UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS

Proyecto para optar el título de TECNÓLOGO EN CARTOGRAFÍA

VARIACIÓN DE LOS VALORES DE EXACTITUD POSICIONAL EN EL PROCESAMIENTO DE UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO POR UN VANT.

Autores: Eduardo Da Silva Velazquez - Diamela Martínez Reggio

Tutor: Ing. Agrim. Hebenor Bermúdez

MONTEVIDEO

URUGUAY

2019

PÁGINA DE APROBACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA - FACULTAD DE CIENCIAS

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el proyecto de investigación:

TÍTULO: Variación de los valores de exactitud posicional en el procesamiento de un vuelo fotogramétrico realizado por un VANT.

AUTORES: Eduardo Da Silva Velazquez - Diamela Martínez Reggio

TUTOR: Ing. Agrim. Hebenor Bermúdez

CARRERA: Tecnólogo en Cartografía

PUNTAJE: .....

TRIBUNAL:

Profesor: .....(Nombre y Firma)

Profesor: .....(Nombre y Firma)

Profesor: .....(Nombre y Firma)

Profesor: .....(Nombre y Firma)

Fecha:

AGRADECIMIENTOS

Por este medio hacemos llegar el agradecimiento a la Facultad de Ingeniería y Facultad de Ciencias, a todos los profesores y compañeros de carrera que compartieron con nosotros las asignaturas a lo largo de la misma y ayudaron de esa manera en nuestra formación académica.

En especial a nuestro querido tutor el Ing. Hebenor Bermúdez por guiar, acompañar, colaborar y apoyarnos continuamente con paciencia y mucho compromiso en la creación y elaboración del proyecto.

Queremos agradecer también al Ing. Marcelo Torterola quien nos facilitó las imágenes y el procesamiento del vuelo y nos dedicó su tiempo en varias ocasiones.

A nuestra familia y amigos, por estar siempre apoyándonos en las diferentes etapas de este proceso universitario brindando comprensión y apoyo.

A todas las personas que colaboraron en el proceso y destacar nuestro equipo de proyecto, el cual tanto en el proyecto como a lo largo de la carrera nos ayudó a lograr un gran trabajo en equipo y una gran amistad.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION 5
   1.1. Relevancia de la investigacion 6
2. OBJETIVOS 7
   2.1. Objetivo general 7
   2.2. Objetivos específicos 7
3. MARCO TEORICO 8
4. METODOS DE CONTROL 16
5. ANTECEDENTES 19
6. AREA DE ESTUDIO 22
   6.1. Resultados proporcionados 24
7. METODOLOGIA 25
   7.1. Resumen 25
   7.2. Metodología del primer objetivo 25
   7.3. Procesamiento de 10 puntos de apoyo 29
   7.4. Procesamiento de 7 puntos de apoyo 30
   7.5. Procesamiento de 5 puntos de apoyo 31
   7.6. Metodología del segundo objetivo especifico 32
   7.7. Metodología del tercer objetivo especifico 36
8. ANALISIS Y RESULTADOS 38
   8.1. Objetivo uno 38
   8.2. Objetivo dos 38
   8.3. Objetivo tres 39
9. CONCLUSIONES 44
10. RECOMENDACIONES 44
11. BIBLIOGRAFIA 45
12. INDICE DE IMÁGENES 47
13. INDICE DE CUADROS 48
14. ANEXO 49

1. INTRODUCCION

Según información proporcionada por el instituto Uruguay XXI, entre enero 2017 y octubre 2018, se importaron 1060 dispositivos aéreos operados a distancia por un millón de dólares aproximadamente.

Actualmente según el Dr. José Palermo, abogado especializado en derecho aeronáutico y asesor en normas técnicas aeronáuticas de la Dirección Nacional de Aviación Civil e Infraestructura Aeronáutica (DINACIA), hay aproximadamente 40.000 drones en el Uruguay entre los que se utilizan con fines recreativos o comerciales y solo hay 80 empresas registradas.

Las actividades aéreas de carácter comercial o las que implican el uso de dispositivos de filmación, fotográfico u otro tipo de sensores se encuentran especialmente reguladas en nuestro país. Compete a la DINACIA garantizar los niveles adecuados de Seguridad Operacional en la República Oriental del Uruguay. Además El Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales de la Fuerza Aérea Uruguaya, según el decreto 369/91 tiene como misión dirigir, ejecutar, supervisar, desarrollar y coordinar todas las actividades vinculadas con la técnica y el uso de Sensores Remotos Aeroespaciales a fin de apoyar la misión de la Fuerza Aérea, así como brindar apoyo al desarrollo nacional mediante la realización de tareas de tele observación, teledetección, interpretación y análisis. (Resolución 369/91)

La Dinacia, estableció tres tipos de drones: menores (de hasta 25 kilos), medianos (de entre 25 y 260 kilos) y Mayores (de más de 260 kilos). (Resolución DINACIA N° 291/2014) Los dispositivos "menores" no requieren registro ni licencia, pero los medianos deberán inscribirse ante la Dirección de Seguridad Operacional y recibirán un número que los identifique que deberá ser visible en los laterales y en la superficie superior e inferior del dispositivo. Además, los "mayores" deberán tener licencia aeronáutica. En todos los casos se prohíbe (salvo autorización expresa de la Autoridad Aeronáutica) el transporte de pasajeros, las operaciones internacionales, el vuelo en áreas prohibidas o restringidas, el vuelo sobre áreas pobladas o sobre concentraciones de personas y el vuelo en zonas de tráfico de aeropuertos y aeródromos.

Los drones que sean utilizados para actividades remuneradas deberán contar con seguro de responsabilidad civil o seguro aeronáutico. Además quienes los operen, deberán contar conel Permiso de Operador de Dispositivo Aéreo Operado a Distancia.

Algunos de los beneficios que se obtienen utilizando un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para relevamientos topográficos son: reducción de horas de relevamiento en campo, alcance a zonas de difícil acceso, uso fácil e intuitivo, precisión en datos, buena calidad de imágenes, entre otros. (Drone Spain, 2018), (Drones Web, 2018), (ToDrone, 2016), (Area Dron, 2017).

La accesibilidad económica de los mismos junto a los beneficios anteriormente mencionados, hizo que el uso de éstos haya ido incrementándose a lo largo de los últimos años.

En este trabajo se evaluó la exactitud posicional de un vuelo fotogramétrico, en función de la cantidad de puntos de control, independientemente de la distribución de los mismos. Los resultados obtenidos nos mostraron que en todos los casos evaluados, el error posicional es inferior al mínimo aceptable según las normas sobre control de calidad de datos espaciales consideradas en este trabajo.

1.1. Relevancia de la investigación

Puesto que los datos son la base de todo el trabajo que realizamos en un SIG, su calidad es muy importante, para que éste tenga sentido y aporte resultados coherentes y útiles.

Los errores en los datos de partida afectan a los resultados que derivemos de ellos, por lo tanto es necesario que la información relevada esté dentro de un margen de exactitud, que nos brinde la seguridad de que los mismos son de calidad aceptable, conforme al uso de los datos previstos.

La mayoría de usuarios de SIG no tienen en cuenta, rigurosa y formalmente, la calidad de los datos a la hora de desarrollar su trabajo, quedando aún mucho por avanzar en este sentido.

Consideramos que el presente trabajo puede brindar una oportunidad de mejora del sistema productivo de la información geográfica, aportando a la determinación de la cantidad de puntos de apoyo necesarios para obtener resultados de exactitud posicional aceptables conforme a las normas internacionales vigentes.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar la variación de los valores de exactitud posicional en el procesamiento de un vuelo fotogramétrico realizado por un VANT a partir de variar la cantidad de puntos de apoyo.

2.2. Objetivos específicos

1. Evaluar la variación en los resultados del ajuste en el procesamiento de un vuelo fotogramétrico realizado con VANT variando la cantidad de puntos de apoyo utilizados.

2. Evaluar la variación en la exactitud posicional de un vuelo fotogramétrico realizado con VANT variando la cantidad de puntos de apoyo utilizados.

3. Estudiar la variación de los ajustes realizados por el software en los puntos de control, utilizando distintas muestras de puntos de apoyo.

3. MARCO TEORICO

Por definición, VANT es un vehículo aéreo no tripulado capaz de mantener un vuelo controlado y sostenido, propulsado por un motor de explosión o de reacción. Sus siglas en inglés UAV (Unmanned Aerial Vehicle), también los llamamos DRONES y actualmente existe una amplia variedad de tamaños, formas, y características. (PEREZ LOPEZ, Samanda, et al, 2015).

El uso de los drones no es nuevo, pues ya en 1917, hace casi un siglo, el controvertido ingeniero inglés Archibald Low (1888 - 1956) demostró ser capaz de controlar un pequeño y novedoso prototipo de biplano guiado por radio, cuando menos al punto de hacerlo emprender el vuelo. (Lopez Gimeno, 2015)

Los nombres que han ido recibiendo las aeronaves robóticas no tripuladas a lo largo de su existencia se representa gráficamente en la siguiente figura:

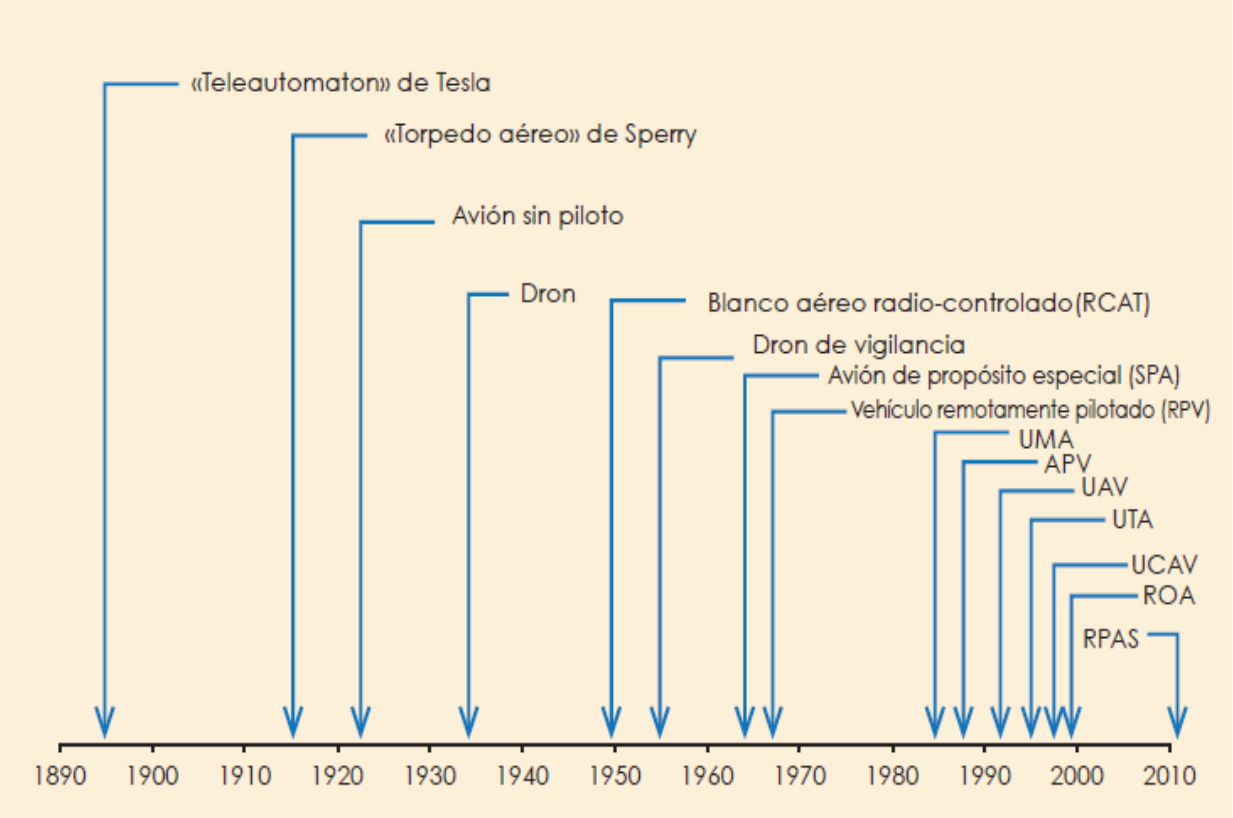


Figura 1 Cronología de los nombres aplicados a las aeronaves robóticas. (Cuerno, 2015)

Los acrónimos no definidos se corresponden con: UMA = Unmanned Aircraft; APV = Automatically Piloted Vehicle; UTA = Unmanned Tactical Aircraft; UCAV = Unmanned Combat Air Vehicle; ROA = Remotely Operated Aircraft; RPAS = Remotely-Piloted Aircraft System.

Los drones se pueden considerar como robots no antropomorfos con una inmensa autonomía de vuelo y una gran gama de posibilidades de aplicación (Cuerno,2015):

- ➢ Control de calidad del aire
- ➢ Cartográficas
- ➢ Prospección y explotación de recursos minerales
- ➢ Hidrológicas
- ➢ En agricultura

- Seguimiento fitosanitario de masas forestales
- Control de obras y evaluación de impactos
- Gestión del patrimonio y herencia cultural
- Seguridad y control de fronteras
- Mantenimiento de líneas eléctricas
- Periodismo
- Rescate
- Urbanísticas
- Fotogrametría (Representación de terrenos y medidas a partir de imágenes aéreas)

Figura 2 Usos en la agricultura.

Figura 3 Aplicación en prospección y explotación de recursos

Figura 4 Aplicación en seguridad.

Figura 5 Aplicación en cartografía, rescate y control de obras.

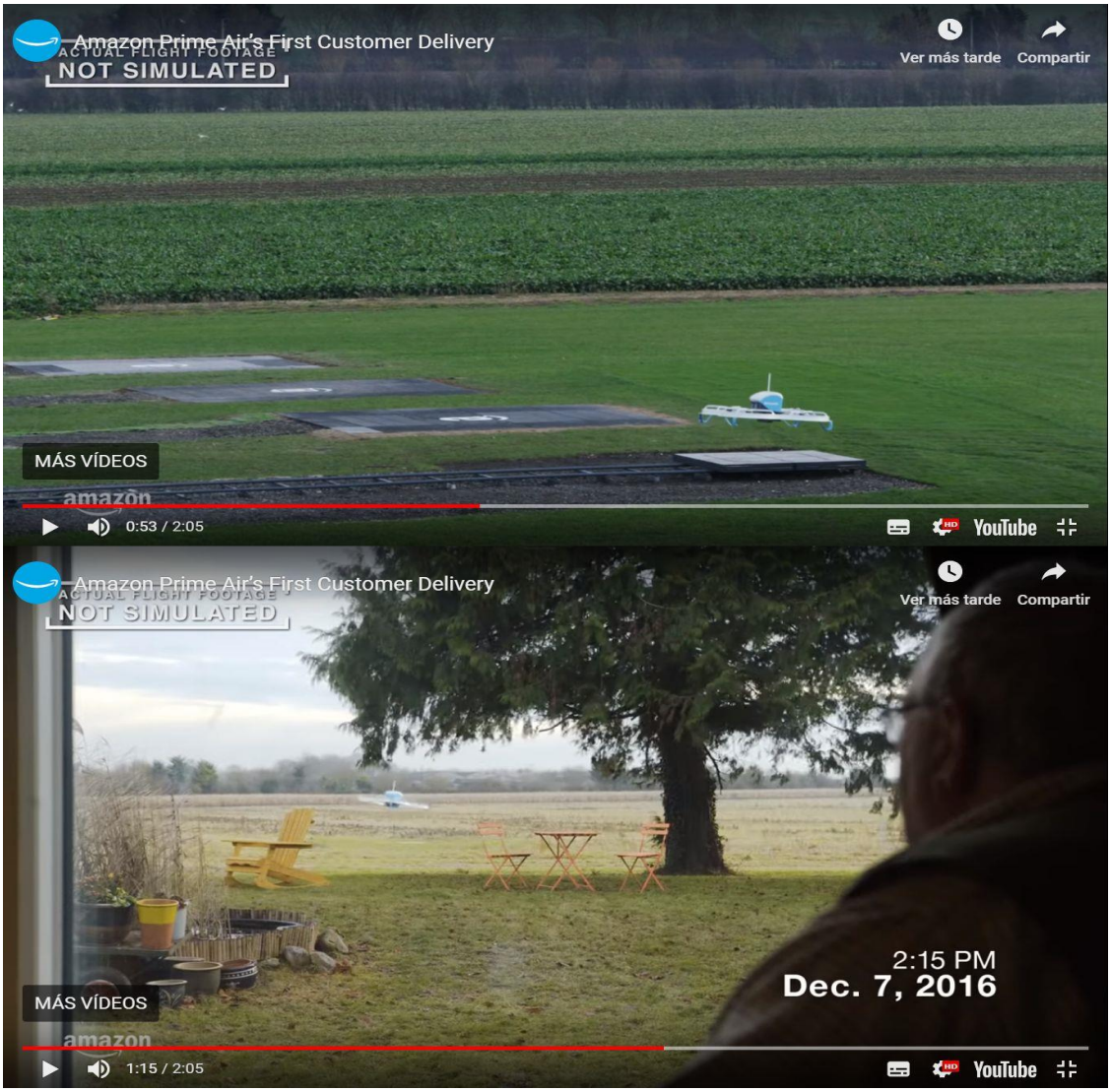


Figura 6 Aplicación en entregas de productos.

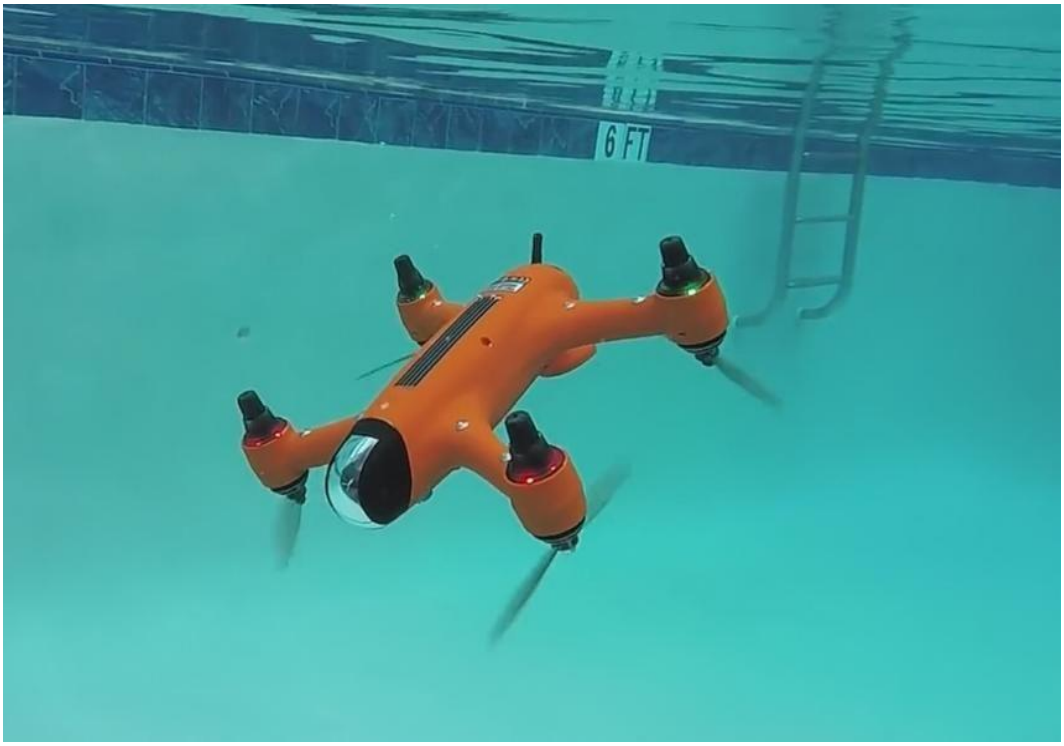


Figura 7 Aplicaciones submarinas

El uso extensivo de drones ha provocado una transformación en la topografía de precisión. La revolución continúa gracias a la creciente potencia de proceso de ordenadores, servidores y al desarrollo de herramientas con algoritmos específicos para fotogrametría.

Los retos a abordar en el futuro próximo vendrán de la mano de un adecuado desarrollo e implementación, como por ejemplo el transporte aéreo robótico de carga, y con el tiempo de pasajeros.

Algunas de las ventajas de utilizar los vehículos aéreos no tripulados son:

- Reducción general de precio en especial frente a alternativas piloteadas.
- Exploración de zonas de difícil acceso
- Mejora de las prestaciones (servicios, auxilio, asistencia) mayor estabilidad (mejores fotografías)
- Simplificación del proceso
- Automatización del proceso cuando es necesario fotografiar un área más grande
- Obtención de mapas 3D de un terreno
- Reducción del tiempo de trabajo
- Reducción del personal a afectar a la tarea
- Ofrece una representación gráfica del terreno en forma actualizada
- Es fácil de obtener
- Permite obtener información de zonas de difícil acceso
- Entrega un registro del cambio de la zona
- Tiene una infinidad de aplicaciones en los aspectos de evaluaciones de cambios temporales.

La aplicación con la que trabajaremos en este proyecto es la **fotogrametría** siendo su objetivo el conocimiento de las dimensiones y posición de objetos en el espacio, a través de las medidas realizadas en dos o más fotografías.

La palabra fotogrametría se deriva del vocablo "fotograma" (de "phos", "photós", luz, y "gramma", trazado, dibujo), como algo listo, disponible (una foto), y "metrón", medir. Por lo que resulta que el concepto de fotogrametría es: "medir sobre fotos". (Luis Jauregui)

Si trabajamos con una foto podemos obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si trabajamos con dos fotos, en la zona común a éstas (zona de solape), podremos tener visión estereoscópica (información tridimensional).

La fotogrametría con drones nos permite conocer las propiedades geométricas de una superficie a partir de la información obtenida a partir de las imágenes, para que un objeto pueda estar fielmente reconstruido, éste, debe de aparecer en un número suficiente de imágenes. Es esta información repetida, la que permite extraer su estructura a través del solapamiento entre imágenes consecutivas. Para ello se debe planificar el vuelo fotogramétrico de forma que cada imagen contenga elementos que también aparecen en la imagen anterior, posterior y las vecinas en los laterales. Las fotografías son tomadas por líneas de vuelo o fajas garantizando traslapes longitudinal y transversal para cubrir completamente, con modelos estereoscópicos un área determinada del territorio. (Aerial Insights, 2018)

El porcentaje de solape suele oscilar entre el 60 y el 90%, y habitualmente viene calculado por el software de planificación de vuelos. Estos programas se encargan de calcular secuencias de disparos a partir de la posición esperada del dron, su altura y el solape deseado.

Los elementos identificados (existentes o preseñalizados) que aparecen en las imágenes los llamamos **Punto de control / apoyo** Ground Control Point (GCP), es un sitio físico en tierra del cual se conoce su posición respecto a un sistema de coordenadas, y puede utilizarse como guía (Cruz, 2008). Tiene la finalidad de ofrecer información de gran utilidad en los procesos de georreferenciar objetos espaciales y/o fenómenos de interés de acuerdo a las necesidades o naturaleza específica de cada proyecto. Por cada punto de control es necesaria una referencia visual, éstas pueden ser tanto naturales como artificiales (un objeto, una marca de pintura en el suelo, una diana impresa, elementos impresos en lona o papel, conos de obra, esquinas, tapas de alcantarilla, bordillos) ya que debe ser claramente visible desde el aire y fotoidentificable. Sus coordenadas (horizontales y verticales) se obtienen por métodos geodésicos de alta precisión y están ligadas a un sistema de referencia.

En este trabajo llamaremos puntos de apoyo a los que se seleccionan para orientar las imágenes (aerotriangulación), mientras que los de control serán únicamente utilizados para verificar la misma, haciendo un control de error del modelo estereoscópico generado.

Las técnicas fundamentales en Geodesia espacial para trabajar con precisión centimétrica son: GNSS (Sistemas Satelitales de Navegación Global), SLR (Satellite Laser Ranging), VLBI (Very Long Baseline Radiopositioning), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)

Para tomar los puntos de apoyo/control y conocer las coordenadas geográficas exactas se suele utilizar un GPS RTK (Real time Kinematic GNSS) o PPK (Post-Processed Kinematic).

Los receptores GNSS son la interfaz de usuario a cualquier Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) y su objetivo es procesar las señales en el espacio (SIS) transmitidas por los satélites.

Actualmente la tendencia es trabajar con receptores multifrecuencia, que son capaces de procesar las señales procedentes del sistema GPS (origen militar, EE.UU) y además GLONASS (origen militar, Rusia); en ocasiones GALILEO (sistema independiente, Unión Europea), aunque este último no está todavía operativo.

Para una medición GNSS el instrumento debe estar en capacidad de recibir información adicional a la transmitida por los satélites GNSS, es decir comunicarse (uni o bidireccionalmente) con otra estación, red o satélite para recibir correcciones adicionales a las mediciones que realiza (posición, velocidad y tiempo). De acuerdo a lo anterior, existen muchas opciones para efectuar mediciones GNSS en Tiempo Real, las más importantes son: sistemas de radio, internet y telefonía celular, redes activas.

Las características principales de los receptores GNSS son: tipo y constelación que se recibe, precisión de medida (Estático, Cinemático, RTK, Diferencial o SBAS), comunicación de entrada y salida, disponibilidad o no de telefonía integrada, disponibilidad o no de radio.

Una vez obtenidas las imágenes es necesario utilizar un software de fotogrametría que las procese y que sea capaz de “inferir” la posición XYZ de millones de puntos. Estos puntos servirán para generar las reconstrucciones 3D en forma de polígonos, nubes de puntos, o bien, ortofotos.

Nube de puntos es un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional (x,y,z) y son representaciones de la superficie externa de un objeto. La calidad del levantamiento y el modelo a construir depende de la elección adecuada de los puntos. Para la densificación, los softwares ofrecen diferentes niveles de calidad, con mayor calidad se pueden obtener productos con más precisión y detalle en la geometría. Las nubes de puntos tienen múltiples aplicaciones, entre las que se incluyen la elaboración de modelos tridimensionales.
El conjunto de posiciones de las cámaras junto con las propias fotografías, son utilizadas por los software para la siguiente fase que es la construcción de la geometría del modelo, es decir, la construcción de la **malla de polígonos** en 3D que definen la superficie del modelo.

Si se une dos o más ortofotos (representación fotográfica del terreno en proyección ortogonal) formando una representación continua de un área del terreno, se genera lo que llamamos **Ortofotomosaico**. Su elaboración utiliza técnicas donde múltiples imágenes aerofotográficas son digitalmente unidas, mientras se corrigen errores sistemáticos en radiometría y geometría.

Otro de los productos que podemos obtener es un **modelo digital de terreno (MDT),** que se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. (Felicísimo, 1994). Los MDT están codificados en cifras, por lo tanto, son modelos simbólicos porque representan la realidad mediante la identificación y codificación en una estructura geométrica de sus elementos básicos. Llegan a un nivel superior de abstracción, ya que el objeto real queda representado mediante una simbolización matemática. Debido a su naturaleza numérica los MDT presentan algunas ventajas respecto a los otros modelos:

No existe ambigüedad, cada elemento del modelo tiene propiedades y valores específicos y explícitos.

Verificabilidad, los resultados se construyen mediante pasos explícitos y concretos que pueden ser analizados uno a uno y comprobados en toda fase del proceso.

Repetibilidad, los resultados no están sometidos, a menos que se diseñe expresamente, a factores aleatorios o incontrolados y pueden ser comprobados las veces que se desee.

Según el diccionario de la Real Academia Española (RAE), la **calidad** es la “Propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que las restantes de su especie”. Mientras que la definición contenida en la norma ISO 9000:2005: expresa que es el “Grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos”, definiendo requisito como “necesidad o expectativa establecida, generalmente implícita u obligatoria”

Otros autores consideran la calidad como el conjunto de propiedades y de características de un producto o servicio que le confieren su aptitud para satisfacer

unas necesidades explícitas e implícitas, desde el punto de vista del SIG, unos datos espaciales de calidad serán aquellos que puedan servir para alcanzar los objetivos de un proyecto concreto, dando sentido a este. (Olaya, 2016)

Dos términos importantes en el estudio de la calidad son la precisión y exactitud. La precisión indica el nivel de detalle con el que se recoge la información. Por su parte, la exactitud nos indica el grado en que los valores estimados se asemejan al valor real. La Norma ISO 3534-1 define la **exactitud** como el grado de acuerdo entre el resultado de una prueba y el valor de referencia aceptado. Podríamos decir que la exactitud = veracidad + precisión**,** considerando **veracidad** como la proximidad entre la media de un número finito de valores medidos repetidos y un valor de referencia, mientras que la **precisión** es la proximidad entre los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto o de objetos similares bajo condiciones específicas. La veracidad se puede mejorar, en tanto que la precisión no(sólo se puede evitar su incremento).

La Norma ISO 19157:2013 la describe la **exactitud posicional** como la exactitud o cercanía en posición de los objetos en el conjunto de datos, en un determinado sistema de referencia, con respecto a su posición verdadera (o a la asumida como verdadera).

La exactitud posicional puede ser absoluta (proximidad de los valores de las coordenadas reportados respecto a los valores verdaderos o asumidos como tales), o relativa (proximidad de las posiciones relativas de los objetos geográficos de un conjunto de datos respecto a sus posiciones relativas verdaderas o aceptadas como tales).

Una de las opciones para la estimación del nivel de incertidumbre es la utilización del error medio cuadrático, la forma más habitual de medir los errores posicionales, que es una variable de tipo cuantitativo. El error medio cuadrático (RMSE, sigla en Inglés) es la raíz cuadrada del promedio del conjunto de diferencias cuadradas entre los valores de coordenadas del conjunto de datos y los valores de coordenadas de una fuente independiente de mayor precisión para puntos idénticos. Su expresión es:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(P_i - O_i \right)^2}{n}}$$

Siendo N el número de observaciones, Pi el valor predicho y Oi el valor observado.

El **nivel de confianza**, es el grado de certeza (o probabilidad), expresado en porcentaje con el que queremos realizar la estimación de un parámetro a través de un estadístico muestral.

4. METODOS DE CONTROL

Algunos de los métodos de control posicional más utilizados son, NSSDA, ASPRS, y la norma publicada recientemente por el INCRA (Brasil) para la georeferenciación de inmuebles rurales.

El **NSSDA** (*National Standard for Spatial Data Accuracy*), es un estándar propuesto por el Federal Geographic Data Committee (FGDC, 1998) y puede emplearse para datos cartográficos analógicos y/o digitales (Minnesota Planning, 1999), este estándar viene a sustituir al NMAS y al EMAS (que estaban concebidos para su aplicación sobre cartografía en papel, no sobre información digital). Esta norma es de obligado cumplimiento para las agencias federales de los Estados Unidos que realicen labores de producción cartográfica. El método permite obtener un índice de calidad posicional en unidades reales sobre el terreno, pero no dice si el mapa es aceptado o rechazado, tal y como hacían los test anteriores. El resultado determinado con el NSSDA deberá aparecer como metadato (conjunto de datos que describe el contenido informativo de un recurso) en el producto. En este caso, le corresponde al usuario de la cartografía, o agencia que solicita la cartografía, el establecer los límites de aceptación en función de sus necesidades, lo cual constituye su mayor ventaja.

El procedimiento que se aplica es el siguiente:

1. Seleccionar una muestra de, al menos, 20 puntos perfectamente definidos sobre la cartografía y sobre la fuente de mayor exactitud. A la hora de realizar su elección, los puntos no deberán entrañar ninguna posible confusión en cuanto a su localización tanto sobre el mapa como sobre la fuente de mayor exactitud. Así mismo, deberán estar homogéneamente distribuidos. Siguiendo las recomendaciones del FGDC (*Geospatial Positioning Accuracy Standards*), los puntos se deberán distribuir de forma que en cada uno de los cuadrantes del mapa se sitúen al menos un 20 % de los mismos. Así mismo, la separación entre los puntos no será inferior a una décima parte de la diagonal del mapa a controlar.
2. Detectar los errores previos de inconsistencia.
3. Calcular el RMSE para la componente posicional (*XY*).
4. Calcular el coeficiente de exactitud posicional a un 95 % de confianza.

La **ASPRS** (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), desarrolló en 1990 un estándar para medir la exactitud en mapas a escala 1:20.000 y mayores, obtenidos mediante procedimientos fotogramétricos. Utiliza como medida estadística el error medio cuadrático (EMC) y establece tres tipos de mapas. En planimetría se evalúan por separado la exactitud en X y la exactitud en Y.

La ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data REVISION 7, VERSION 1, Nov. 14, 2014, reemplaza la ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps (1990) y la ASPRS Guidelines, Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data (2004).

La exactitud de ortoimágenes digitales o de los datos planimétricos se basarán en no menos de 20 puntos de control.Este estándar define clases de precisión basadas en umbrales RMSE para ortoimágenes digitales, datos planimétricos digitales y datos digitales de elevación. Estas clases de precisión se han revisado y actualizado en esta edición. La precisión horizontal debe evaluarse utilizando la raíz cuadrada media del error (RMSE) en el plano horizontal, es decir, RMSEx, RMSEy. La precisión vertical se debe evaluar solo en la dimensión z. Cuando los errores no pueden ser representados

por una distribución normal, el valor del percentil 95 es más justo, estima la precisión a un nivel de confianza del 95%.

El **INCRA** (Instituto Nacional de Colonización y Reforma Agraria, autoridad federal) tiene como misión prioritaria ejecutar la reforma agraria y realizar el ordenamiento de la tierra.

La Norma Técnica para Georreferenciación de Inmuebles Rurales 3ª Edición (2013) y sus manuales, trata de las condiciones exigibles para la ejecución de los servicios de georreferenciación de inmuebles rurales. Los límites se describen por segmentos de recta interconectados por vértices con sus respectivos códigos y valores de coordenadas. Los tipos de vértices según su forma de posicionamiento, se clasifican en: directo (marco o punto) o indirecto (virtual, situado en lugares inaccesibles). La norma de ejecución de INCRA del 19/02/18, establece los criterios de aplicación y evaluación de productos generados a partir de aerofotogrametría. La precisión exigida en la Norma Técnica del INCRA de georreferenciación y certificación de inmuebles rurales, es de 50 centímetros y el patrón más restrictivo de exactitud cartográfica de productos digitales en Brasil, es de 28 centímetros. La evaluación de la exactitud posicional absoluta, será de acuerdo a los siguientes criterios:

1. Utilización de un mínimo de 20 puntos de chequeo/verificación, los cuales deberán ser debidamente señalizados/identificados en el campo.
2. Prueba estadística que comprueba la normalidad de las discrepancias posicionales planimétricas al nivel de confianza del 95%, usando el método de Shapiro-Wilk.
3. Prueba de tendencia al nivel del 90%, usando la prueba t-student, que comprueba la no tendenciosidad.
4. 100% de las discrepancias posicionales son menores o igual a la precisión posicional correspondiente a cada tipo de límite.
5. Para los vértices cuyas coordenadas fueron determinadas por aerofotogrametría, los valores de precisión posicional deben ser completados con los valores de Root Mean Square (RMS) obtenidos del proceso de evaluación de la exactitud posicional.
6. Se mantiene la restricción de aplicación de aerofotogrametría para la determinación de vértices del tipo M (El tipo M es el vértice cuyo posicionamiento se realiza de forma directa y se caracteriza (materializado) en campo por un marco de concreto, roca, metal o material sintético)

Todos los estándares analizados se basan en entidades puntuales. Es sobre este tipo de elementos sobre el que se realizan diferentes pruebas estadísticas en sus componentes tanto horizontal (X e Y) cómo vertical (Z). En todo momento se emplea una fuente de mayor exactitud con la que realizar la comparación de las coordenadas de los puntos que forman la muestra. Según indican, esta muestra ha de estar formada en todos los casos por “al menos 20 puntos perfectamente definidos”. A la hora de realizar su elección, los puntos no deberán inducir a ninguna posible confusión en cuanto a su localización, tanto sobre el mapa como sobre la fuente de mayor exactitud. Deben estar homogéneamente distribuidos, siguiendo las recomendaciones del FGDC ("Geospatial Positioning Accuracy Standards". Virginia (U.S.): Ninnesota Planning, 1999. FGCD-STD-007-1998.), que establece que los puntos se deberán distribuir de forma que en cada uno de los cuadrantes del mapa se sitúen al menos un 20 % de los

mismos. Así mismo, la separación entre los puntos no será inferior a una décima parte de la diagonal del mapa a controlar (imagen).

La homogeneidad de la muestra no solamente se refiere a su localización espacial sobre el mapa. Deberemos también tener en cuenta el aspecto temático: si el 90 % de los elementos representados son caminos carreteros, la muestra seleccionada para realizar el control de calidad deberá estar acorde con esta proporción. De igual forma, en aquellas zonas donde exista una mayor densidad de elementos cartografiados, deberemos tomar más puntos de control.

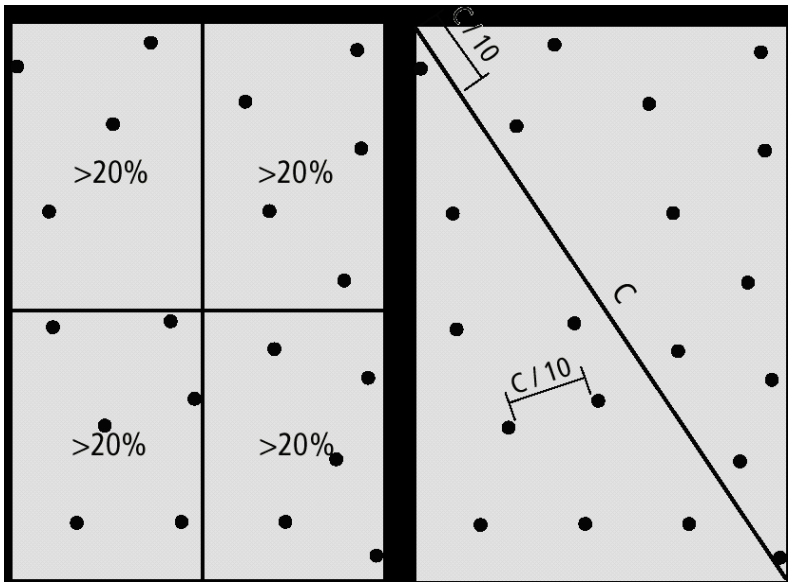


Figura 8 Distribución de puntos de control.

5. ANTECEDENTES

Se realizó una búsqueda de antecedentes del conocimiento sobre el tema, para lo cual fue fundamental una investigación de publicaciones, destacándose las siguientes:

7.1 Exactitud de trabajos fotogramétricos realizados con equipos UAV, casos de estudio, 1 Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, San Salvador, El Salvador, 2014 Ing Jorge Urrutia Ing Yuri Rogriguez

"Expone la metodología de trabajo desarrollada para proyectos de fotogrametría con equipos UAV y presenta el análisis obtenido al realizar una comparación entre método convencional (estación total) y este método aplicando uno de los test de calidad ampliamente utilizado como es el test NSSDA"

El software de procesamiento de imágenes utilizado fue el PhotomodelerScanner 2013, el cual permite procesar de forma automática utilizando técnicas de modelación 3D.

Se determinó la exactitud posicional, aplicando el test de la NSSDA con un nivel de confianza del 95%.

Para la realización de los trabajos se utilizaron dos equipos UAV marca DJI Phantom I, (camara Go Pro 7 megapíxeles, altura de vuelo 20m) y Phantom II (cámara propia del UAV, 14 megapixeles, altura de vuelo 40m).

A continuación tabla de valores de exactitud posicional basados en las expresiones del test NSSDA

SITIO	Exactitud X	Exactitud Y	Exactitud Z	Cantidad de puntos	Cantidad de fotos
Deslizamiento km 18.5	0,1306	0,1306	0,086	14	105
Borda Rio Jiroba	0,1397	0,1397	0,118	16	121
Puente El Jute	0,0575	0,0575	0,101	26	194

Cuadro 1 Tabla de resultados de exactitud. Elaboración Propia.

Concluyen que al comparar los resultados de un levantamiento tradicional con el levantamiento realizado con el equipo UAV, aplicando el test de calidad NSSDA, las discrepancias presentadas se encuentran en un rango aceptable de variación.

Punto de control	Dx Este	Dy Norte	Dz Elevación
p09	0.010	0.006	-0.057
p10	0.005	0.031	0.044
p13	0.020	0.041	0.025
p14	0.015	-0.049	-0.026
p15	0.023	-0.030	0.064
p18	-0.073	-0.020	-0.029
p19	0.013	-0.159	-0.054
p22	-0.025	-0.028	0.025
p23	0.002	-0.176	-0.003
p24	-0.004	-0.008	-0.021
p27	-0.058	0.022	-0.094
p29	0.020	0.080	-0.005
p30	0.011	0.036	-0.004
p09	0.028	0.064	0.035

Cuadro 2 Discrepancias en deslizamiento km 18,5.

Punto de control	Dx Este	Dy Norte	Dz Elevación
DIANA 01	0.017	0.085	-0.224
DIANA 02	0.081	-0.024	-0.003
DIANA 03	0.000	0.020	-0.015
DIANA 04	0.029	-0.028	0.002
DIANA 05	-0.043	0.026	0.021
DIANA 06	-0.057	-0.085	0.030
DIANA 07	-0.039	-0.002	-0.001
DIANA 08	-0.006	0.014	0.016
DIANA 09	-0.004	0.005	0.013
DIANA 10	-0.034	0.213	-0.068
DIANA 11	0.027	0.001	0.022
DIANA 12	-0.075	-0.027	-0.013
DIANA 13	0.039	0.094	0.015
DIANA 14	-0.082	-0.007	0.019
DIANA 15	0.067	-0.012	-0.004
DIANA 16	-0.005	0.035	-0.006

Cuadro 3 Discrepancias en borda de río Jiboa

Punto de control	Dx Este	Dy Norte	Dz Elevación
P02	-0.030	-0.030	-0.151
P03	0.009	-0.005	-0.009
P04	0.002	-0.005	-0.002
P05	0.000	0.002	0.009
P06	-0.084	0.002	-0.145
P07	-0.024	0.013	-0.023
P08	0.003	-0.001	-0.001
P09	-0.088	-0.025	-0.084
P10	-0.007	-0.004	0.013
P11	0.002	-0.009	-0.004
P12	0.009	-0.003	-0.008
P13	-0.001	-0.011	0.008
P14	-0.001	0.000	-0.043
P15	0.005	0.036	0.078
P16	0.004	0.009	-0.002
P17	-0.019	-0.006	-0.011
P18	0.023	-0.006	0.008
P19	-0.026	-0.001	0.006
P20	-0.024	0.064	0.080
P21	0.010	0.011	-0.023
P22	-0.031	0.029	0.046
P23	-0.007	0.002	0.013
P24	-0.016	0.004	-0.015
P25	0.001	0.017	0.004
P26	-0.001	-0.019	-0.007
P27	-0.007	0.021	0.015

Cuadro 4 Discrepancias en puente El Jute

7.2 Levantamento de límites de imóvel rural a partir de fotografias obtidas por VANT apoiadas por pontos GNSS, 2 Revista cartográfica Número 91, págs 35 a 58, Departamento de Geodesia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil, 2015 Gilda Maria Dias, Geanine Cassini Peter, Marcelo Pereira, Ronaldo do Santos da Rocha, Mario Reiss.

“Esta propuesta de levantamiento indirecto de divisas naturales en regiones de difícil acceso, es presentada como alternativa al levantamiento geodésico con receptores GNSS, y así atender los requisitos de precisión posicional establecidos en el manual técnico de posicionamiento del INCRA”

El software utilizado para la construcción de ortofotos y modelo digital de elevación de alta resolución fue el PhotoScan.

En el área de estudio de 87 hás, se utilizaron 22 puntos de apoyo, de los cuales no todos fueron posibles testearlos, por lo que se tomaron 12 puntos de control de facil localizacion en el terreno y distribuidos de forma homogénea en cuadrantes.

Para la realización del trabajo se utilizó equipo marca Sensefly Swinglet CAM, cámara de 12 megapixeles.

La calidad de los puntos de apoyo aerofotogramétricos presentó resultados mejores que la tolerancia establecida, que es de 0,3 m para los levantamientos por GNSS.

A través del control de calidad geométrica, se observó una de exactitud de 0,279 m para el 90% de las coordenadas extraídas de la ortofoto y de 0,282 m para las coordenadas resultantes de la carta planimétrica.

A partir de los objetivos propuestos y los resultados obtenidos se concluye que la técnica usada es compatible con los requisitos y precisiones exigidos por las normativas vigentes. La técnica se muestra como una alternativa viable para el levantamiento en límites naturales y/o regiones inaccesibles, ya que el manual técnico vigente a la fecha de la publicación, no permite el uso de este método en vértice de límites secos.

7.3 Evaluación de calidad posicional de un producto UAV, Aplicación de ASPRS Accuracy Standards for Digital Geospatial Data version 1, 2014, Asociación de Agrimensores del Uruguay, Biblioteca, Montevideo Uruguay, 2016, Ing Agustín Pintos, Tec Carlos Colombana, Sr Carlos Garcia

“Aplicación de ASPRS a un relevamiento fotogramétrico realizado con UAV, a efectos de evaluar su calidad posicional, con la finalidad de estudiar su aptitud en relación a las precisiones requeridas en un proyecto de obra civil”

Se implantaron 45 marcas artificiales en el terreno, registrándose simultáneamente sus coordenadas, con un GPS doble frecuencia Leica 900. Se procesaron los fotogramas obtenidos (106 imágenes) utilizando 10 puntos de apoyo y los restantes 35 como puntos de control. Se eliminaron 12 de los 35 puntos de control, debido a la presencia de errores sistemáticos.

El valor de RMSEx = 3 cm, el valor de RMSEy = 2 cm, y equivalen a un valor de exactitud posicional planimétrica de 6 cm con un nivel de confianza del 95 %.

El valor de RMSEz = 5 cm, que equivale a un valor de exactitud posicional altimétrica de 9 cm con un nivel de confianza del 95 %.

6. AREA DE ESTUDIO

Se trabaja con información proporcionada por el Ingeniero Agrimensor Marcelo Torterola de un vuelo realizado el 4 de Enero de 2018, en la República Oriental del Uruguay, Departamento de Artigas, próximo a la localidad de Rincón de Pacheco, con coordenadas 30°44'04.8"S y 56°10'44.0"W en el centro de la zona, como se puede apreciar en la última de las siguientes imágenes.

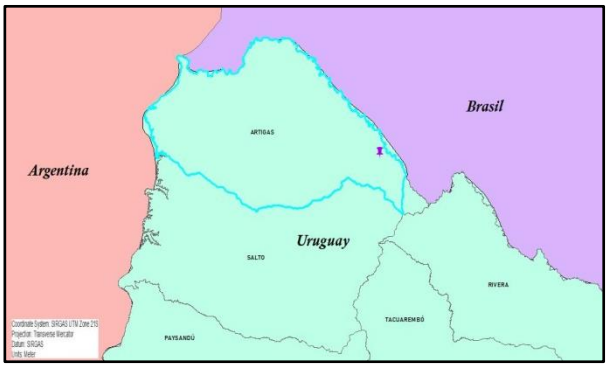


Figura 9 Ubicación en Territorio Nacional

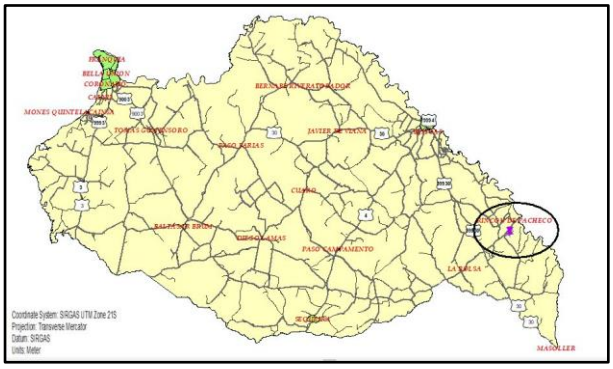


Figura 10 Ubicación en el Departamento

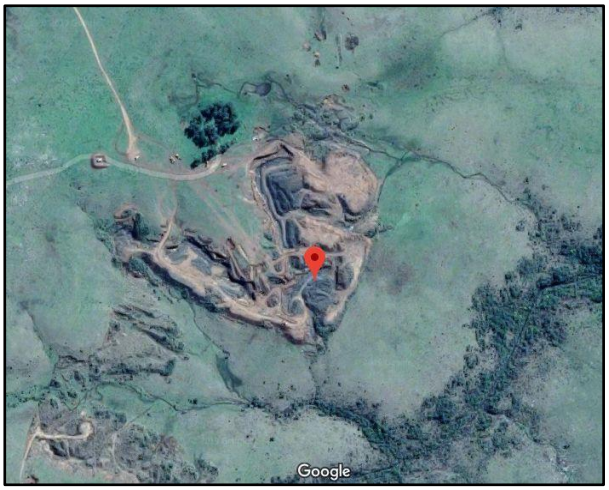


Figura 11 Ubicación del Padrón

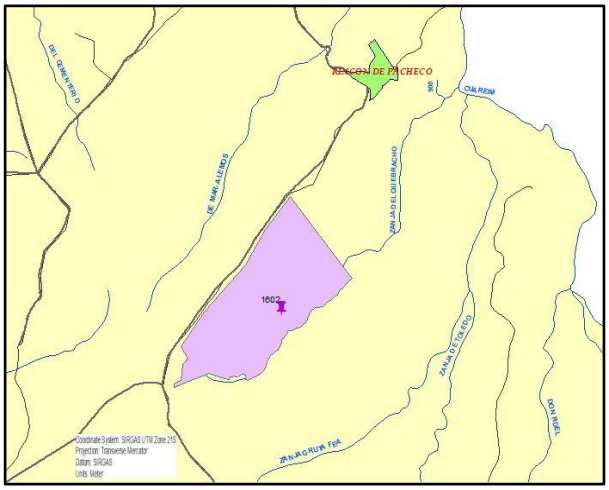


Figura 12 Ubicación en Google Earth

El objetivo del vuelo son controles de avances de frente de mina, con la finalidad de determinar volúmenes desmontados (allanar un terreno rebajando las partes más altas) en colada (fenómeno geológico producto de la erosión y del depósito de minerales) portadora del mineral de interés (amatistas).

El Ing. Torterola utilizó 22 puntos pre señalizados antes del vuelo, los cuales fueron ubicados e identificados siguiendo el procedimiento detallado a continuación.

Contando con un punto con mojón de referencia planialtimétrica, con coordenadas conocidas, se estaciono la base del gps, luego se colocaron marcas de cal en forma de cruz, en el suelo, en diferentes lugares de la zona a relevar. Posteriormente se midieron éstos con GPS RTK topográfico (precisión del orden del cm). Estos puntos son los que luego usó en su totalidad como puntos de apoyo para hacer el procesado fotogramétrico.

Punto	X	Y	Z
402	578376,944	6599609,688	194,614
403	578348,268	6599580,836	191,525
404	578383,790	6599589,442	186,823
405	578404,609	6599555,966	189,964
406	578508,182	6599549,988	199,142
407	578581,868	6599487,208	188,427
408	578604,796	6599515,503	189,729
409	578652,095	6599495,888	190,832
410	578613,248	6599507,526	185,922
411	578595,715	6599475,790	184,659
412	578661,533	6599609,996	185,591
413	578630,425	6599629,052	185,413
414	578605,376	6599620,032	185,208
415	578594,929	6599629,453	188,289
416	578616,066	6599636,438	188,207
417	578643,853	6599635,346	188,881
418	578583,304	6599710,197	186,987
419	578559,322	6599720,986	185,615
420	578544,096	6599690,428	185,670
421	578538,074	6599684,167	190,595
422	578542,828	6599714,049	188,430
423	578543,929	6599640,410	193,615

Cuadro 5 Puntos relevados por el Ing. Torterola. Elaboración propia.

Para realizar el vuelo, utilizó un Dron Phantom 3 pro, con las siguientes especificaciones:

Modelo de Cámara: FC300X (3.61 mm)
Resolución de la Cámara: 12 Megapixeles
Tamaño de la imagen: 4000 x 3000 pixeles
Dist. Focal: 3.61 mm
Cantidad de imágenes: 178
Altitud media de vuelo:77.1 m.
Distancia de muestreo en tierra (GSD): 2.89 cm/pix
Puntos de enlace establecidos por software Agisoft PhotoScan: más de 100 mil.
Superficie cubierta: 0.152 km² ≅ 15 Hás.

El programa con el que realizó el tratamiento de las imágenes obtenidas fue Agisoft PhotoScan. Las características del mismo se encuentran en http://www.agisoft.com/ y en el manual del usuario (Agisoft, 2014).

6.1. Resultados proporcionados

Los resultados que obtuvo fueron:

Cuadro 6 Resultados obtenidos del software con el procesamiento original del Ing. Torterola.

Número	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Total (cm)
22	1.07188	1.53845	1.88808	1.87503	2.66094

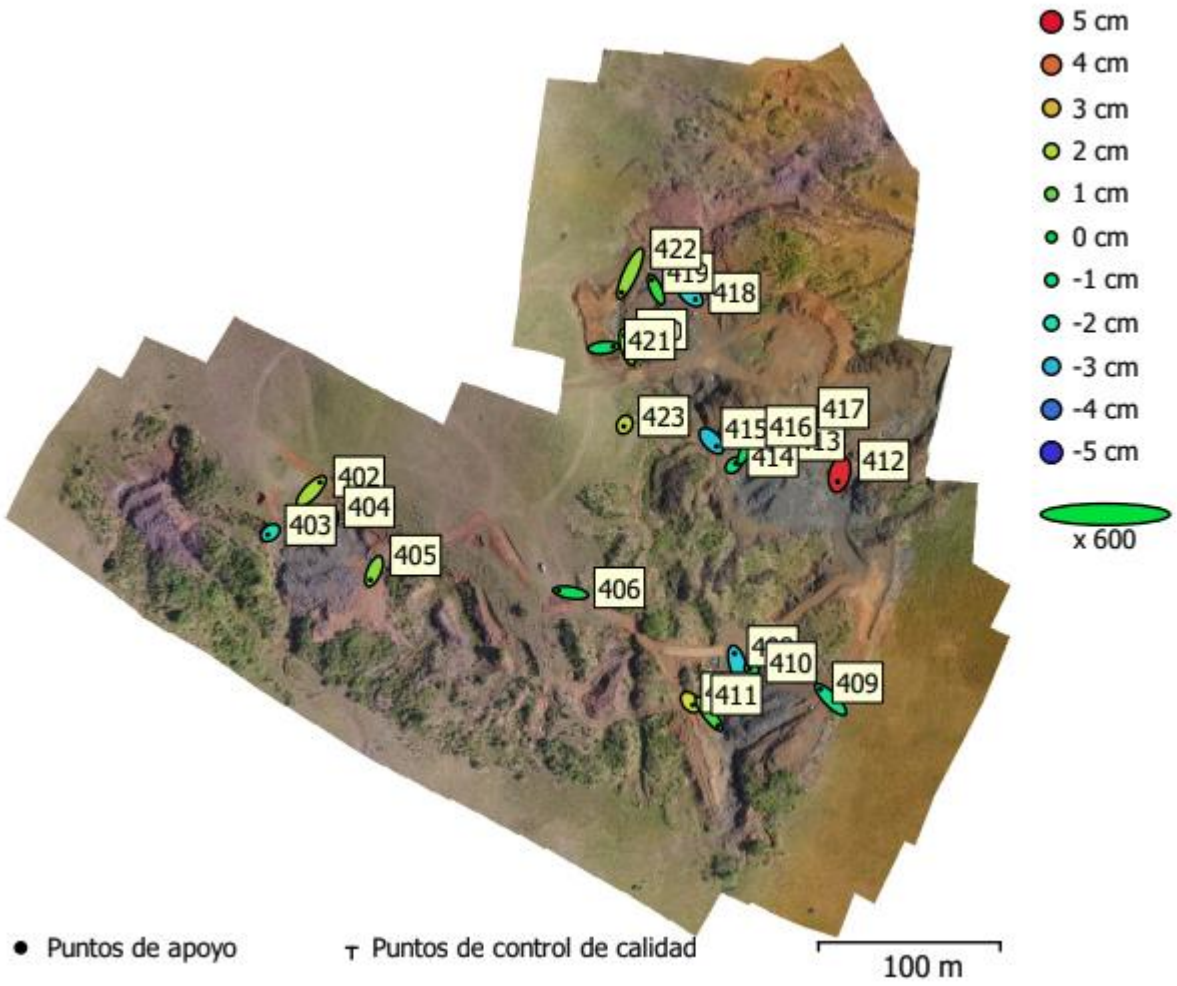


Figura 13 Distribución de los 22 puntos utilizados

7. METODOLOGIA

7.1. Resumen

Para el cumplimiento de nuestros objetivos, comenzamos tomando los 22 puntos relevados por el Ingeniero Marcelo Torterola, de los cuales, utilizando alguna herramienta de selección aleatoria, seleccionamos 10 puntos que serán considerados como puntos de control en el objetivo 2. A los 12 puntos restantes, le realizamos selecciones aleatorias de 5, 7 y 10 puntos los que se utilizarán como puntos de apoyo para los escenarios propuestos en el cálculo de la aerotriangulación, utilizando el software Agisoft PhotoScan.

La determinación de la cantidad de puntos de apoyo para cada escenario se estableció de forma arbitraria y sin tener en cuenta la distribución de los mismos en la zona de estudio. Luego se procedió a comparar las coordenadas X,Y,Z de los puntos de control relevados en campo por el Ingeniero, con las coordenadas obtenidas del ortomosaico para cada uno de los escenarios. Finalmente, a efectos de analizar la variación de los resultados en el ajuste de la aerotriangulación, se generaron, del conjunto de puntos proporcionados, 30 muestreos aleatorios de 10 puntos de apoyo cada uno, quedando el remanente de 12 puntos en cada caso, como puntos de control. Se calculó el error medio cuadrático para cada uno de los casos.

7.2. Metodología del primer objetivo

En el marco del primer objetivo específico, se tomó como insumo el vuelo proporcionado y se volvió a procesar, considerando la selección aleatoria realizada de 5, 7 y 10 puntos de apoyo.

Los 10 puntos de control se seleccionaron aleatoriamente de los 12 puntos restantes del relevamiento, éstos serán utilizados en el objetivo 2. En el cuadro 7 se detallan las selecciones realizadas.

Selección aleatoria			
Ptos de control	Puntos de apoyo		
	10	7	5
402	403	403	407
406	404	404	409
408	405	405	416
410	407	411	421
414	409	412	423
415	411	413	
418	412	421	
419	417		
420	421		
422	423		

Cuadro 7 Selección aleatoria de puntos

El reprocesamiento se realizó utilizando el software anteriormente mencionado. Se mantuvieron todas las imágenes previamente cargadas y alineadas por el Ingeniero,

con su sistema de referencia (WGS 84 / UTM zone 21S, EPSG::32721). Luego se cargaron solo los puntos de apoyo seleccionados.
Sobre las posiciones estimadas de la cámara el programa calcula la información de profundidad para cada cámara que se combina en una sola nube de puntos densa, para ello se selecciona en el menú de la barra de tareas “Flujo de Trabajo”--> “Crear nube de puntos densa...” , así se abre una cuadro de diálogo donde se seleccionan los parámetros como se muestra a continuación en la figura 15 junto con la nube densa creada.

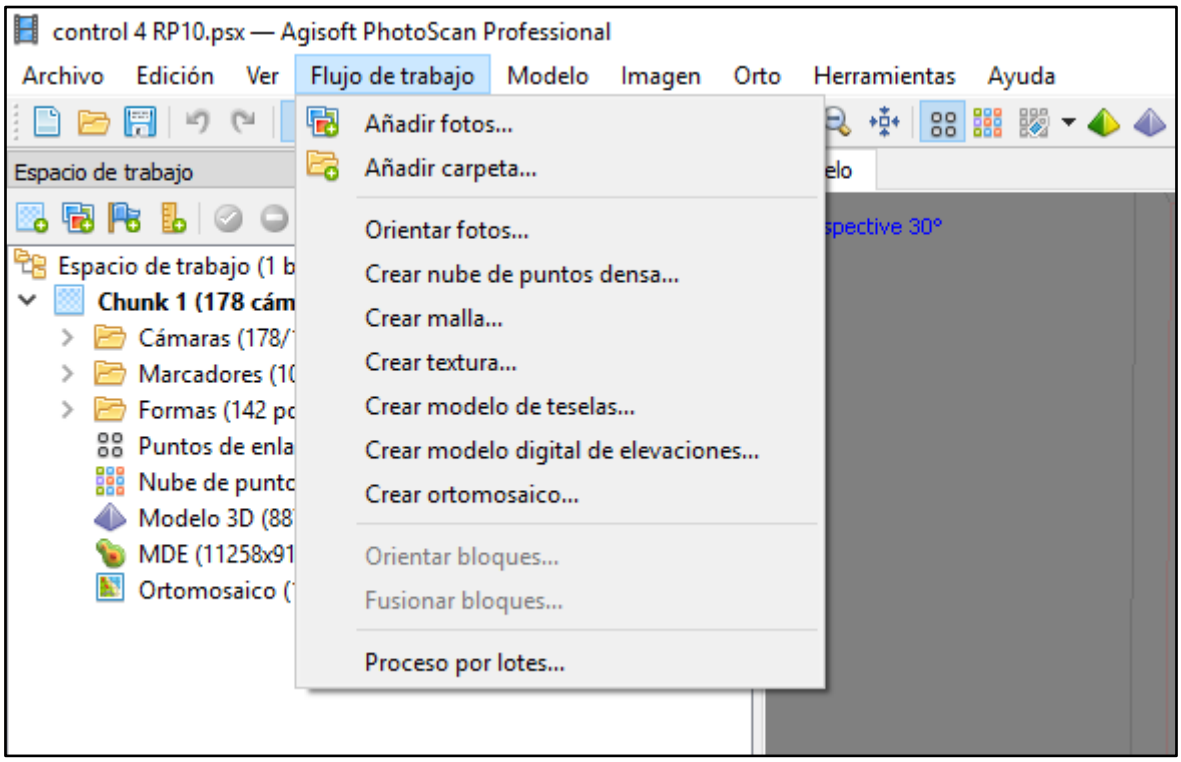


Figura 14 Barra de tareas Agisoft PhotoScan.

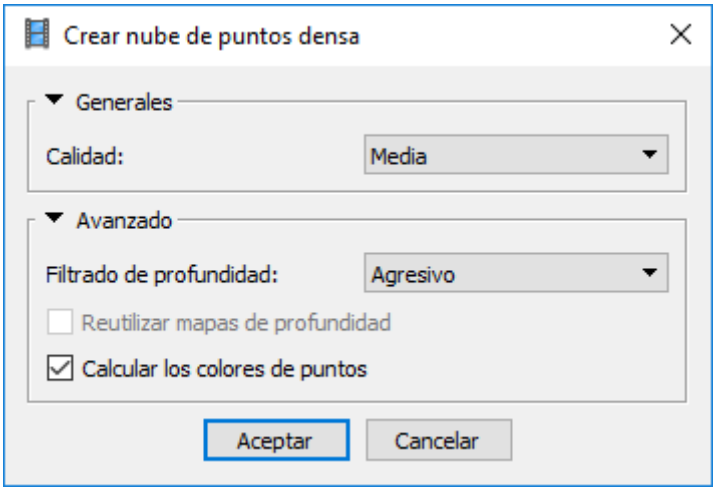


Figura 15 Creación de nube de puntos densa.

Después de que se ha restituido la nube densa de puntos es posible generar el modelo de interpolación de malla poligonal basado en los datos de la nube densa. Para esto se selecciona en el menú de la barra de tareas “Flujo de trabajo”--> “Crear malla”, así se abre un cuadro de diálogo donde se seleccionan los parámetros con los cuales se va a construir la malla, tal como se observa en la figura 16.

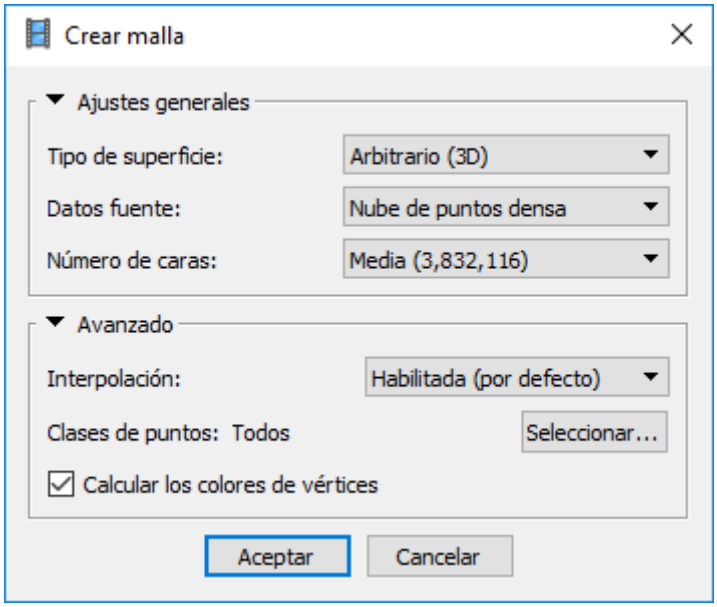


Figura 16 Creación de malla.

Para la construcción del MDS se selecciona en el menú de la barra de tareas “Flujo de trabajo”--> “Crear modelo digital de elevaciones ”, se abre una ventana de diálogo en la cual se deben ajustar los valores como se observa en la figura 18. Si se desea es posible exportar el MDS.

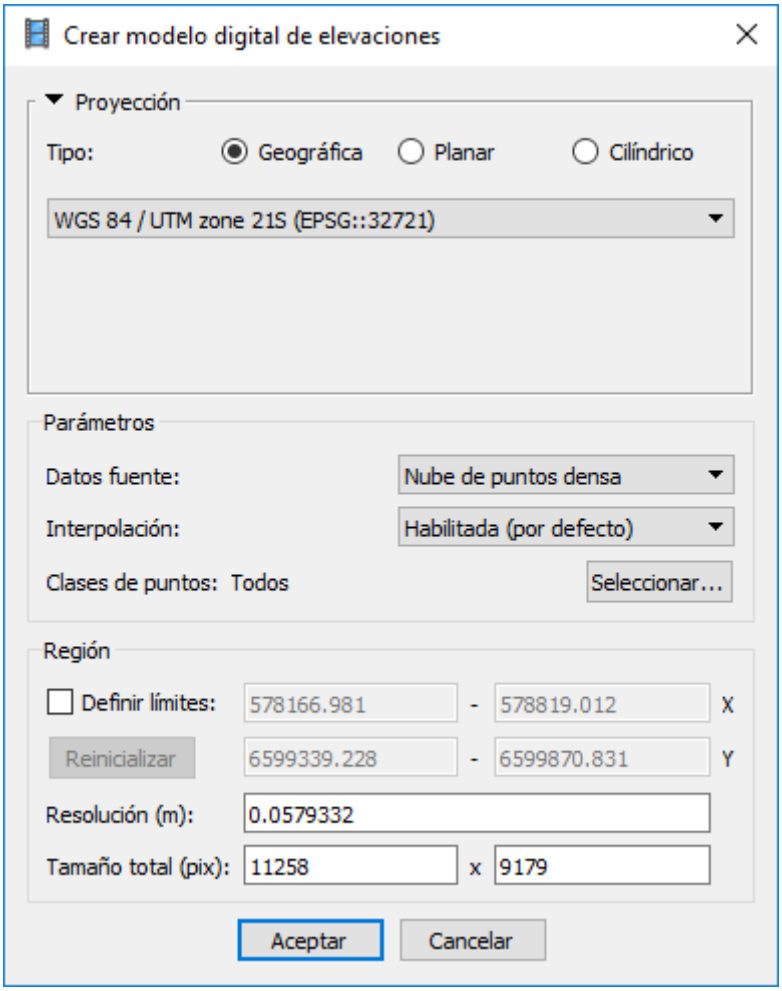


Figura 18 Creación del Modelo Digital de Elevaciones.

Para la generación del ortomosaico se selecciona en el menú de la barra de tareas “Flujo de trabajo”--> “Crear Ortomosaico”, se abre una ventana de diálogo en la cual se deben ajustar los valores como se observa en la figura 17. Si se desea es posible exportar el ortomosaico.

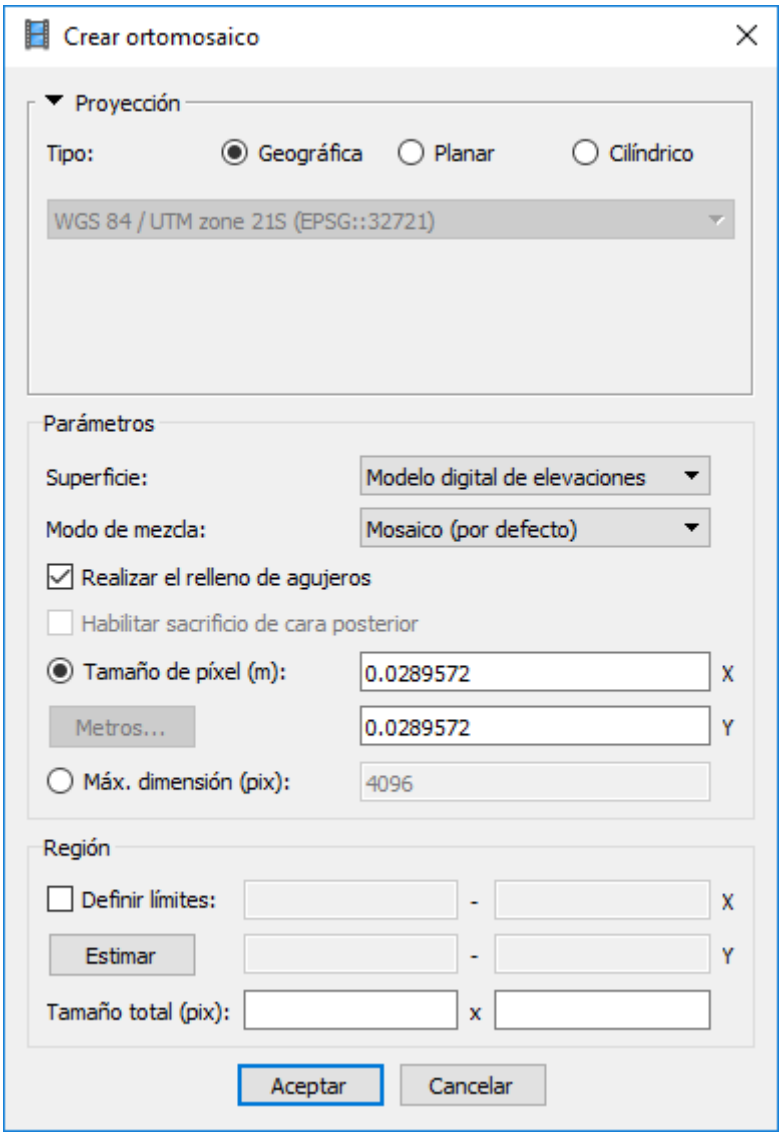


Figura 17 Creación del Ortomosaico.

A continuación se detallan los resultados del procesamiento realizado con el software AgisoftPhotoScan:

7.3. Procesamiento de 10 puntos de apoyo

Número	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Total (cm)
10	1.01657	1.31255	2.13118	1.66019	2.70151

Cuadro 8 ECM con 10 puntos de apoyo.

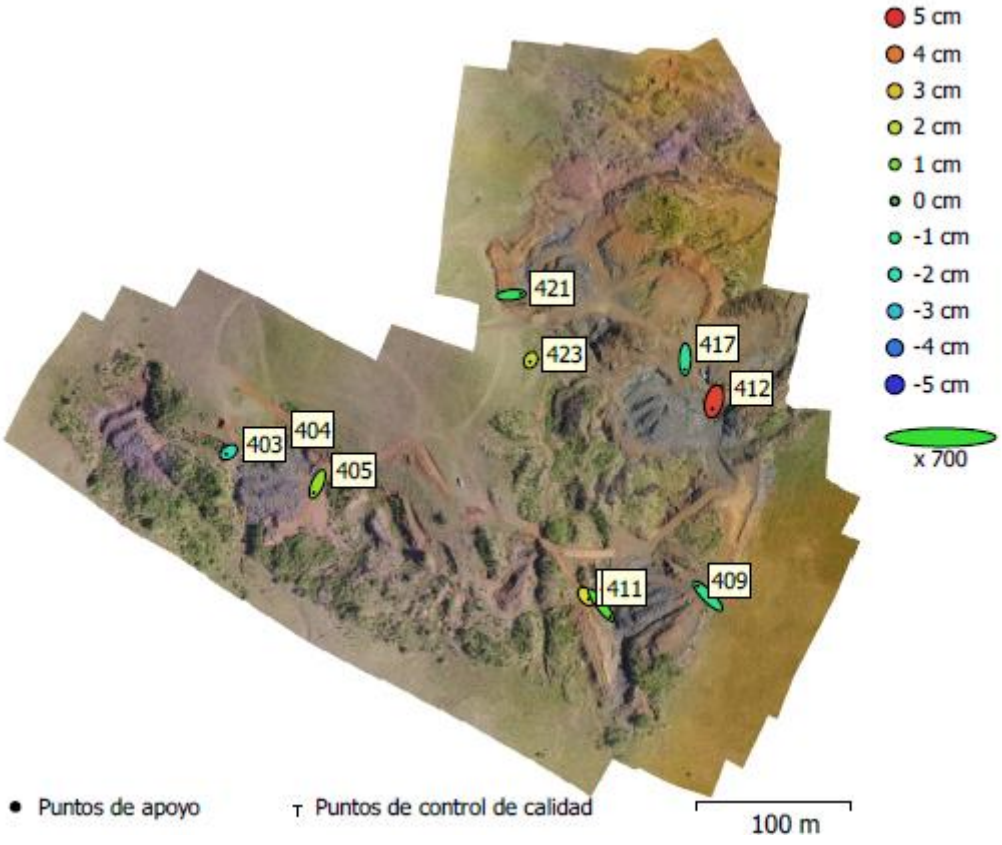


Figura 19 Distribución de los 10 puntos de apoyo

7.4. Procesamiento de 7 puntos de apoyo

Número	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Total (cm)
7	1.00271	1.25756	2.12034	1.60838	2.66134

Cuadro 9 ECM con 7 puntos de apoyo.

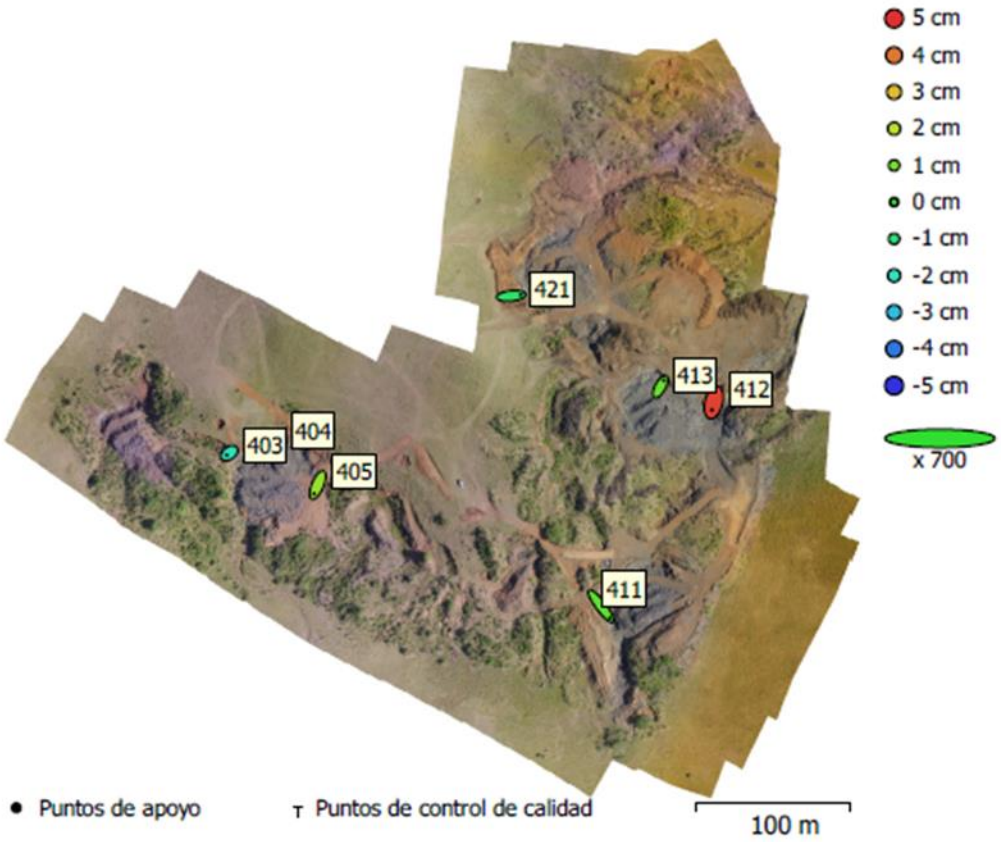


Figura 20 Distribución de los 7 puntos de apoyo

7.5. Procesamiento de 5 puntos de apoyo

Número	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Total (cm)
5	1.29378	1.38422	1.64494	1.89471	2.50914

Cuadro 10 ECM con 5 puntos de apoyo.

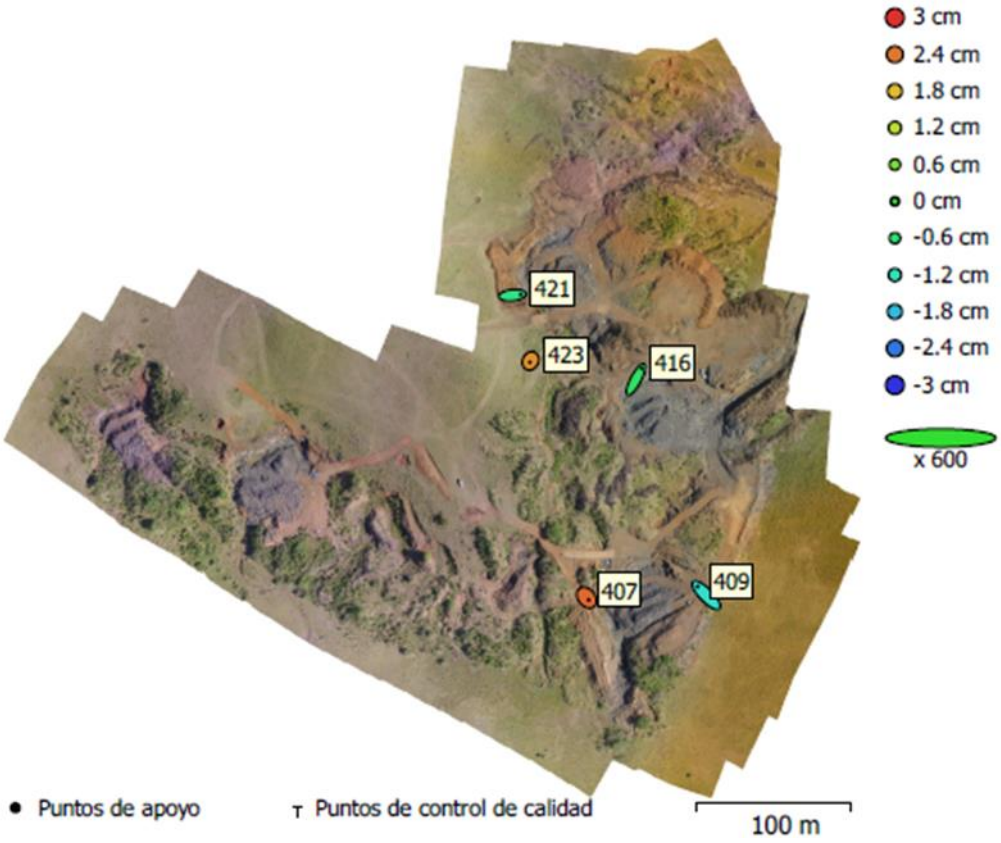


Figura 21 Distribución de los 5 puntos de apoyo

	Errores medios cuadráticos (EMC)				
Puntos de apoyo Procesados	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	XY (cm)	Total (cm)
22	1.07188	1.53845	1.88080	1.87503	2.66094
10	1.01657	1.31255	2.13118	1.66019	2.70151
7	1.00271	1.25756	2.12034	1.60838	2.66134
5	1.29378	1.38422	1.64494	1.89471	2.50914

Cuadro 11 Comparativo de los errores en los escenarios estudiados.

7.6. Metodología del segundo objetivo especifico

Se procedió a comparar las coordenadas X,Y,Z de los puntos de control para cada uno de los escenarios, del ortomosaico versus los relevados en campo por el Ing. Marcelo Torterola. En el Cuadro 12 se pueden observar las coordenadas de los puntos de control relevados y en la Figura 22 la ubicación de los mismos.

Punto CONTROL	GPS		
	X	Y	Z
402	578376,9440	6599609,6880	194,614
406	578508,1820	6599549,9880	199,142
408	578604,7960	6599515,5030	189,729
410	578613,2480	6599507,5260	185,922
414	578605,3760	6599620,0320	185,208
415	578594,9290	6599629,4530	188,289
418	578583,3040	6599710,1970	186,987
419	578559,3220	6599720,9860	185,615
420	578544,0960	6599690,4280	185,670
422	578542,8280	6599714,0490	188,430

Cuadro 12 - Puntos de Control

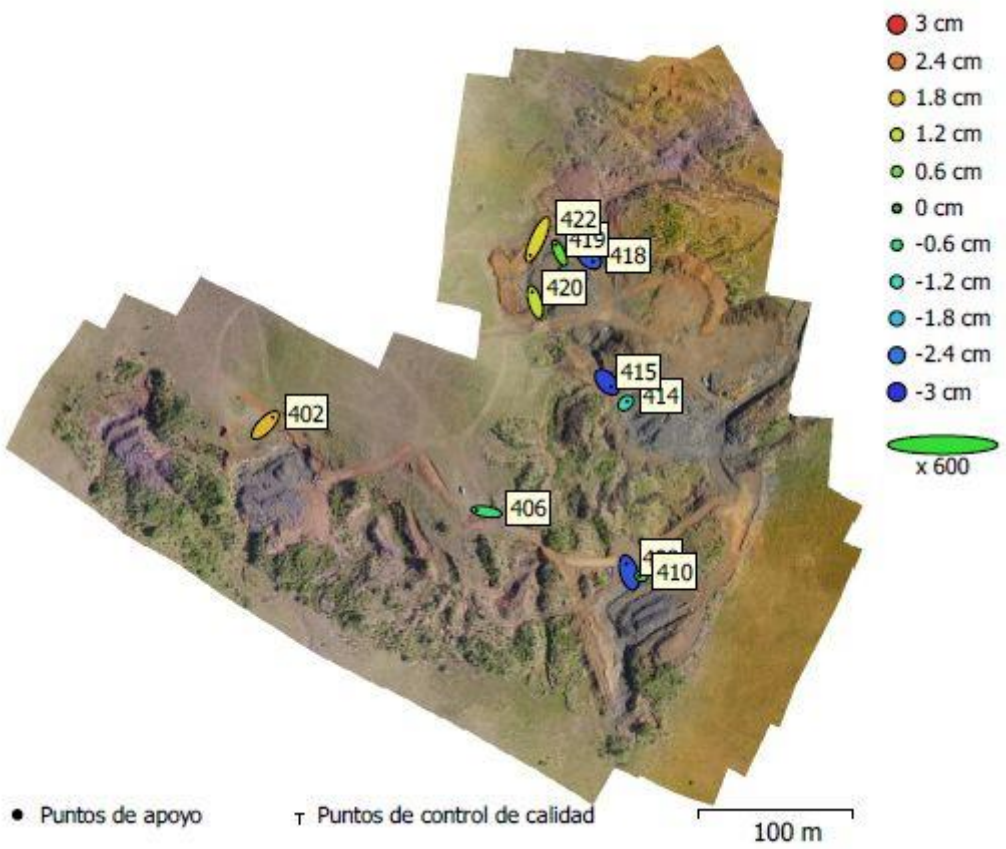


Figura 22 Distribución de los puntos de control

Se identificaron las coordenadas de los puntos de control señalizados en terreno, en los distintos ortomosaicos creados.

Escenario con 5 puntos de apoyo

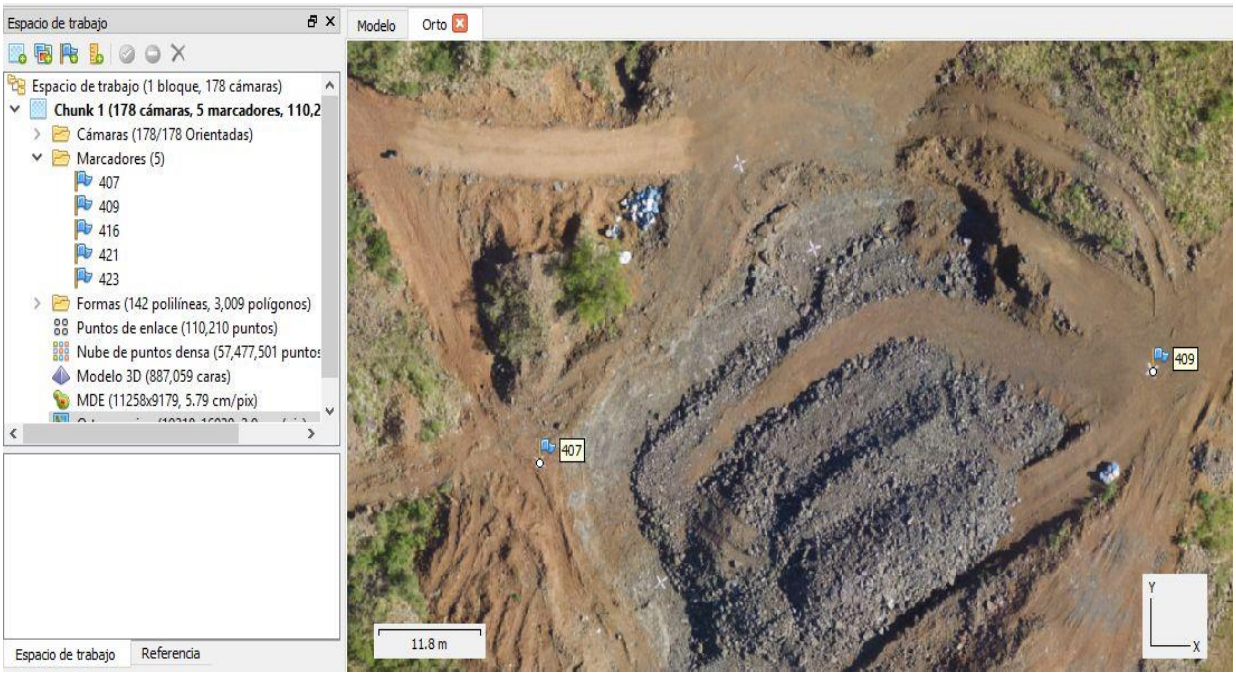


Figura 23 Medición de puntos de apoyo en escenario de 5 puntos de apoyo.

Punto CONTROL	dX	dY	EMC (XY) (m)	dZ
402	-0,00326	-0,00828	0,00889	-0,02300
406	0,04792	0,02177	0,05263	0,02000
408	-0,01750	-0,04586	0,04909	0,03300
410	0,02852	0,02702	0,03928	0,01000
414	0,02863	-0,00557	0,02917	0,02500
415	-0,04589	0,02635	0,05292	0,02400
418	0,02181	-0,01264	0,02520	0,03100
419	0,02865	-0,03941	0,04872	-0,01600
420	-0,00867	-0,01099	0,01400	-0,01700
422	0,00109	0,06185	0,06186	-0,01200
EMC (m)	0,02779	0,03124	0,04182	0,02229
EMC (cm)	**2,77944**	**3,12419**	**4,18161**	**2,22913**

Cuadro 13 Variaciones de los Puntos de Control en escenario de 5 puntos de apoyo

Escenario con 7 puntos de apoyo

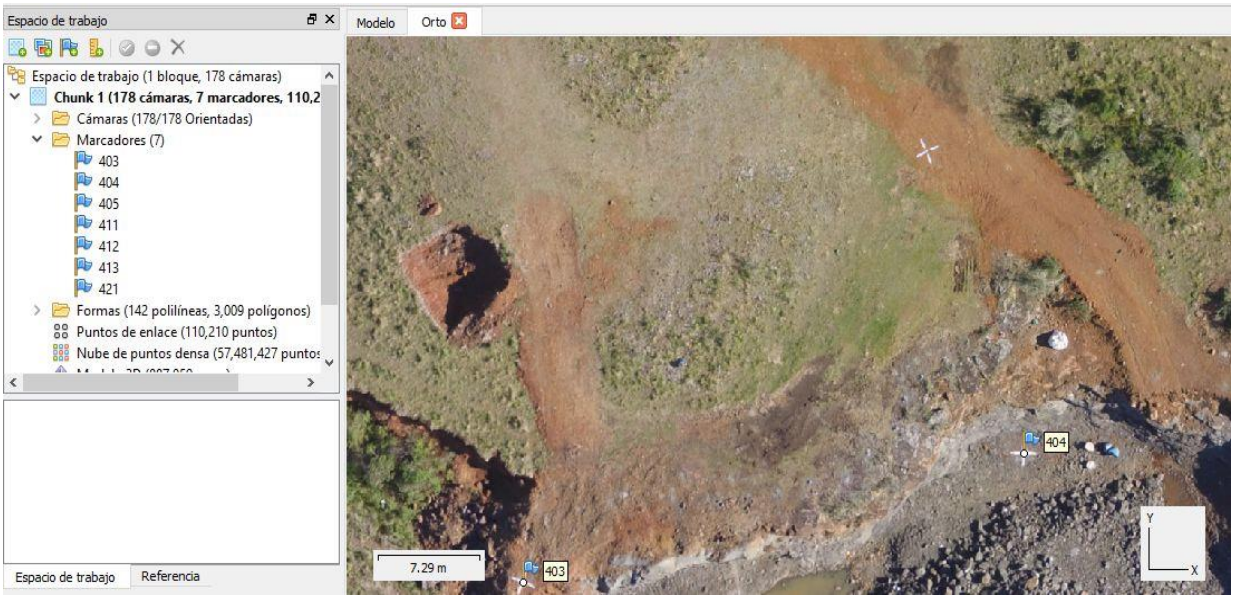


Figura 24 Medición de puntos de apoyo en escenario de 7 puntos de apoyo

Punto CONTROL	dX	dY	EMC (XY) (m)	dZ
402	-0,00029	-0,01718	0,01718	-0,02300
406	0,04579	0,01096	0,04708	0,02100
408	-0,02645	-0,03606	0,04472	0,03300
410	0,02494	0,03417	0,04230	-0,00400
414	0,02275	-0,00343	0,02301	0,02600
415	-0,04587	0,03065	0,05517	0,02500
418	0,02255	-0,00560	0,02323	0,03100
419	0,02071	-0,03469	0,04040	-0,01600
420	-0,01096	0,00062	0,01098	-0,02900
422	-0,00724	0,06043	0,06086	-0,01200
EMC (m)	0,02674	0,02953	0,03984	0,02362
EMC (cm)	**2,67392**	**2,95320**	**3,98387**	**2,36178**

Cuadro 14 Variaciones de los Puntos de Control en escenario de 7 puntos de apoyo

Escenario con 10 puntos de apoyo

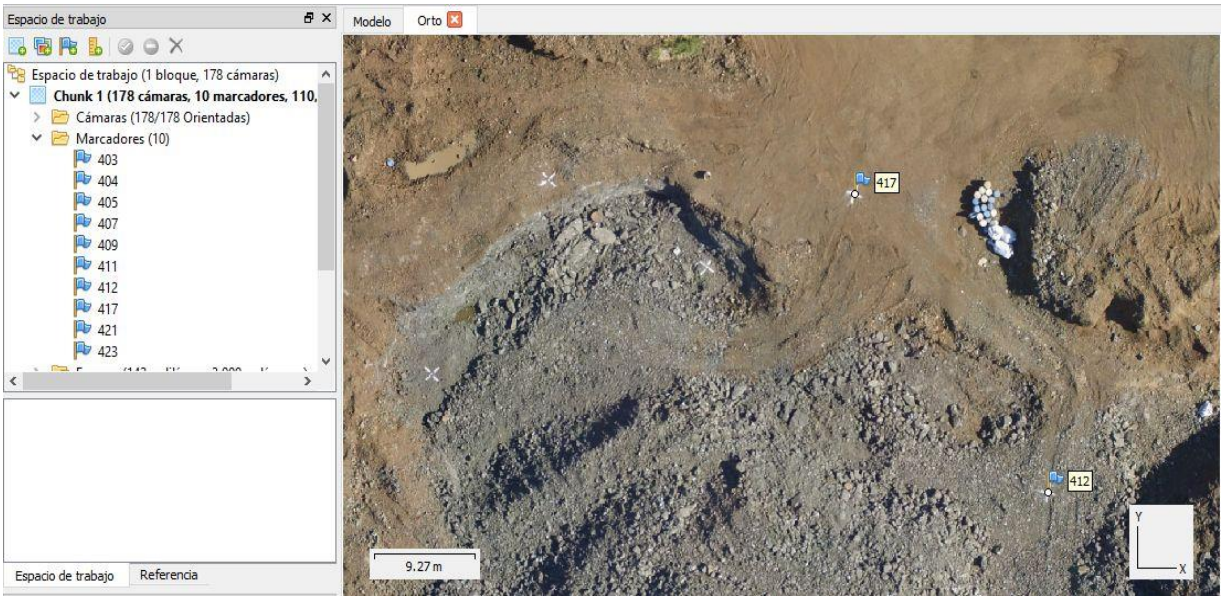


Figura 25 Medición de puntos de apoyo en escenario de 10 puntos de apoyo

Punto CONTROL	dX	dY	EMC (XY) (m)	dZ
402	-0,00209	-0,00508	0,00549	-0,02300
406	0,04118	0,00718	0,04180	0,00900
408	-0,01880	-0,04082	0,04494	0,03300
410	0,03106	0,03472	0,04659	-0,00400
414	0,02016	-0,00348	0,02046	0,02500
415	-0,05000	0,03045	0,05854	0,02400
418	0,02105	-0,00718	0,02224	0,03100
419	0,03052	-0,02588	0,04002	-0,02800
420	-0,00795	-0,00889	0,01192	-0,01600
422	-0,01124	0,05178	0,05298	-0,01200
EMC (m)	0,02737	0,02715	0,03855	0,02250
EMC (cm)	**2,73664**	**2,71460**	**3,85464**	**2,24967**

Cuadro 15 Variaciones de los Puntos de Control en escenario de 10 puntos

Resumen de resultados:

Escenario con	Error Puntos de control en XY (cm)	Error Puntos de control en Z (cm)
10 puntos de poyo	3,85464	2,24967
7 puntos de apoyo	3,98387	2,36178
5 puntos de apoyo	4,18161	2,22913

Cuadro 16 -Comparativo de los errores en los escenarios estudiados.

7.7. Metodología del tercer objetivo especifico

Con el fin de tener otro insumo para el análisis, se tomaron los 22 puntos anteriormente utilizados, generando a partir de éstos, 30 muestreos aleatorios de 10 puntos de apoyo (cuadro 17) y los 12 restantes como puntos de control (variando éstos en todos los muestreos). Posteriormente se utilizó la herramienta de optimización del software, que genera una mejora en el ajuste de la alineación y calibración de la cámara, basada en las ubicaciones de los puntos de control, se registraron los errores obtenidos en los puntos de control de cada muestreo y algunos estadísticos (cuadro 18).

Aleatorio 1	Aleatorio 2	Aleatorio 3	Aleatorio 4	Aleatorio 5	Aleatorio 6	Aleatorio 7	Aleatorio 8	Aleatorio 9	Aleatorio 10
402	403	403	402	403	403	405	402	402	406
403	404	404	403	404	404	406	404	403	408
404	405	407	404	407	405	407	405	404	411
406	409	410	405	409	409	408	413	405	413
408	410	412	406	410	410	409	414	406	416
410	412	414	417	412	412	412	415	411	417
414	413	418	418	413	413	415	416	414	418
416	414	419	420	419	415	416	419	419	419
418	420	420	421	421	418	419	420	422	420
423	422	423	423	422	421	421	422	423	423
Aleatorio 11	Aleatorio 12	Aleatorio 13	Aleatorio 14	Aleatorio 15	Aleatorio 16	Aleatorio 17	Aleatorio 18	Aleatorio 19	Aleatorio 20
402	402	402	405	403	402	402	402	403	405
405	403	403	409	404	403	403	404	406	406
406	406	405	410	405	404	405	405	411	407
409	407	409	411	410	405	406	407	412	410
410	409	410	412	412	406	407	411	413	411
411	411	412	414	414	407	411	415	414	413
413	413	414	417	416	411	415	416	415	416
418	415	416	420	419	412	418	417	416	420
419	416	418	421	420	416	421	418	418	421
420	417	423	423	423	421	422	423	422	423
Aleatorio 21	Aleatorio 22	Aleatorio 23	Aleatorio 24	Aleatorio 25	Aleatorio 26	Aleatorio 27	Aleatorio 28	Aleatorio 29	Aleatorio 30
402	402	403	403	405	402	404	405	404	402
405	404	405	405	406	403	407	406	409	405
406	408	406	406	409	407	409	408	410	406
409	411	412	411	410	411	410	411	411	407
410	414	413	412	411	414	412	413	412	410
411	416	414	415	414	415	414	414	415	412
414	418	415	416	416	416	416	416	416	415
417	419	419	421	417	417	420	418	417	419
418	421	421	422	418	421	422	419	418	422
421	422	423	423	420	422	423	423	420	423

Cuadro 17 Muestreos aleatorios de 10 puntos de apoyo

	Error Total (cm)			
	Apoyo		Control	
Aleatorio	Error XY (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Error Z (cm)
1	1,483	1,115	2,814	5,723
2	1,712	1,736	2,699	5,396
3	1,066	2,103	2,877	4,184
4	1,569	1,166	4,175	8,685
5	1,872	1,691	2,476	4,724
6	1,177	1,956	3,031	4,267
7	1,749	1,926	3,272	6,031
8	1,721	1,292	4,001	4,688
9	1,675	1,159	3,121	3,699
10	1,872	1,081	3,116	14,510
11	1,826	1,043	2,451	4,026
12	2,081	1,057	2,744	12,610
13	1,604	1,843	2,705	5,714
14	1,540	1,973	3,221	5,545
15	1,242	1,718	3,045	4,038
16	1,666	1,556	2,686	4,625
17	1,752	1,317	2,889	4,765
18	1,478	0,897	3,012	6,458
19	1,603	1,742	2,815	6,949
20	1,782	0,949	3,445	5,494
21	1,703	0,721	2,387	4,542
22	1,910	1,406	2,845	3,837
23	1,367	1,741	3,289	4,188
24	1,756	1,784	2,824	4,259
25	1,819	0,999	3,232	5,378
26	1,914	1,105	2,923	4,394
27	1,876	1,939	2,574	3,895
28	1,507	1,509	3,449	5,530
29	2,034	2,079	2,236	2,550
30	1,721	1,573	2,370	5,681
Media	1,669	1,473	2,958	5,546
Varianza	0,057	0,161	0,194	6,141
Des std	0,238	0,401	0,441	2,478
Media+σ al 95%	2,082	2,259	3,720	10,403
Media-σ al 95%	1,257	0,686	2,195	0,689
Media+σ al 99%	2,283	2,506	4,093	11,929
Media-σ al 99%	1,055	0,439	1,822	-0,837

Cuadro 18 Errores y estadísticos de los 30 muestreos aleatorios de puntos de apoyo/control

8. ANALISIS Y RESULTADOS

8.1. Objetivo uno

A continuación, presentamos el cuadro con los resultados obtenidos.

Errores medios cuadráticos (EMC)			
Puntos de apoyo procesados	Error XY (cm)	Error Z (cm)	Total (cm)
22	1.9	1.9	2.7
10	1.7	2.1	2.7
7	1.6	2.1	2.7
5	1.9	1.6	2.5

Cuadro 19 Resultados objetivo 1.

Se puede observar que independientemente de la cantidad de puntos de apoyo que se consideren, los resultados no varían significativamente. Si tenemos en cuenta que la distribución de los puntos fue aleatoria, se puede suponer que haciendo una mejor elección de los puntos de apoyo el resultado podría ser más consistente o robusto.

La variación en Z es mayor pero es esperable, ya que esta variable se ve afectada por la escala utilizada y la topografía del terreno. Los software automáticos, en el procesamiento, suelen realizar un suavizado en dicha coordenada (Revista Nosolosig - 2015).

Si tenemos en cuenta que el tamaño del píxel es de 2,89 cm/píxel podemos notar que los errores en los resultados de los ajustes tanto en planimetría como en altimetría son menores al pixel.

8.2. Objetivo dos

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Escenario	Error Puntos de control en XY (cm)	Error Puntos de control en Z (cm)
10 puntos de apoyo	3,9	2,2
7 puntos de apoyo	4.0	2,4
5 puntos de apoyo	4,2	2,2

Cuadro 20 Resultados objetivo 2

Podemos observar que el error en planimetría en los puntos de control aumenta cuando baja la cantidad de puntos de apoyo utilizados, de todas formas estamos hablando de 3 mm de diferencia, lo cual es probablemente despreciable para la mayoría de los usos previstos para este tipo de relevamientos

En la altimetría en cambio no encontramos gran variación, suponemos que esto sucede al igual que en planimetría, por la selección de puntos realizada, pudimos ver que los muestreos de 10 y 7 puntos tienen 6 puntos en común, y los muestreos de 10 y 5

tienen 4 puntos en común. Mientras los muestreos de 7 y 5 puntos, tienen sólo un punto en común, allí la justificación de la poca variación no la pudimos determinar en este estudio.

El mayor error en XY es del orden de los 1,5 pixel mientras que en Z, el error está por debajo del pixel.

8.3. Objetivo tres

Los resultados obtenidos, se resumen en los siguientes estadísticos.

	Error Total (cm)			
	Apoyo		Control	
Aleatorio	Error XY (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Error Z (cm)
Media	1,669	1,473	2,958	5,546
Varianza	0,057	0,161	0,194	6,141
Des std	0,238	0,401	0,441	2,478
Media+σ al 95%	2,082	2,259	3,720	10,403
Media-σ al 95%	1,257	0,686	2,195	0,689
Media+σ al 99%	2,283	2,506	4,093	11,929
Media-σ al 99%	1,055	0,439	1,822	-0,837

Cuadro 21 Resultados objetivo 3.

Podemos notar que la varianza en planimetría es muy baja, si observamos el Gráfico 1, claramente nos indica que la gran mayoría de los muestreos, excepto 2 (4 y 8), se encuentra en el intervalo de confianza del 95%.

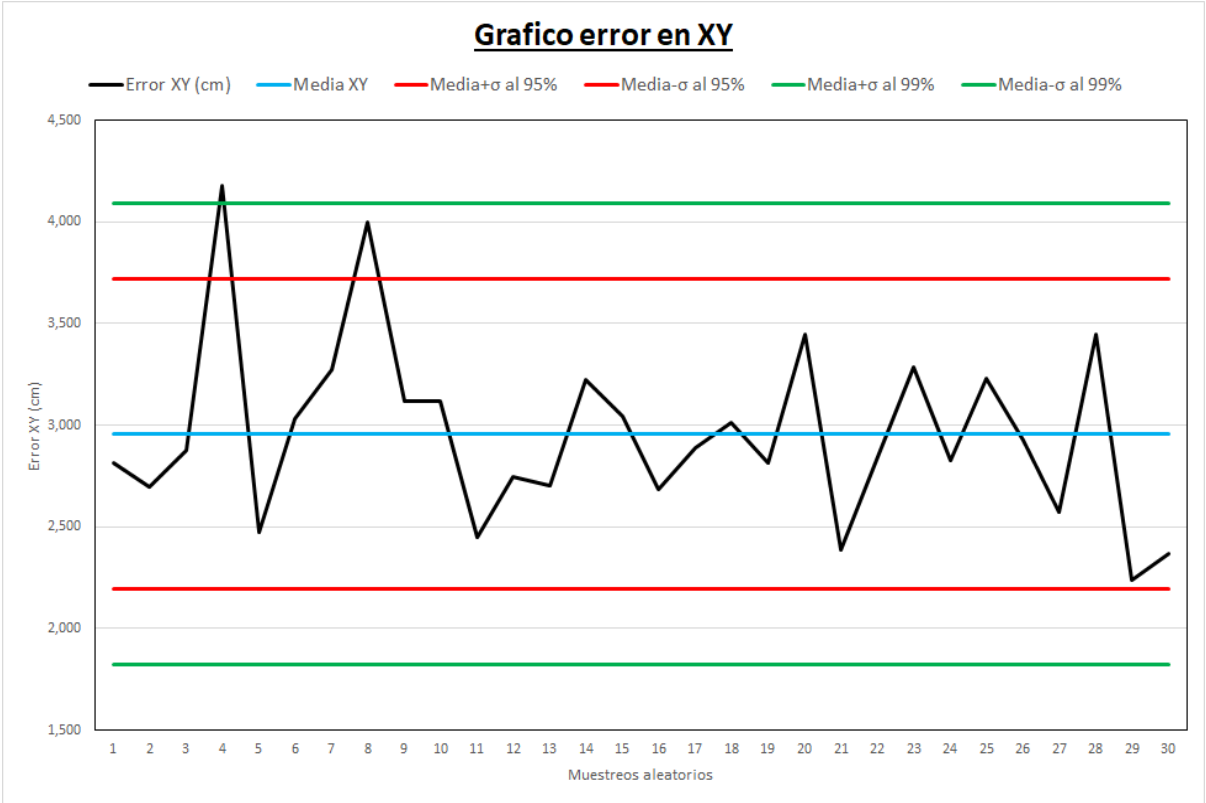


Gráfico 1 - Comparación de los errores planimétricos con media $\pm\sigma$ al 95%.

En altimetría en cambio, notamos que la varianza es elevada (6,1), lo cual se podría explicar por la existencia de posibles outliers (considerando como margen para detectar outliers el límite de 3*sigmas) (muestreos 10 y 12), aunque los resultados son posibles.

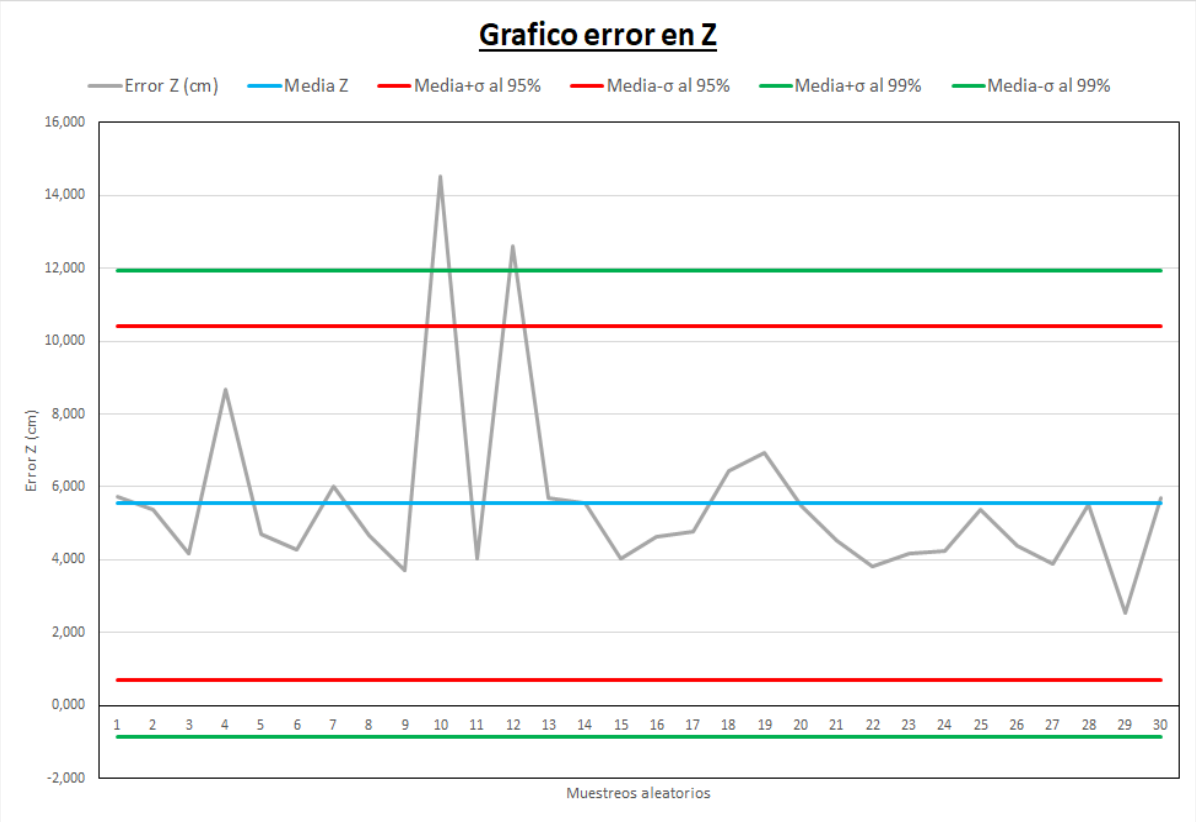


Gráfico 2 - Comparación de los errores altimétricos con media $\pm\sigma$al 95%.

Al comparar la distribución de los puntos de apoyo de los dos muestreos aleatorios con un mayor error (Figura 26) con el más próximo a la media (Figura 27), se observa que en este último la distribución de los puntos es dispersa mientras que en los otros dos casos, donde el error incrementó sensiblemente, la distribución deja amplios sectores sin cubrir.

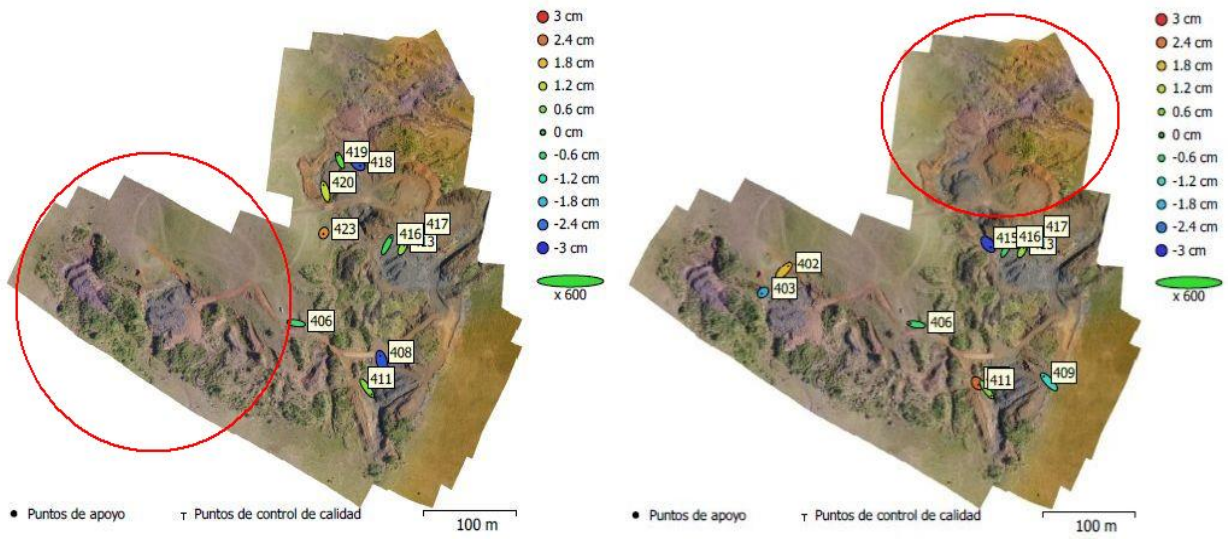


Figura 26 Distribución de los puntos de apoyo Aleatorio 10 y 12

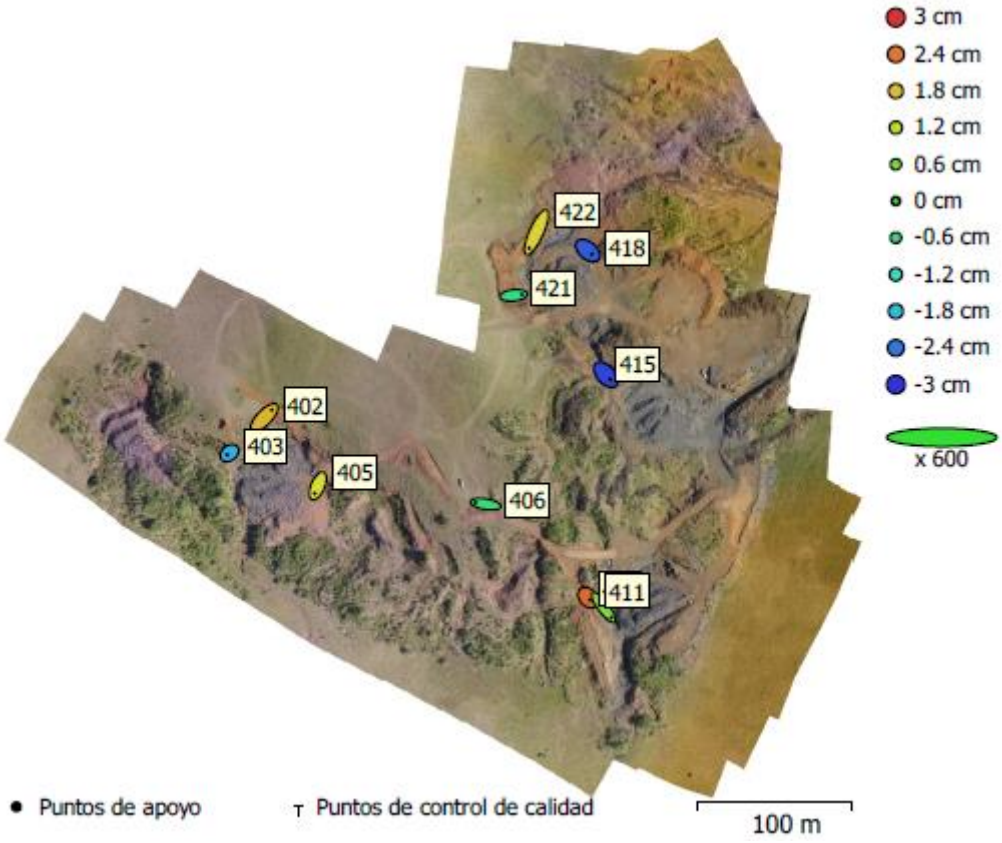


Figura 27 Distribución de los puntos de apoyo en Aleatorio 17.

Si consideramos estos dos aleatorios (10 y 12) como outliers y calculamos nuevamente los estadísticos notamos que la varianza baja considerablemente en altimetría (Cuadro 22), lo que se aprecia claramente en el Gráfico 3, quedando solo un muestreo por encima de las medias ±kσ para el 95% y 99% de confianza.

	Error Total (cm)			
	Apoyo		Control	
Aleatorio	Error XY (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Error Z (cm)
Media	1,647	1,501	2,959	4,974
Varianza	0,053	0,160	0,206	1,432
Des std	0,230	0,400	0,454	1,197
Media+σ al 95%	2,045	2,285	3,745	7,319
Media-σ al 95%	1,250	0,717	2,174	2,628
Media+σ al 99%	2,239	2,532	4,129	8,056
Media-σ al 99%	1,056	0,471	1,790	1,891

Cuadro 22 Resultados objetivo 3 sin outliers (10 y 12).

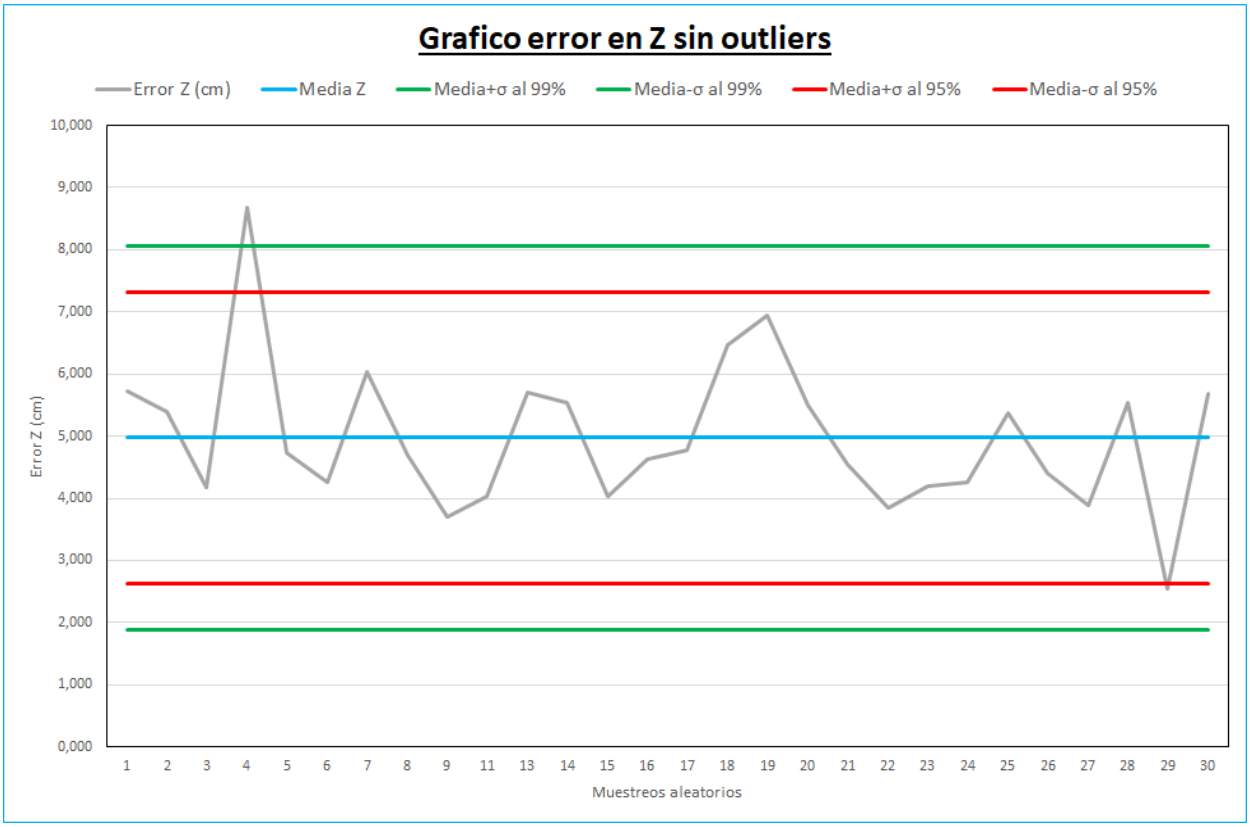


Gráfico 3 Comparación de los errores altimétricos con media +-k$k\sigma$ para el 95% y 99% sin considerar outliers (10 y 12)

Si consideramos el muestreo 4 como otro posible outlier y re calculamos los estadísticos, obtenemos los valores que se detallan en el cuadro 23.

	Error Total (cm)			
	Apoyo		Control	
Aleatorio	Error XY (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Error Z (cm)
Media	1,650	1,514	2,914	4,836
Varianza	0,054	0,162	0,155	0,938
Des std	0,233	0,402	0,394	0,968
Media+σ al 95%	2,054	2,302	3,596	6,735
Media-σ al 95%	1,246	0,726	2,233	2,938
Media+σ al 99%	2,251	2,549	3,929	7,331
Media-σ al 99%	1,049	0,478	1,900	2,342

Cuadro 23 Resultados objetivo 3 sin outliers (4, 10 y 12).

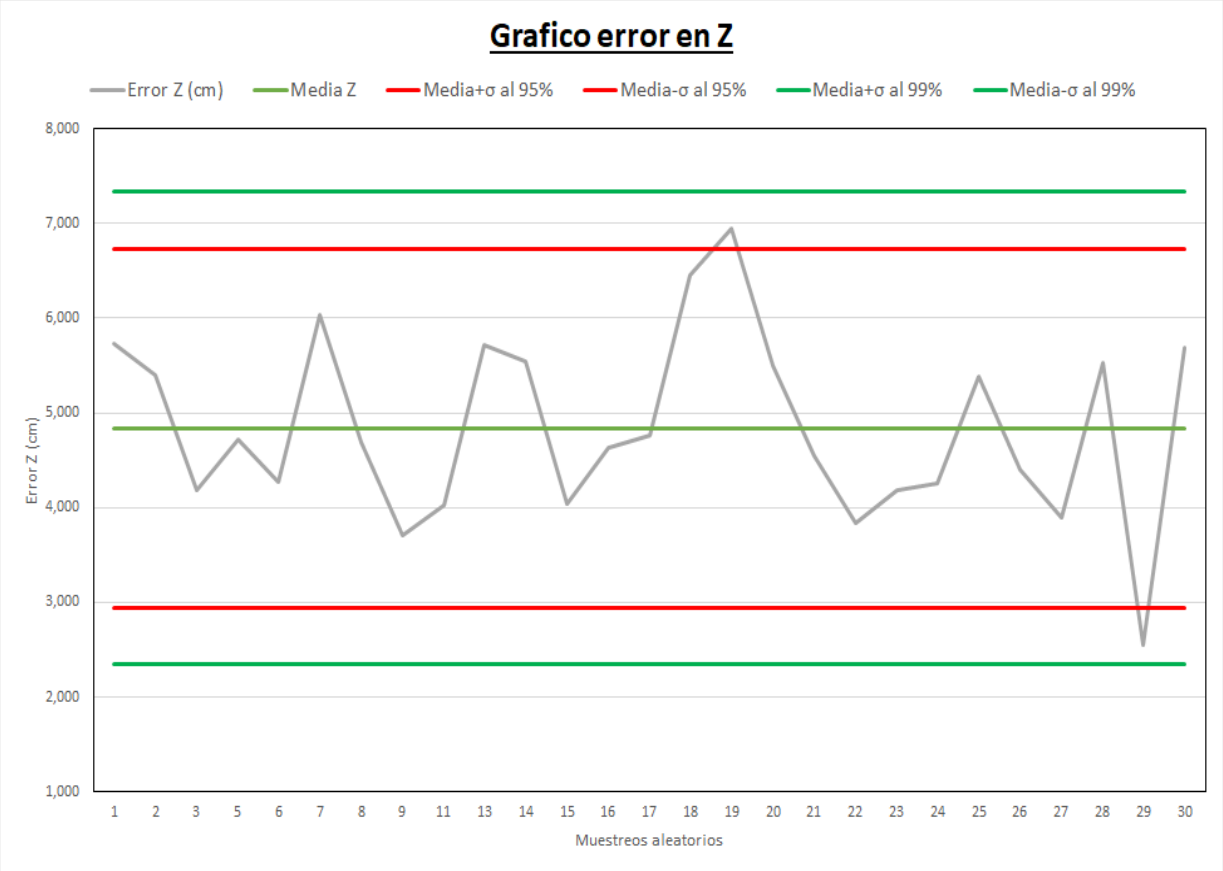


Gráfico 4 Comparación de los errores altimétricos con media $\pm\sigma$ al 95% y 99% sin considerar outliers (4, 10 y 12)

El gráfico 4 nos muestra los errores altimétricos sin considerar los 3 outliers vistos, donde la mayoría de los muestreos se ubican dentro de la banda de errores al 95% de confianza.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se aporta información sobre la evaluación de los valores de exactitud posicional de un vuelo fotogramétrico realizado por un VANT variando la cantidad de puntos de apoyo. Se realizaron 3 nuevos procesos del vuelo con 5,7 y 10 puntos de apoyo y en ellos se calcularon las variaciones de los puntos de control. Posteriormente se seleccionaron aleatoriamente 30 grupos de 10 puntos de apoyo cada uno, considerando los restantes 12 como puntos de control, a efectos de estudiar la variación de los ajustes realizados por el Software.

El tamaño del píxel en este trabajo es de 2.89 cm, por lo que podemos observar que en el caso del primer objetivo los errores obtenidos tanto en planimetría como en altimetría, están en el orden de un pixel. Si consideramos que el error que se aceptaría para los trabajos que actualmente se realizan, sería de 2 px para planimetría y 3 px para altimetría, los resultados podrían considerarse aceptables.

En el caso del objetivo 2 el error en altimetría no sufre grandes variaciones (siempre por debajo del píxel), sin embargo en planimetría se nota claramente que la disminución de puntos incrementa el error, igualmente el error máximo se encuentra en el orden de 1,5 px.

Para el objetivo 3 si no tenemos en cuenta los muestreos considerados outliers resulta un error máximo al 95% de confianza, en planimetría del orden de 1,2 px mientras que en altimetría en el orden de 2,3 px. Recordemos que en este caso de estudio todos los muestreos son aleatorios sin considerar la distribución de los puntos.

En los tres objetivos observamos que los errores máximos se encuentran en el orden de 1,5 px en planimetría y 2,3 px en altimetría. Estimamos que estos resultados se deben en parte a la solidez del modelo, que presenta un gran número de puntos de enlace (supera los 100 mil) y a la cantidad de imágenes (≅16) en las que se encuentra cada punto.

10. RECOMENDACIONES

De todo lo expuesto se podrían abrir nuevas líneas de investigación. Por ejemplo, considerando la distribución de los puntos de apoyo, conforme a recomendaciones internacionales para fotogrametría.

Otro aspecto a considerar sería introducir variaciones en el plan de vuelo, evaluando el incremento o disminución de la cantidad de fotos y/o puntos de apoyo.

El tipo de terreno tambíen podría ser una variable que pueda influir en los resultados por lo que esta sería una variable a modificar para verificar si los resultados en los errores se mantienen en el mismo orden.

La utilización de otros softwares sería una opción interesante para evaluar si se producen cambios significativos en los resultados que sean motivados por el software.

11. BIBLIOGRAFIA

+ AEREAL INSIGHT, 2018, "¿Que es la fotogrametría con drones?". Visitado en marzo 2019. Disponible en: http://www.aerial-insights.co/blog/fotogrametria-con-drones/
+ ÁREA DRON, 2017, "Ventajas de la fotogrametría con drones" Visitado en Marzo 2019. Disponible en: http://www.areadron.com/ventajas-de-la-fotogrametria-con-drones/
+ CUERNO REJADO, Cristina, 2015, E.T.S. I. Aeronáuticos Universidad Politécnica de Madrid, "Origen y desarrollo de los sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto" (Prologo, pag 13)
+ DRONE SPAIN, 2018, "Ventajas e inconvenientes de la fotogrametría con drones". Visitado en Marzo 2019 Disponible en: https://dronespain.pro/fotogrametria-con-drones/
+ DRONES WEB, 2018, "Ventajas y desventajas de los drones". Visitado en Marzo 2019. Disponible en: https://www.dronesweb.net/ventajas-desventajas-los-drones/
+ FELICISIMO, Angel M. (1994), Modelos digitales del terreno, Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales.
+ ISO 9000:2005 https://www.iso.org/standard/42180.html
+ ISO 3534-1:2006 https://www.iso.org/standard/40145.html
+ ISO 19157:2013 https://www.iso.org/standard/32575.html
+ JAUREGUY, Luis; Instituto de Fotogrametría Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes Venezuela. "Introducción a la fotogrametría". Visitado en marzo 2019. Disponible en: http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDa/CAPITULO1.pdf
+ PEREZ LOPEZ, Samanda, at all, 2015, "*Evaluación de la calidad de los levantamientos realizados con la tecnología VANT. Estudio de caso: modelo DSM Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C.*"
+ LOPEZ GIMENO, Carlos, 2015, Director General de Industria, Energía y Minas, Comunidad de Madrid, publicación en conjunto con la Fundación de la Energía de la comunidad de Madrid. "Guia sobre los drones y su aplicaciones a la Ingeniería Civil"
+ MANUEL F., CRUZ M. (2008). Caracterización de puntos de control en teledetección: Aplicación de la corrección geométrica automática de imágenes NOAA-AVHRR GAC-5km. Tesis Doctoral. Universidad de Almería, Departamento de Lenguaje y Computación.
+ OLAYA, Victor (2016), Sistemas de Información Geográfica. Libro libre disponible en: http://volaya.github.io/libro-sig/
+ Resolución de la Dinacia 291/2014 https://www.dinacia.gub.uy/aeronavegabilidad/item/843-resolucion-n-291-2014-de-29-de-agosto-de-2014.html)

+ Revista Nosolosig, artículo publicado el 27 Julio 2015. Visitado en Julio 2019. Disponible en: http://www.nosolosig.com/articulos/531-5-errores-habituales-de-vuelos-con-drones-para-cartografia
+ Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales de la Fuerza Aérea Uruguaya https://www.dinacia.gub.uy/comunidad-aeronautica/2013-11-01-16-45-49/centro-de-investigacion-y-difusion-aeronautico-espacial-cida-e/item/download/708_b9c48fb8604bcf3c21302fb5747ab05d.html
+ TODRONE, 2016, “Con el eBee en 40 minutos estamos cubriendo el trabajo de un mes”. Visitado en Marzo 2019. Disponible en: https://www.todrone.com/drones-en-topografia/

12. INDICE DE IMÁGENES

Figura 1 - Cronología de los nombres aplicados a las aeronaves robóticas. CUERNO REJADO, Cristina, 2015, E.T.S. I. Aeronáuticos Universidad Politécnica de Madrid, “Origen y desarrollo de los sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto” (Capitulo 1, pag 16).
Figura 2 - Usos en la agricultura. https://www.agronegocio.pro/los-drones-y-la-agricultura-de-precision/
https://agricolas.org/jornada-tecnologia-drones-agricultura-almeria/
Figura 3 - Aplicación en prospección y explotación de recursos.
http://blog.droneprix.es/los-drones-teledirigidos-los-nuevos-faroleros-del-siglo-xxi/
https://www.icog.es/TyT/index.php/2017/02/la-tierra-a-vista-de-pajaro-uso-de-drones-uavs-para-el-estudio-y-difusion-de-la-geologia/
Figura 4 - Aplicación en seguridad. http://ictsseguridad.com/drones-una-amenaza-o-una-ayuda-para-la-seguridad-2/ http://sincratech.com/tecnologia/el-uso-de-drones-para-el-control-de-la-calidad-del-aire/#post/0 http://blog.droneprix.es/la-dgt-planea-controlar-el-trafico-con-drones-a-partir-de-2019/
Figura 5 - Aplicación en cartografía, rescate y control de obras.
http://blog.lcrcom.net/usos-y-aplicaciones-de-los-drones/
http://www.drone4work.es/joomla/index.php/servicios/busqueda-y-rescate
Figura 6 - Aplicación en entregas de productos.
https://www.youtube.com/watch?time_continue=75&v=vNySOrI2Ny8
Figura 7 - Aplicaciones submarinas https://computerhoy.com/noticias/life/swellpro-spry-dron-anfibio-vuela-sumerge-agua-397085
Figura 8 - Distribución de puntos de control. FGDC ("Geospatial Positioning Accuracy Standards". Virginia (U.S.): Ninnesota Planning, 1999. FGCD-STD-007-1998.)
Figura 9 - Ubicación en Territorio Nacional. Elaboración propia.
Figura 10 - Ubicación en el Departamento. Elaboración propia.
Figura 11 - Ubicación del Padrón. Elaboración propia.
Figura 12 - Ubicación en Google Earth. Elaboración propia.
Figura 13 - Distribución de los 22 puntos utilizados por el Ing. Torterola**.** Elaboración del software.
Figura 14 - Barra de tareas Agisoft PhotoScan.
Figura 15 - Creación de nube de puntos densa.
Figura 16 - Creación de malla.
Figura 17 - Creación del Ortomosaico.
Figura 18 - Creación del Modelo Digital de Elevaciones.
Figura 19 - Distribución de los 10 puntos de apoyo.
Figura 20 - Distribución de los 7 puntos de apoyo.
Figura 21 - Distribución de los 5 puntos de apoyo.
Figura 22 - Distribución de los 10 puntos de control.
Figura 23 - Medición de puntos de apoyo en escenario de 5 puntos de apoyo.
Figura 24 - Medición de puntos de apoyo en escenario de 7 puntos de apoyo.
Figura 25 - Medición de puntos de apoyo en escenario de 10 puntos de apoyo.
Figura 26 - Distribución de los puntos de apoyo en aleatorio 10 y 12.
Figura 27 - Distribución de los puntos de apoyo en aleatorio 17.

13. INDICE DE CUADROS

Cuadro 1 - Tabla de resultados de exactitud.Elaboracion propia en base a: “Exactitud de trabajos fotogramétricos realizados con equipos UAV, casos de estudio, 1 Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, San Salvador, El Salvador, 2014 Ing Jorge Urrutia Ing Yuri Rogriguez”

Cuadro 2 - Discrepancias en deslizamiento km 18,5. Exactitud de trabajos fotogramétricos realizados con equipos UAV, casos de estudio, 1 Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, San Salvador, El Salvador, 2014 Ing Jorge Urrutia Ing Yuri Rogriguez

Cuadro 3 -Discrepancias en borda de río Jiboa. Exactitud de trabajos fotogramétricos realizados con equipos UAV, casos de estudio, 1 Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, San Salvador, El Salvador, 2014 Ing Jorge Urrutia Ing Yuri Rogriguez

Cuadro 4 - Discrepancias en puente El Jute. Exactitud de trabajos fotogramétricos realizados con equipos UAV, casos de estudio, 1 Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, San Salvador, El Salvador, 2014 Ing Jorge Urrutia Ing Yuri Rogriguez

Cuadro 5 - Puntos relevados por el Ing. Torterola**.** Elaboración propia.

Cuadro 6 - Resultados obtenidos del software con el procesamiento original del Ing. Torterola.

Cuadro 7 - Selección aleatoria de puntos. Elaboración propia.

Cuadro 8 - Error medio cuadrático de 10 puntos de apoyo.

Cuadro 9 - Error medio cuadrático de los 7 puntos de apoyo.

Cuadro 10 - Error medio cuadrático de los 5 puntos de apoyo.

Cuadro 11 - Comparativo de los errores en los escenarios estudiados. Objetivo 1

Cuadro 12 - Puntos de Control.

Cuadro 13 - Variaciones de los Puntos de Control en escenario de 5 puntos de apoyo.

Cuadro 14 - Variaciones de los Puntos de Control en escenario de 7 puntos de apoyo.

Cuadro 15 - Variaciones de los Puntos de Control en escenario de 10 puntos de apoyo.

Cuadro 16 - Comparativo de los errores en los escenarios estudiados. Objetivo 2.

Cuadro 17 - Muestreos aleatorios de 10 puntos de apoyo.

Cuadro 18 - Errores y estadísticos de los 30 muestreos aleatorios de puntos de apoyo/control.

Cuadro 19 - Resultados del objetivo 1.

Cuadro 20 -Resultados del objetivo 2.

Cuadro 21 -Resultados del objetivo 3.

Cuadro 22 - Resultados del objetivo 3 sin outliers (10 y 12).

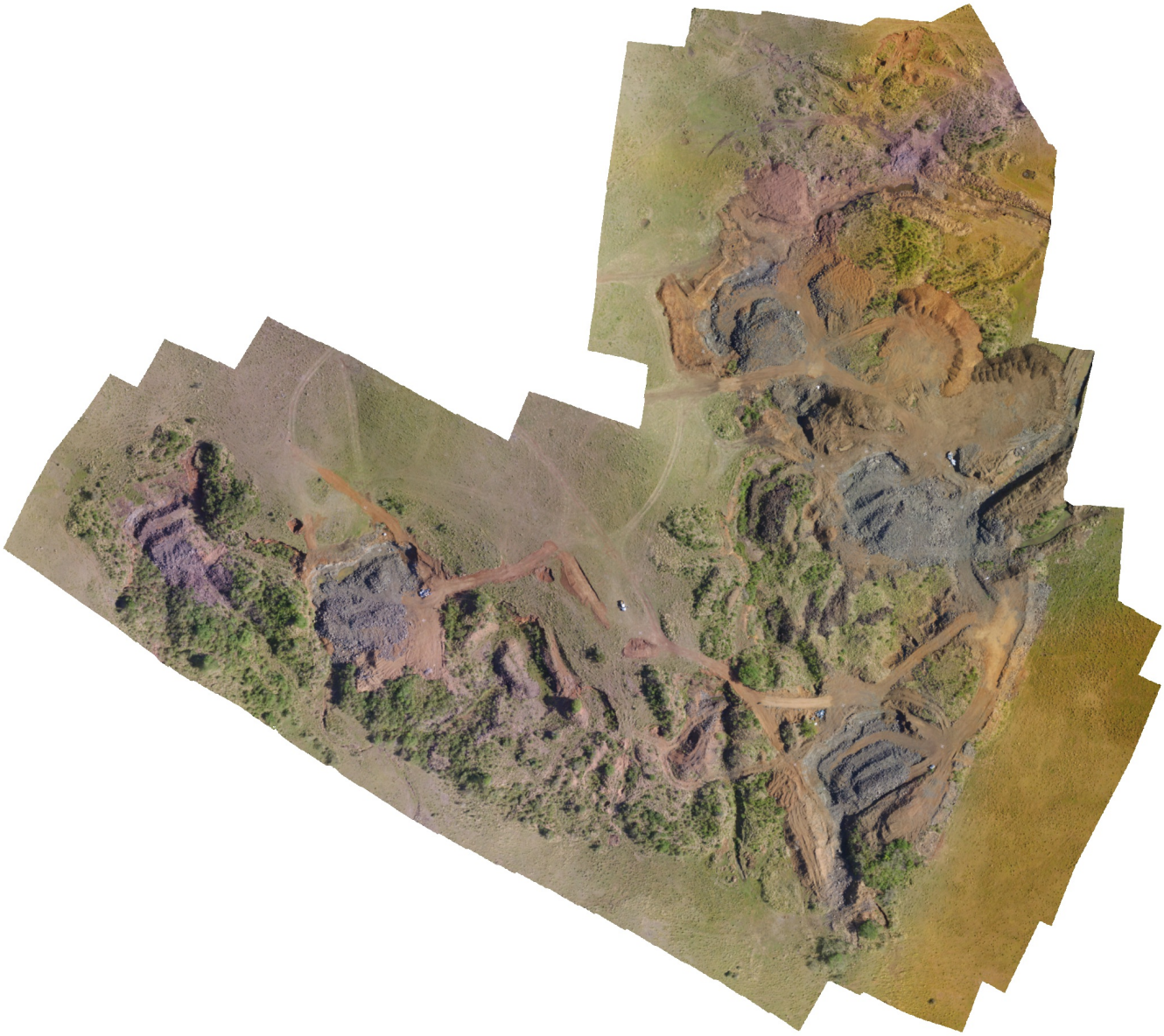
Cuadro 23 - Resultados objetivo 3 sin outliers (4, 10 y 12).

14. ANEXO

Modelo de informe resultante del software Agisoft Photoscan

Vuelo 4

Informe de procesamiento
Reprocesamiento con 10 puntos
30 octubre 2018



Datos del levantamiento

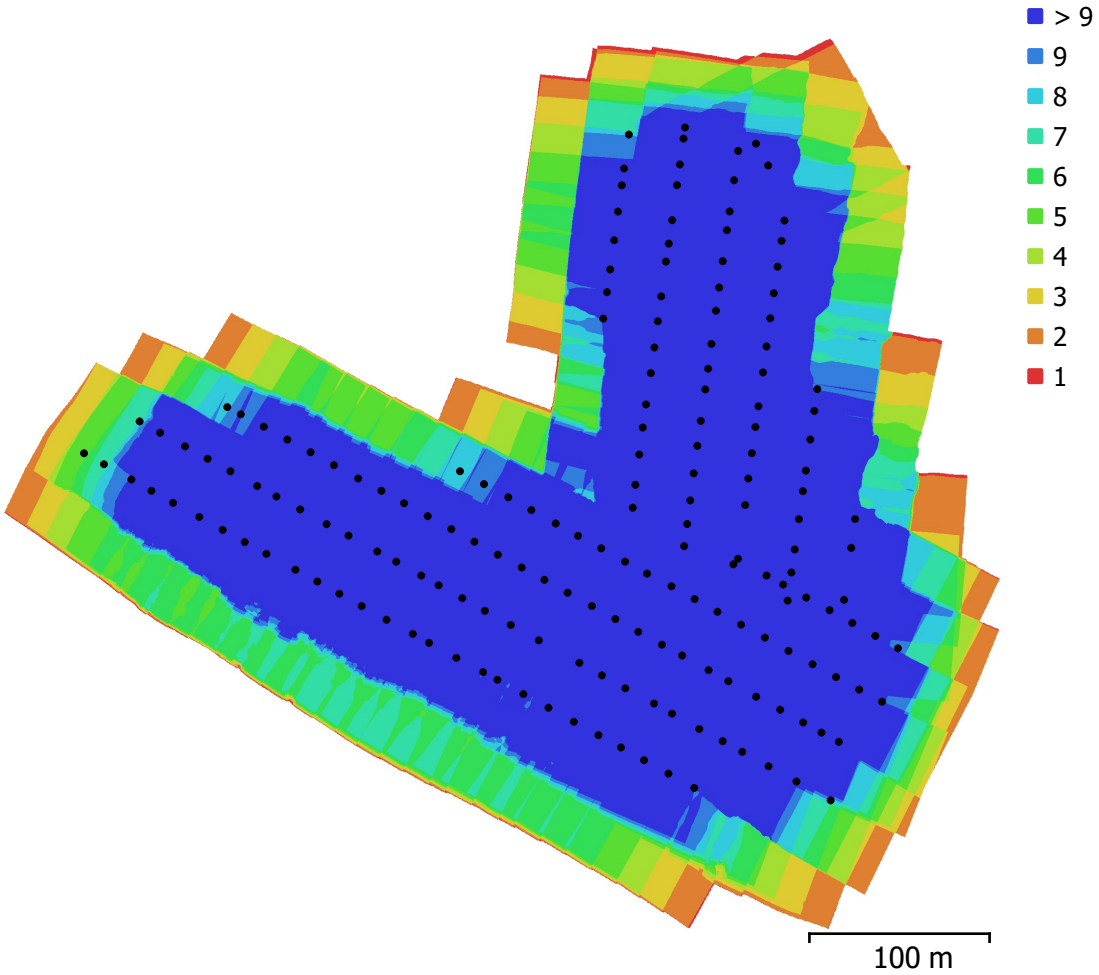


Fig. 1. Posiciónes de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes:	178	Posiciones de cámara:	178
Altitud media de vuelo:	77.1 m	Puntos de enlace:	110,210
Resolución en terreno:	2.9 cm/pix	Proyecciones:	657,227
Superficie cubierta:	0.152 km²	Error de reproyección:	1.27 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC300X (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

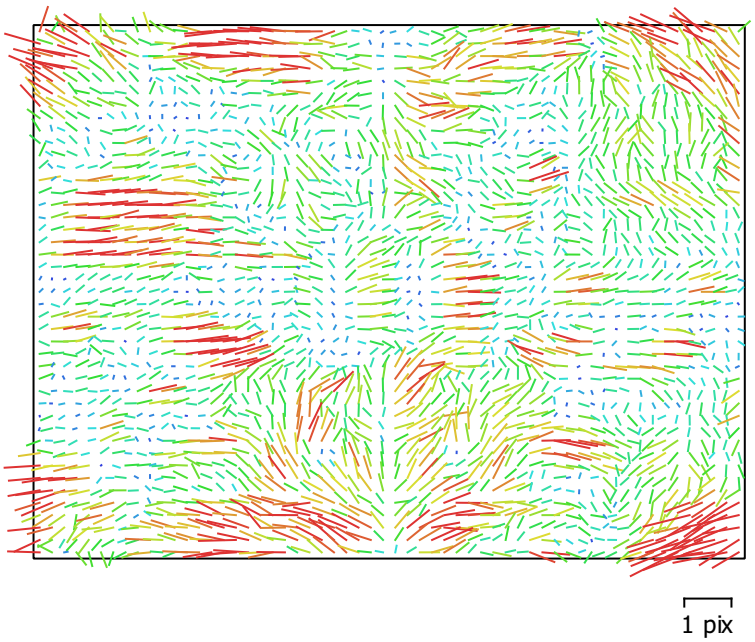


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC300X (3.61 mm).

FC300X (3.61 mm)

178 imágenes

Tipo	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
Cuadro	**4000 x 3000**	**3.61 mm**	**1.56 x 1.56 micras**

	Valor	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2	P3	P4
F	**2325.76**	0.2	1.00	0.05	0.01	-0.10	-0.01	-0.05	0.02	0.03	-0.05	-0.02	-0.03	-0.05	0.03
Cx	**-2.4947**	0.028		1.00	0.02	-0.04	-0.04	-0.05	0.04	-0.03	0.02	0.32	-0.00	-0.02	0.03
Cy	**-30.5654**	0.029			1.00	0.09	-0.04	0.01	-0.02	0.02	-0.02	0.01	0.29	0.02	-0.11
B1	**-5.98113**	0.01				1.00	-0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.01	0.01	0.03	0.02	-0.03
B2	**-0.926847**	0.01					1.00	0.02	-0.02	0.03	-0.03	0.02	-0.00	-0.01	0.01
K1	**-0.000544441**	7e-05						1.00	-0.97	0.93	-0.88	-0.01	-0.04	-0.05	0.06
K2	**-0.0237375**	0.00025							1.00	-0.99	0.96	0.01	0.04	0.06	-0.07
K3	**0.0519527**	0.00035								1.00	-0.99	-0.01	-0.04	-0.07	0.07
K4	**-0.0213073**	0.00016									1.00	0.02	0.05	0.08	-0.08
P1	**0.000288948**	4.8e-06										1.00	-0.09	-0.17	0.17
P2	**-0.00233369**	5.8e-06											1.00	0.72	-0.74
P3	**-0.907744**	0.0041												1.00	-0.98
P4	**0.233772**	0.0042													1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestres

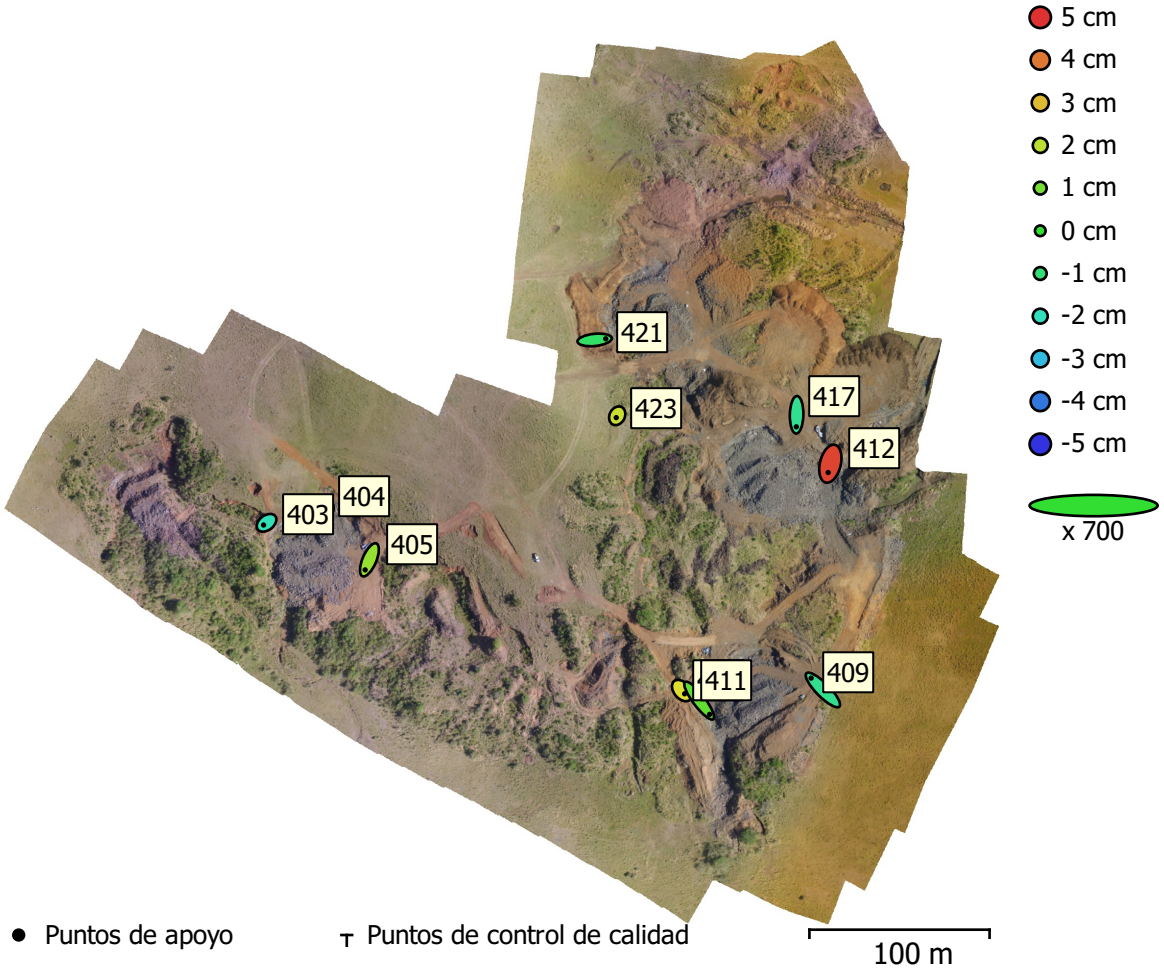


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
Posiciones estimadas de puntos de apoyo se indican con los puntos negros, puntos de control - con cruzamiento.

Número	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Total (cm)
10	1.01657	1.31255	2.13118	1.66019	2.70151

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

Nombre	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
403	-0.465288	-0.352965	-1.91296	2.00013	0.225 (18)
404	0.136861	-0.560857	-1.2049	1.33607	0.270 (20)
405	-0.679118	-1.59014	1.47565	2.27317	0.216 (18)
407	0.430226	-0.513968	2.5133	2.60114	0.383 (24)
409	-1.86127	1.88066	-1.32725	2.9602	0.207 (25)
411	1.65912	-2.18762	0.658306	2.82342	0.326 (23)
412	-0.346049	-1.39055	4.74608	4.95769	0.328 (14)
417	-0.0415771	-1.90245	-1.35285	2.33479	0.360 (17)
421	1.75791	0.179077	-0.716648	1.9068	0.268 (13)
423	-0.154903	-0.297578	2.17943	2.2051	0.313 (11)
Total	**1.01657**	**1.31255**	**2.13118**	**2.70151**	**0.295**

Tabla 4. Puntos de apoyo.

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

Modelo digital de elevaciones

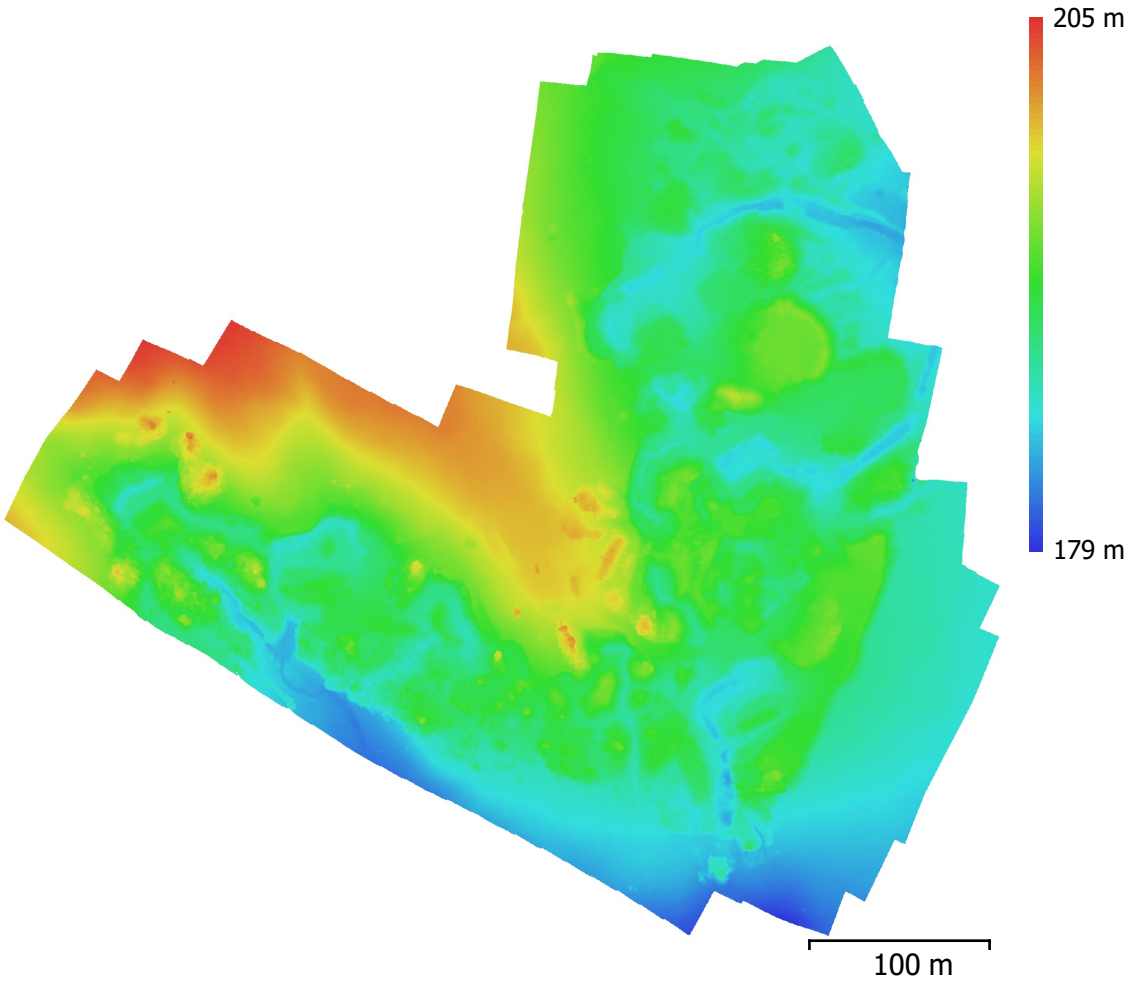


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución:	5.79 cm/pix
Densidad de puntos:	298 puntos/m²

Parámetros de procesamiento

Generales	
Cámaras	178
Cámaras orientadas	178
Marcadores	10
Formas	
Polilíneas	142
Polígonos	3009
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 21S (EPSG::32721)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo
Nube de puntos	
Puntos	110,210 de 119,023
Colores de puntos	3 bandas, uint8
RMS error de reproyección	0.194865 (1.26765 pix)
Error de reproyección máximo	1.13392 (35.978 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	6.10579 pix
Superposición efectiva	6.35037
Parámetros de orientación	
Precisión	Media
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	40,000
Puntos de enlace por foto	4,000
Filtrar puntos por máscaras	No
Adaptativo ajuste del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de puntos homólogos	7 minutos 12 segundos
Tiempo de orientación	1 minuto 13 segundos
Parámetros de optimización	
Parámetros	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p4
Tiempo de optimización	12 segundos
Nube de puntos densa	
Puntos	57,481,744
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Calidad	Alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Tiempo de generación de mapas de profundidad	19 horas 45 minutos
Tiempo de generación de nube de puntos densa	4 horas 10 minutos
Modelo	
Caras	887,059
Vértices	446,232
Colores de vértices	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Tipo de superficie	Bajorrelieve / terreno
Datos fuente	Densa
Interpolación	Habilitada
Calidad	Media
Filtrado de profundidad	Agresivo
Número de caras	912,451
Duración del procesamiento	24 segundos
DEM	
Tamaño	11,258 x 9,179
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 21S (EPSG::32721)
Parámetros de reconstrucción	
Datos fuente	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada

Duración del procesamiento	8 minutos 26 segundos
Ortomosaico	
Tamaño	19,217 x 16,929
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 21S (EPSG::32721)
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Duración del procesamiento	17 minutos 52 segundos
Software	
Versión	1.4.1 build 5925
Plataforma	Windows 64