPK respecto al método RTK se encontró que la diferencia media horizontal es de 0.065 y 0.055 m en el componente vertical, así mismo esta diferencia para el 75% de los

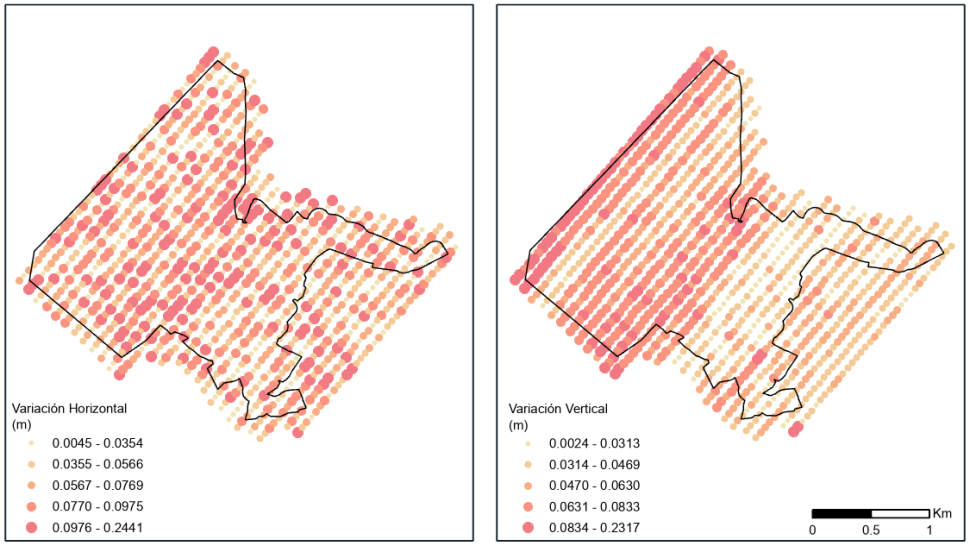
datos es de 0.088 m horizontal y vertical de 0.067 m y los cuartiles Q1, Q2 y Q3 no muestran diferencias significativas respecto el rango de dispersión horizontal y vertical tal como se evidencia en la Figura 49.

Figura 49 Diferencia de coordenadas RTK y PPK.



Fuente propia

Figura 50 Diferencias coordenadas crudas PPK y RTK



Fuente propia

Al contrastar estas diferencias de manera gráfica, horizontalmente tiene un comportamiento constante en todo el polígono, diferente al componente vertical, que

evidencia un comportamiento más variable, especialmente en la parte norte que es la zona más cercana a la base del PPK, evidenciando que el componente vertical puede generar mayor incertidumbre al producto final y claramente es más notorio la influencia del PPK en este aspecto.

Variación de coordenadas ajustadas en la aerotringulación

Al obtener las coordenadas del ajuste de la aerotringulación se determinaron las diferencias entre las coordenadas ajustadas respecto a las coordenadas iniciales para cada uno de los métodos, de lo cual se encontró que no hay variabilidad considerable entre los métodos de georreferenciación; No obstante, esta variación derivada del procesamiento fotogramétrico es menor en el método PPK, posiblemente por la distribución constante de precisión relativa en las fotografías que es mejor a las derivadas del RTK, como se evidencio anteriormente.

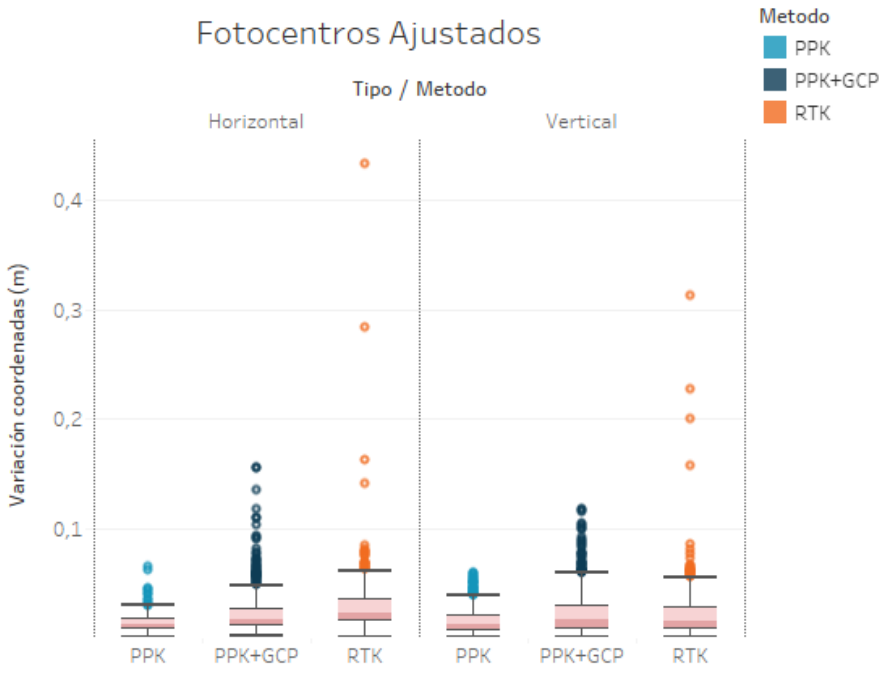
Además de esta comparación, se agregaron los resultados del procesamiento usando puntos de control terrestre, considerándolo de mayor peso dado que el bloque es ajustado a coordenadas determinadas con métodos de precisión superior (Estático diferencial), sin embargo, las diferencias son similares en los tres métodos, sin valores atípicos en relación a las coordinada inicial y la ajustada, permitiendo inferir que el conjunto de datos tiene un comportamiento relativo optimo, dado que no se presentaron diferencias superiores a la precisión media de las fotografías y tamaño del GSD.

Tabla 17 Diferencias fotocentros ajustados método PPK y RTK.

Parámetro	***RTK***		***PPK***		***PPK y GCP***	
	Δ HZ	***ΔZ***	***Δ HZ***	***ΔZ***	***Δ HZ***	***ΔZ***
Media	*0.026*	*0.019*	*0.012*	*0.014*	*0.020*	*0.021*
Mediana	*0.023*	*0.014*	*0.011*	*0.012*	*0.017*	*0.016*

Desviación estándar	*0.022*	*0.02*	*0.007*	*0.011*	*0.016*	*0.018*
Mínimo	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
Máximo	*0.434*	*0.313*	*0.065*	*0.059*	*0.156*	*0.117*
Nivel de confianza (95.0%)	*0.001*	*0.001*	*0*	*0.001*	*0.001*	*0.001*

Figura 51 Fotocentros ajustados aerotringulación



Fuente propia

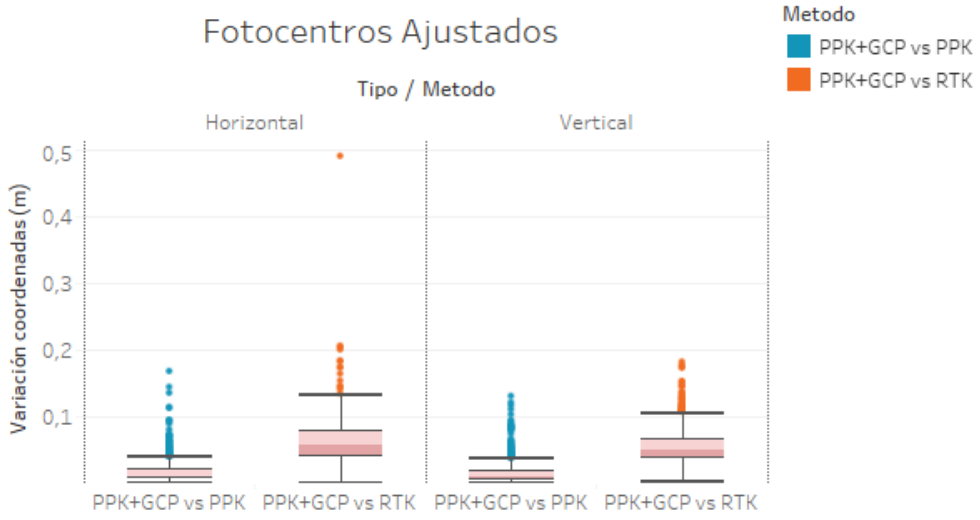
Para el método PPK el 75% de los fotocentros ajustados tienen una variación en la posición inicial inferior a 0.016 m, para el método PPK+GCP 0.025 m y para el método RTK 0.034 m. El método RTK presenta mayores valores atípicos comprendidos entre 0.061 m hasta 0.434 m mientras que en PPK+GCP estos valores atípicos son inferiores a 0.156 m.

Diferencia Absoluta de coordenadas por cada método de georreferenciación.

Partiendo del postulado de que el método que brinda mayor precisión es el uso de puntos de control terrestre junto con la georreferenciación de las fotografías por PPK, se analizaron las coordenadas de los fotocentros ajustados y la variación respecto a los datos de los métodos PPK y RTK, obteniendo los siguientes resultados:

- La diferencia media en el componente horizontal del método PPK + GCP respecto al procesamiento PPK fue de 0.014 m y de 0.015 m en el componente vertical.
- La diferencia media en el componente horizontal del PPK + GCP respecto al procesamiento RTK fue de 0.057 m y de 0.054 m en el componente vertical.

Figura 52 Diferencias fotocentros ajustados PPK + GCP respecto al método RTK y PPK.



Fuente propia

Para el 75% de los datos, la diferencia de posición entre el método PPK+GCP y el método PPK es inferior a 0.020 y 0.018 m horizontal y vertical respectivamente mientras

que para el método PPK+GCP y RTK es inferior a 0.077 m horizontal y vertical de 0.065 m.

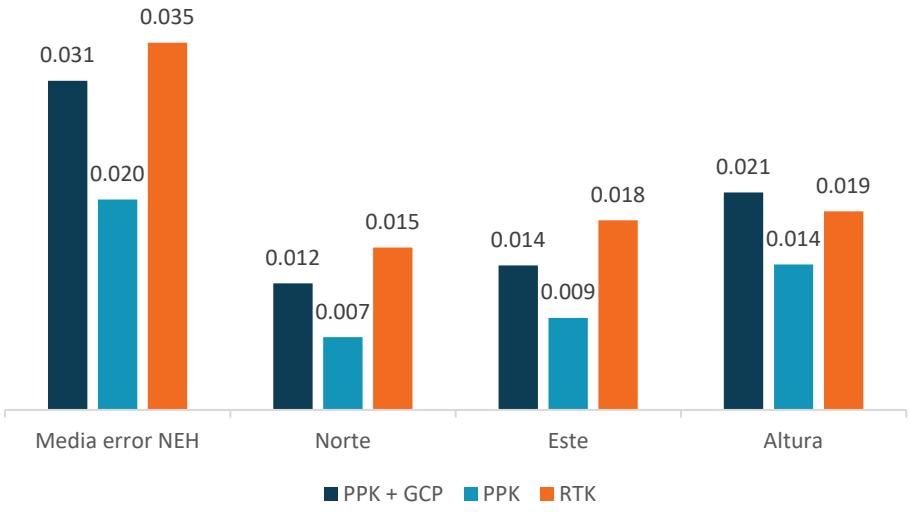
Error medio coordenadas ajustadas en la aerotringulación por cada método.

El procesamiento del bloque fotogramétrico reportó un error promedio de 0.031 m en el método PPK + GCP, 0.020 m para el método PPK y 0.035 para RTK; Lo cual indica que los métodos RTK y PPK son afines entre sí debido en gran medida al bajo porcentaje de imágenes sin solución RTK. Sin embargo, el método PPK + GCP presenta un error mayor al método PPK, posiblemente debido a que el ajuste del bloque fotogramétrico toma como dato de referencia los puntos de control, que al tener un grado de precisión mayor genera mayores desplazamientos del dato crudo de las fotografías al ajustado en el procesamiento o también se puede ver afectado si la coordenada asignada por el postproceso GNSS tiene algún error de cálculo o precisión deficiente.

Tabla 18 Error procesamiento bloque fotogramétrico, método PPK + GCP, PPK y RTK.

Parámetro	***PPK + GCP***	***PPK***	***RTK***
Media	*0.031*	*0.020*	*0.035*
Mediana	*0.026*	*0.018*	*0.031*
Moda	*0.031*	*0.015*	*0.027*
Desviación estándar	*0.021*	*0.010*	*0.026*
Mínimo	*0.003*	*0.001*	*0.004*
Máximo	*0.187*	*0.068*	*0.535*
Nivel de confianza (95.0%)	*0.001*	*0.001*	*0.002*

Figura 53 Error procesamiento bloque fotogramétrico, método PPK + GCP, PPK y RTK.

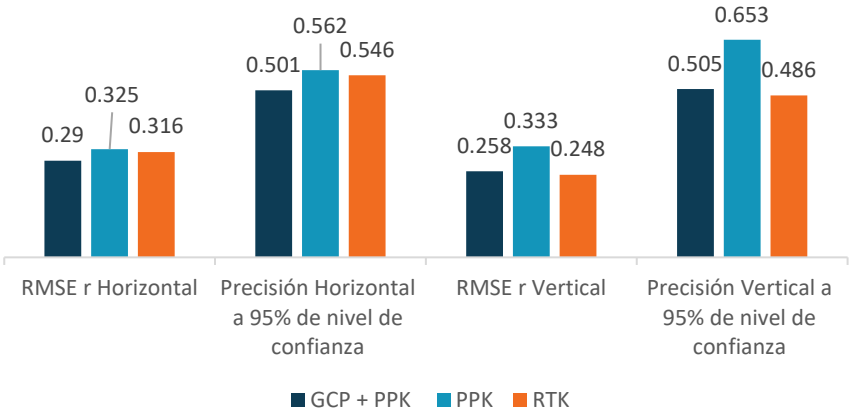


Fuente propia

Cálculo de exactitud absoluta de posición con puntos de verificación.

Por otra parte, al analizar el test NSSDA aplicado sobre los productos finales de los métodos anteriormente descritos, muestra que de acuerdo con la resolución 471 y 529 del año 2020 del IGAC los métodos RTK y PPK no cumplen a cabalidad con lo establecido allí; Mientras que el método PPK + GCP cumple con el estándar de calidad para la generación de productos con fines cartográficos. El error medio cuadrático y precisión en un nivel de confianza del 95% para cada uno de los métodos se observa en la siguiente gráfica.

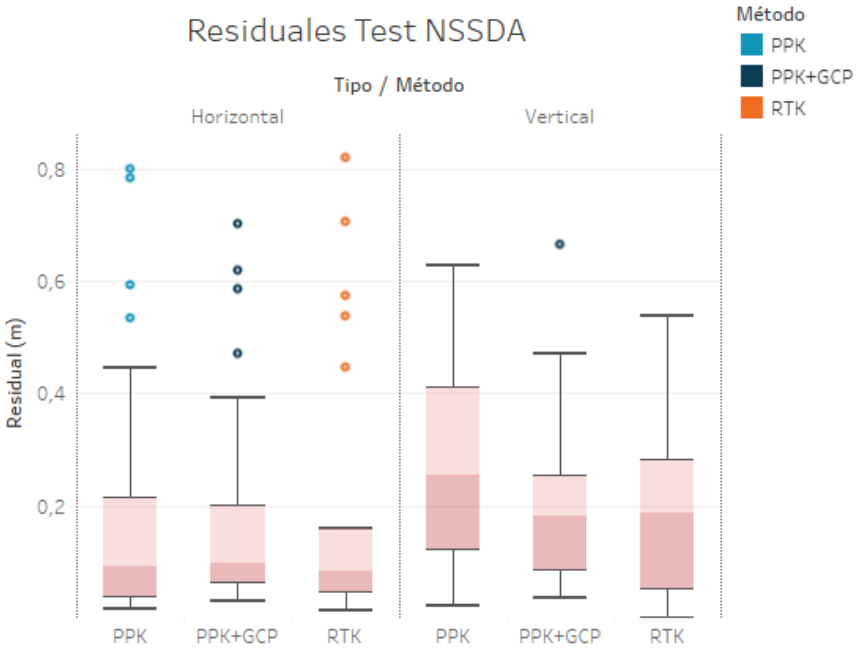
Figura 54 Evaluación de exactitud posicional NSSDA, Métodos RTK, PPK y PPK y GCP.



Fuente propia

Horizontalmente el RMSE y la precisión con un nivel de confianza del 95% se encuentra cercano al límite establecido de 0,30 m y 0.52m, sin embargo, verticalmente los valores obtenidos de RSMEr y precisión al 95% de confianza varían considerablemente, posiblemente generado por las variables y limitaciones que afecta en el componente vertical, adicional a que es una medición indirecta sobre el producto.

Figura 55 Residuales exactitud posicional test NSSDA

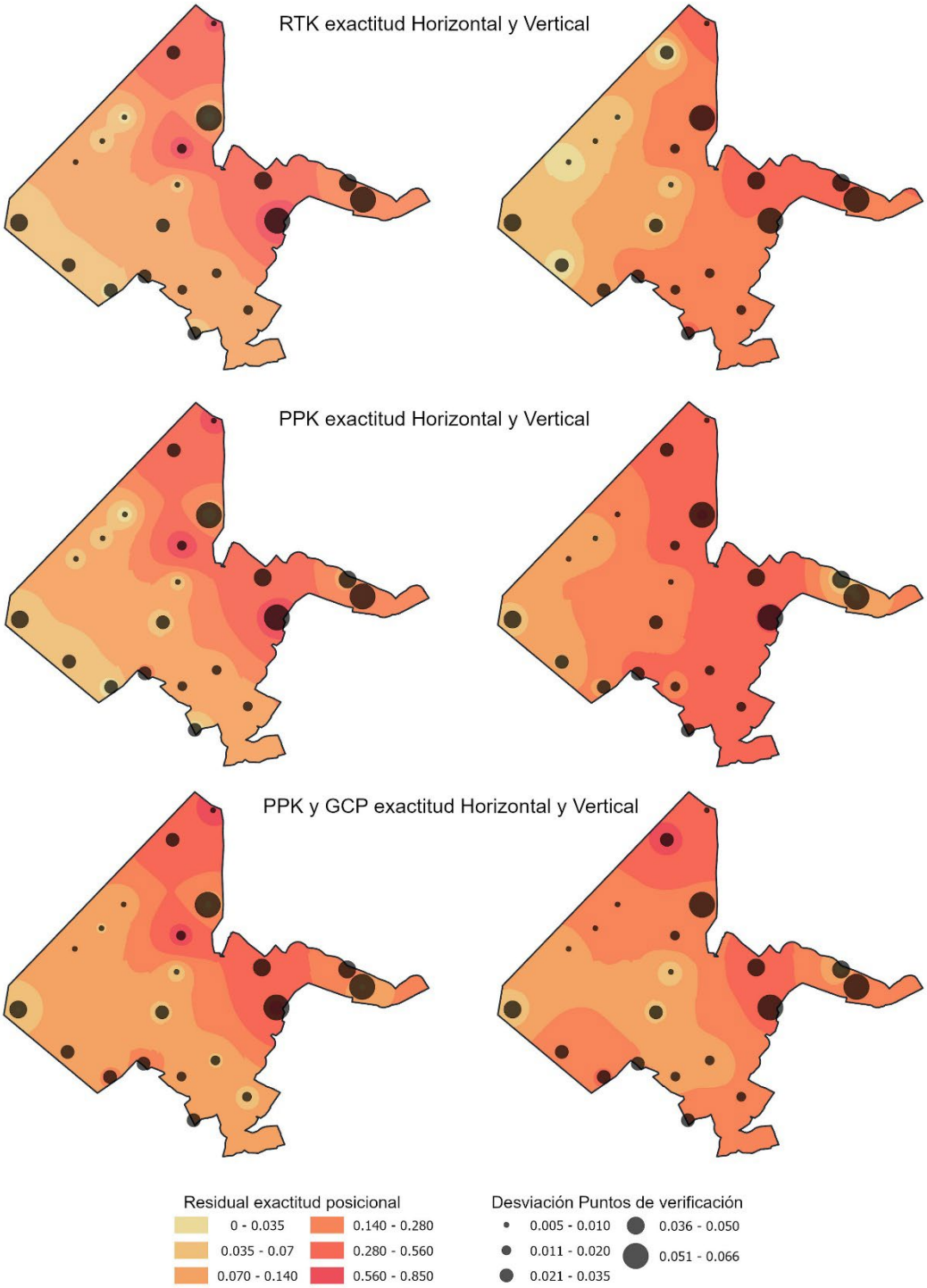


Fuente propia

Estadísticamente, en el componente horizontal el 75% de los residuales en el método PPK se encuentran por debajo de 0.214 m similar al método PPK+GCP en donde se encuentran por debajo de 0.200 m y 0.161 m para el método RTK; Por otra parte, en el componente vertical el 75% de los datos se encuentran por debajo de 0.411 m, 0.252 m y 0.281 m para los métodos PPK, PPK+GCP y RTK respectivamente.

Igualmente se puede apreciar en la Figura 56, que los mayores residuales se encuentran concentrados en la zona sur oriental, una tendencia antes evidenciada al analizar los resultados del postproceso GNSS, lo cual plantea el argumento de que en esta zona hay factores externos que afectan de una u otra forma la información capturada y procesada, dado que en esta misma zona los puntos presentaron mayores desviaciones, y tanto en los vuelos y ocupación GNSS se usó el mismo vértice geodésico base.

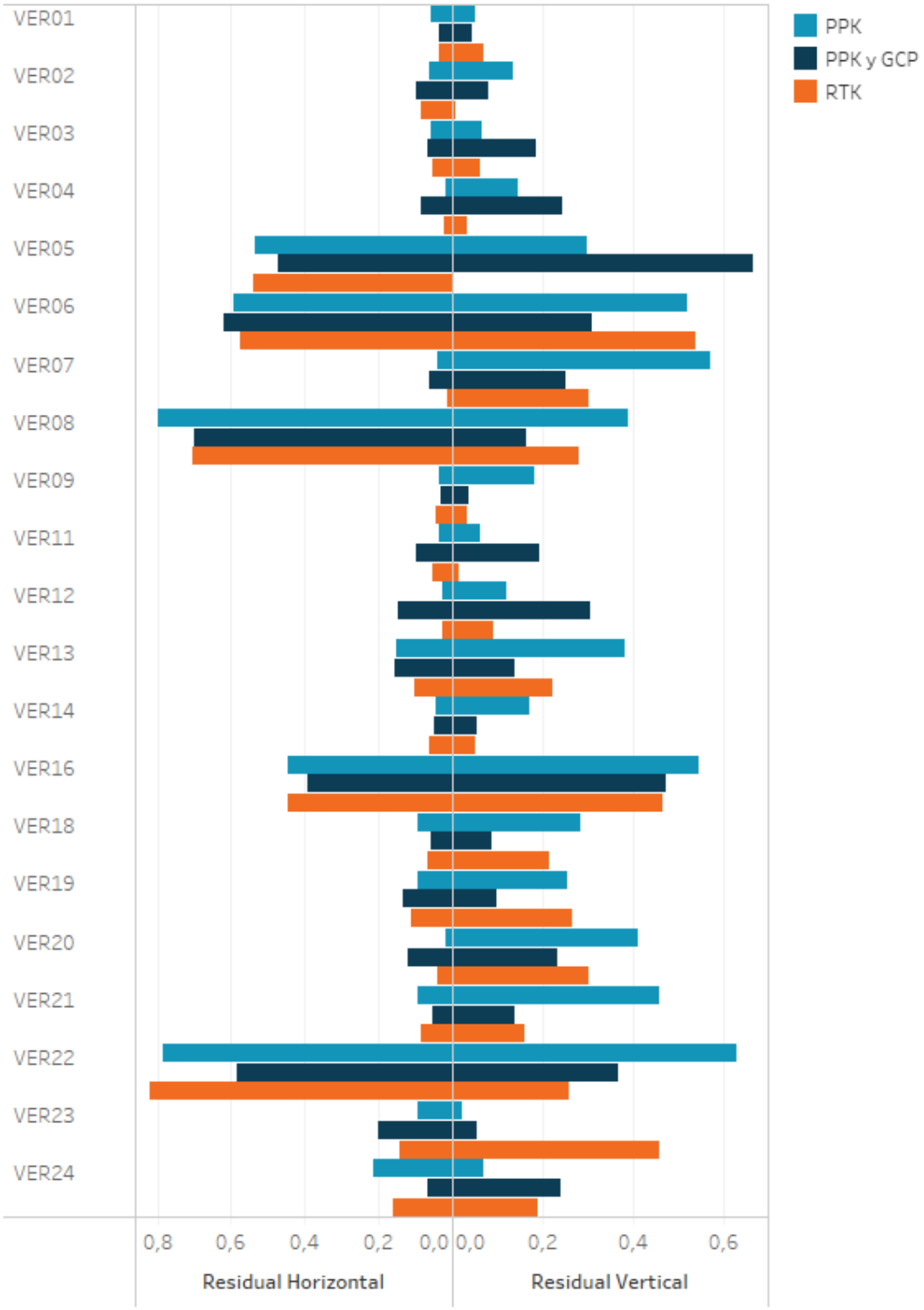
Figura 56 Residuales exactitud posicional y desviación de puntos de verificación



De izquierda a derecha Exactitud posicional horizontal y vertical. Fuente propia

Se puede observar que, en todos los métodos de georreferenciación, el comportamiento horizontal es similar, No obstante, verticalmente el uso de puntos de control generó que los residuales fueron menores respecto a los métodos RTK y PPK. Los residuales se pueden analizar puntualmente para cada método en la Figura 57.

Figura 57 Residuales evaluación exactitud posicional NSSDA, horizontal y vertical



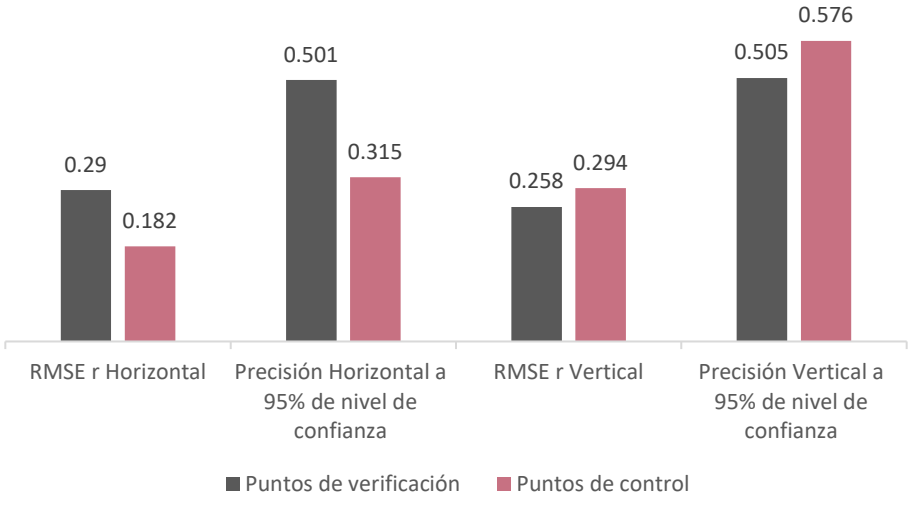
Fuente propia

Igualmente se corrobora la variabilidad del componente vertical y la homogeneidad del componente horizontal mediante el grafico anterior. Sin embargo, se puede evidenciar que hay puntos que tienen un comportamiento anómalo afectando en gran medida los resultados de la exactitud posicional, adicionalmente estos puntos espacialmente se encuentran cercarnos indicando posibles condiciones externas que afectan el conjunto de datos.

Cálculo de exactitud absoluta de posición en puntos de control

Por otra parte, al calcular la exactitud posicional sobre puntos de control, los residuales son inferiores respecto a los puntos de verificación en cada uno de los métodos de georreferenciación, debido a que la aerotringulación tiene como referencia de ajuste del bloque estos puntos, motivo por el cual, de manera radial, cuanto más cercano se esté de un punto de control mayor precisión tendrán los datos extraídos de los productos geográficos.

Figura 58 Evaluación exactitud posicional NSSDA sobre puntos de control y verificación.



Fuente propia

Conclusiones

- El método de georreferenciación PPK tiene un nivel mayor de confiabilidad al RTK en cuento a la precisión de corrección de posición, además asegurar poca variabilidad en el conjunto de datos, como lo evidencia el valor de ±0.001 m de desviación estándar, lo cual indica que la precisión de todas las fotografías se encuentran muy cercanas al valor de la media, caso contrario al RTK, en el cual 6 fotografías no tuvieron solución, motivo por el cual la desviación del conjunto de datos se vio afectada, sin embargo esto solo representa el 0.6% del total, que según el Figura 44 muestra que hasta el cuartil No 3 los datos se agrupan en un rango de 3.8 cm hasta 3.9 cm representando valores atípicos que se podrían excluir, considerando su impacto en la Aero triangulación.

-La precisión de las fotografías por el método PPK es inversamente proporcional, dado que a mayor distancia de la base menor es la precisión de corrección de la fotografía, motivo por el cual, en la planeación de vuelos, es importante establecer la distancia de captura de fotografías optima y establecer con ello bases distribuidas en la zona de trabajo que permitan garantizar al conjunto de datos correcciones similares.

-Por otra parte, la desviación estándar horizontal del procesamiento de los datos GNSS muestra una mejor agrupación en los cuartiles Q1, Q2 y Q3, en donde el 50% de los datos se encuentran entre 0.010 m y 0.026 m mientras que en el componente vertical entre 0.016 y 0.049.

-Lo anterior evidencia que en el desarrollo del proyecto la desviación es directamente proporcional a la distancia respecto al vértice base de georreferenciación, dado que a mayor

distancia de corrección mayor fue la desviación estándar. Una tendencia antes evidenciada en las precisiones de las aerofotografías PPK.

-Los fotocentros corregidos por el método RTK-NTRIP respecto al método PPK varían en promedio 0.065 m horizontal y 0.055 m verticalmente, motivo por el cual el alcance de la red NTRIP puede llegar a ser contemplado en la generación de productos cartográficos en condiciones de difícil acceso o baja densificación de la red geodésica nacional.

-De acuerdo con la Figura 51, el método de georreferenciación PPK tiene menor dispersión y valores atípicos respecto a los otros dos métodos, en donde para el caso del método GCP+ PPK se presenta debido al ajuste ejercido en el modelo por la acción de los puntos de control; Sin embargo, en el método RTK se observa que la dispersión es mayor y los valores máximos llegan a triplicar el bloque fotogramétrico PPK+GCP.

-La georreferenciación por el método PPK es más precisa en términos absolutos, dado que el 50% de las diferencias entre el método GCP+PPK respecto al método PPK se encuentran agrupados en un rango de 0.013 m y 0.014 m horizontal y vertical respectivamente, mientras que respecto al método RTK entre 0.037 y 0.028 horizontal y vertical respectivamente presentando valores atípicos en el conjunto de datos.

-En la Figura 55 se permite evidencia que el producto derivado del método de georreferenciación PPK tiene una dispersión superior de los datos respecto al dato de evaluación en comparación al uso de GCP y RTK, con valores dispersos en un rango de 0.176 m en horizontal y 0.29 m en vertical, que representa un aumento del 28% respecto al PPK+GCP en horizontal y del 75% en vertical, y del 51% en horizontal 26% en vertical

respecto al RTK, además de esto, no se evidencian valores máximos o atípicos relevantes en relación a los otros métodos, por lo cual se pondera como el método de georreferenciación con la exactitud absoluta más baja en el presente proyecto.

-El método de georreferenciación que da conformidad al cumplimiento de los valores máximos para la exactitud absoluta de posición establecidos en la resolución 471 y 529 del año 2020 es el método PPK con el uso de puntos de control, con valores de 0.258 m en el RMSE r, y precisión al 95% de confianza de 0.501 m y 0.505 m horizontal y vertical respectivamente, por lo cual consolida la importancia del uso de estos puntos de control en la aerotringulación para asegurar en mayor proporción el cumplimiento en los estándares de calidad.

-El método de georreferenciación PPK no cumplió con el valor máximo establecido en la especificación técnica en 0.042 m (8.08%) en cuanto a la exactitud absoluta horizontal y por 0.053 m (8.83%) respecto a la exactitud vertical, dando no conformidad a calidad de la ortofoto y el modelo digital de terreno.

-El método de georreferenciación RTK no cumplió con el valor máximo establecido en la especificación técnica en 0.026 m (5.19%) en cuanto a la exactitud absoluta horizontal de la ortofoto, mientras que la exactitud vertical del MDT es conforme, con un valor de 0.486 m respecto al máximo establecido de 0.6 m, que representa 0.114 m (19%) de diferencia respecto al estándar.

-Por otra parte el uso de puntos de control terrestre es indispensable para garantizar la precisión y cumplimiento de estándares de exactitud absoluta de posición, si bien los actuales equipos cuentan con sistemas de georreferenciación en vuelo como PPK y RTK, el aseguramiento total de la calidad de los datos en extensiones de nivel cartográfico, junto con las condiciones físicas del territorio colombiano; Requieren de esta metodología de georreferenciación de precisión durante el procesamiento.

-En referencia al desarrollo de este proyecto, se considera el uso de esta tecnología en la ejecución de estos procesos cartográficos como el catastro multipropósito, es viable para proyectos de mediana y pequeña extensión, siempre y cuando las metodologías de captura, procesamiento y análisis cumplan con los requerimientos técnicos de la fotogrametría; Dado que pueden generar insumos de calidad, reduce tiempos de ejecución, tiene menores costos, logística más simple permitiendo el acceso a información detallada en menor temporalidad.

Recomendaciones

-Los resultados del post proceso GNSS de los puntos de control y la georreferenciación de fotografías por el método RTK evidencia que hay zonas puntuales en las cuales factores externos difieren la calidad de la información capturada, pues en las zonas de menor precisión del estático diferencial, coincide con valores bajos de precisión en la solución RTK de las fotografías, lo cual genera que se deba mejorar aumentando la cantidad de puntos de control en estas zonas, para garantizar la calidad del conjunto de datos en la Aero triangulación.

-El método de georreferenciación PPK se ve menos afectado por factores externos en la corrección precisa de las fotografías respecto al método RTK, garantizando calidad en la totalidad del producto, por lo cual es el método que se recomienda usar en este tipo de proyectos.

-Como lo evidencia el análisis de las precisiones relativas del método de georreferenciación PPK, es importante considerar planear la distribución de las bases de corrección PPK durante los vuelos, de tal manera que las fotografías en cualquier zona del proyecto estén en un rango de distancias optimo, en el cual las precisiones no presenten variaciones considerables al analizar la desviación estándar y media del conjunto de datos, que afectarían los cálculos de exactitud posicional en las zonas más distanciadas a estas bases PPK.

-Si bien es cierto que no es posible controlar o prevenir todos los aspectos que intervienen y pueden afectar la captura de información, concretamente la georreferenciación, si es posible reducir el impacto considerando aspectos fundamentales

como la topografía, cantidad y distribución de puntos de control y referencia, planificación de vuelos y métodos de captura, lo cual garantiza que aún con estas condiciones variables se cumplan con los estándares técnicos de calidad de estas especificaciones oficiales.

-De igual manera que en los métodos convencionales la fotogrametría con sistemas RPAS evidencian precisiones y exactitudes menores en el componente vertical, motivo por el cual y en dirección del avance tecnológico, se debe considerar el uso de sensores Lidar en este tipo de plataformas que permiten obtener datos de elevación más precisos y detallados, además de ser insumo para el procesamiento fotogramétrico y orto rectificación.

-Dado que el objetivo del cálculo de exactitud posicional es evaluar la calidad de la totalidad del producto, respecto a una fuente de datos diferente y de mayor precisión, no es conveniente considerar el cálculo usando puntos de control terrestre, que como se ve en el presente documento, genera un sesgo, debido a que son los mismo puntos que intervienen en el procesamiento fotogramétrico durante la etapa de aerotringulación, cuyo calculo no necesariamente describe el comportamiento o exactitud del conjunto de datos.

-Los valores de exactitud obtenidos de los métodos PPK y RTK si bien no dan conformidad a los establecido en los requerimientos técnicos, permiten inferir que el mejoramiento en aspectos de captura, como análisis de distancias a la base de corrección PPK y RTK, y de oficina como identificar y eliminar información atípica o con valores bajos de corrección diferencial podrían dar conformidad a los productos.

Bibliografia

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2015). *ASPRS Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. http://www.asprs.org/a/society/divisions/pad/Accuracy/Draft_ASPRS_Accuracy_Standards_for_Digital_Geospatial_Data_PE&RS.pdf

ANDRES FELIPE CASTRO TOVAR, & JEISON EDUARDO URREGO FUQUENE. (2018). *EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN GENERADA CON RPAS-(REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEM)*. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.

Arico Ortiz Sebastián Ricardo. (2021). *Evaluación de la exactitud posicional en ortofotos a escala 1:5.000 generadas con programas fotogramétricos mediante la utilización de drones*. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.

Ariza López, F. J., García-Balboa, J. L., Rodríguez-Avi, J., & Robledo Ceballos, J. (2019). *GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE DATOS ESPACIALES*.

Ariza López, F. Javier. (2002). *Calidad en la producción cartográfica*. Ra-ma.

Berné, J. L., Anquela, A. B., & Garrido, N. (2014). GNSS GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática. In *Duke Law Journal* (Vol. 1, Issue 1).

Carlos Enríquez Turiño. (2006). *Integración de SIG y GPS*.

Catherin Lizeth Castillo C, & Jessica Andrea Escobar R. (2017). *Actualización cartográfica del casco urbano de San Alfonso – Huila utilizando tecnología RPAS*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas .

Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial* (E. R. S.A., Ed.; Ediciones).

Fuentes González, J. A., Camargo Jaimes, M. Á., & Terrestres, E. en V. (2018). *EXACTITUD DE LA RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA USANDO VEHÍCULOS*. Universidad Pontificia Bolivariana.

ICONTEC. (2018). *NTC 6271_ Información Geográfica, Estudios Topográficos* (Issue 571, p. 65).

Resolucion 471 de 2020, 1 (2020).

JUAN SEBASTIAN ALVAREZ LOPEZ. (2021). *PLANEACIÓN TOPOGRÁFICA PARA RECTIFICACIÓN DE LINDEROS A TRAVÉS DE LEVANTAMIENTOS RTK, NTRIP Y VUELOS RPAS* . UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.

Konecny, G. (2014). *Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information ... - Gottfried Konecny - Google Libros* (2nd ed.). Taylor & Francis Group.

Koolhaas, M. (2003). Elementos del sistema de posicionamiento global (GPS). *Fagro.Edu.Uy*, *3*(2), 385–390.

María Alejandra Guzmán Tunaroza, & Paula María Rincón González. (2017). *Levantamiento con el Sistema de Aeronave Piloteada Remotamente (RPAS) del predio Aguas Claras en el Municipio Villavieja – HUILA*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Niño, E. (Universidad D. F. (n.d.). *Introducción . Modo navegación Método estático . Método stop and go . Método tiempo real*. 1–53.

ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL OACI. (2011). *Circular 328, Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)*.

Quiroga Velásquez, J. T., Macana Tuta, E., & Teledetección, M. en. (2019). *ANÁLISIS DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS GENERADOS CON IMÁGENES ADQUIRIDAS POR MEDIO DE PLATAFORMAS AÉREAS NO TRIPULADAS JOSÉ TARCICIO QUIROGA VELÁSQUEZ & EDERSON MACANA TUTA*. Universidad Católica de Manizales.

Quirós, Elia. (2014). Introduction to Photogrammetry and Cartography applied to Civil Engineering. In *Universidad de Extremadura, Cáceres, España.*

Sánchez Sobrino, J. A. (2001). Introducción a la Fotogrametría Digital. In *E. T. S. I. Caminos, Canales y Puertos.*

Santamaria Peña, J., & Sanz Méndez, T. (1998). *Fundamentos de fotogrametría*.