

Fotogrametría Digital con Sistemas Aéreos no Tripulados

para el Análisis de Sistemas Agroforestales

Tutorial

En esta guía se introduce al uso de sistemas aéreos no tripulados equipados con cámaras digitales RGB. Se discute la programación de misiones fotogramétricas automatizadas y el flujo de procesamiento digital para la generación de productos fotogramétricos tales como nubes de puntos, ortomosaicos y modelos de elevación digital, enfocado al análisis de sistemas agroforestales. Las misiones autónomas de vuelo se ejemplifican a través de la aplicación *DJI Ground Station Pro 2.0* y el flujo procesamiento de las imágenes con la herramienta de software *Agisoft Metashape Professional 1.7.3*.

Renato Rimolo Donadio
Sergio Arriola Valverde
Jorge Umaña Soto
Arlene López-Sampson
Norvin Sepúlveda
Luis Carlos Villalobos Avellán
Juan Carlos Monge Mora
Eduardo Somarriba

CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2021

V1.0, julio 2021

Fotogrametría Digital con Sistemas Aéreos no Tripulados

para el Análisis de Sistemas Agroforestales

Tutorial

En esta guía se introduce al uso de sistemas aéreos no tripulados equipados con cámaras digitales RGB. Se discute la programación de misiones fotogramétricas automatizadas y el flujo de procesamiento digital para la generación de productos fotogramétricos tales como nubes de puntos, ortomosaicos y modelos de elevación digital, enfocado al análisis de sistemas agroforestales. Las misiones autónomas de vuelo se ejemplifican a través de la aplicación *DJI Ground Station Pro 2.0* y el flujo procesamiento de las imágenes con la herramienta de software *Agisoft Metashape Professional 1.7.3*.

Renato Rimolo Donadio
Sergio Arriola Valverde
Jorge Umaña Soto
Arlene López-Sampson
Norvin Sepúlveda
Luis Carlos Villalobos Avellán
Juan Carlos Monge Mora
Eduardo Somarriba

CATIE no asume la responsabilidad por las opiniones y afirmaciones expresadas por los autores en las páginas de este documento. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de la institución. Se autoriza la reproducción parcial o total de la información contenida en este documento, siempre y cuando se cite la fuente.

ISBN XXX-XXXX-XX-XXX-X

XXX.XX
XXXX

Fotogrametría Digital con Sistemas Aéreos no Tripulados, para el Análisis de Sistemas Agroforestales. Tutorial / Renato Rimolo Donadio ... [et al.] - 1ª Ed. – Turrialba, C. R. CATIE, 2021. XX p. – (Serie técnica. Manual técnico / CATIE; no. XXX.

ISBN

1. Sensores Remotos
 2. Agroforestería
 3. Fotogrametría Digital
 4. Levantamiento fotogramétrico
 5. Sistemas Aéreos no Tripulados.
- I. Rimolo Donadio, Renato II. Arriola Valverde, Sergio III. Umaña Soto, Jorge IV. López-Sampson, Arlene IV. Sepulveda, Norvin V. Villalobos Avellán, Luis Carlos VI. Monge Mora, Juan Carlos VII. Somarriba, Eduardo.

Créditos

Tabla de Contenidos

| | |
|--|----|
| Glosario..... | 5 |
| 1. Introducción | 7 |
| 2. Realización de Levantamientos Fotogramétricos | 8 |
| 3. Puntos de Control en Tierra | 17 |
| 4. Flujo de Procesamiento para Fotogrametría Digital..... | 20 |
| 4.1. Carga y preprocesamiento de imágenes fotogramétricas..... | 20 |
| 4.2. Orientación de las imágenes | 25 |
| 4.3. Utilización de puntos de control | 29 |
| 4.4. Filtrado de la nube rala de puntos mediante selección gradual..... | 34 |
| 4.5. Generación de la nube densa de puntos | 38 |
| 4.6. Creación de Modelos de Elevación Digital y Ortomosaicos | 39 |
| 4.7. Creación de Modelos de Elevación del Terreno | 46 |
| 5. Introducción al posprocesamiento de productos fotogramétricos con QGIS | 50 |
| Agradecimientos | 55 |
| Bibliografía..... | 56 |
| Apéndices | 58 |
| A.1. Instalación y configuración del software fotogramétrico Agisoft Metashape | 58 |
| A.2. Guía de instalación del Software QGIS..... | 64 |

Glosario

| | |
|--|--|
| Formato ráster | Tipo de archivo en el que el modelo de almacenamiento digital de datos se define como una cuadrícula de píxeles regulares asociados con una referenciación espacial. |
| Formato vectorial | Tipo de archivo en el que el modelo de almacenamiento digital de datos geoespaciales se define en términos de formas o líneas descritas por sus coordenadas |
| Fotogrametría | Conjunto de técnicas para la obtención de nubes de puntos, mapas o modelos de elevación digital de extensiones grandes de terreno a partir de fotografías aéreas. |
| gimbal | Término utilizado para describir el estabilizador mecánico de las cámaras, el cual permite mantener la posición de la misma fija en presencia de vibraciones o movimientos externos. |
| Imagen RGB | Imagen digital representada por píxeles, donde cada uno de ellos se describe en términos de las componentes de color rojo, verde y azul (R: red, G: green, B: blue). |
| Modelo digital de elevación (<i>Digital Elevation Model, DEM</i>) | Modelos de las alturas de una zona geográfica, expresada en función de sus coordenadas espaciales. |
| Modelo digital de elevación del terreno (<i>Digital Terrain Model, DTM</i>) | Modelo de alturas que contiene únicamente información del nivel de tierra o de suelo. |
| Nube de puntos dispersa (o rala) | Conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional que representan una escena. La nube dispersa es el producto de la orientación de imágenes en el proceso fotogramétrico. |
| Nube de puntos densa | Modelo de nube de puntos detallado que se deriva del set de imágenes y la nube dispersa en el proceso fotogramétrico. |
| Ortomosaico, Ortomapa | Mosaico de imágenes aéreas combinadas y corregidas como una proyección plana con calidad cartográfica. |

Puntos de control en tierra (Ground Control Points, GCPs)

Puntos de referencia posicionados y medidos en la escena con el fin de mejorar la precisión de la georreferenciación en el proceso fotogramétrico.

Puntos clave (keypoints)

Puntos en las imágenes identificados como característicos. Se utilizan para enlazar las imágenes en el proceso fotogramétrico.

Puntos de paso o enlace (matched points)

Par de puntos pertenecientes a diferentes imágenes que se identifican como puntos coincidentes. Este conjunto de puntos se utiliza para crear la nube de puntos dispersa en el proceso fotogramétrico.

Selección gradual

Proceso mediante el cual se seleccionan puntos de la nube de puntos bajo algún criterio, con el fin de aplicar operaciones como eliminación, clasificación, etc.

Sistemas de información geográfica (SIG), (Geographical Information Systems, GIS)

Sistemas de información digital para el manejo de datos geoespaciales.

Sistema aéreo no tripulado (SANT), (unmanned aircraft system, UAS)

Sistema aéreo controlado a distancia, capaz de transportar sensores tales como cámaras o escáneres, con capacidades de vuelo autónomo y georreferenciación de los datos adquiridos.

Vehículo aéreo no tripulado (VANT), (unmanned aerial vehicle, UAV)

Sistema aéreo controlado a distancia, también conocido como RPAS (del inglés, *Remotely Piloted Aircraft System*) o más coloquialmente como dron.

Visión por computadora

Conjunto de técnicas computacionales que permiten adquirir, procesar y analizar imágenes.

1. Introducción

Durante la última década, tecnologías de sistemas aéreos no tripulados (*Unmanned Aircraft Systems*, UAS), en ocasiones nombrados como vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) o simplemente como drones, han evolucionado de una forma acelerada y su utilización se ha extendido a muy diversas aplicaciones tales como agricultura de precisión, conservación, vigilancia, planificación urbana, e.g. [1]-[2]. Estas aeronaves, aunque tienen una autonomía limitada, poseen la ventaja de ser relativamente fáciles de transportar y operar, permitiendo incursiones precisas en áreas no muy extensas.

En paralelo, las técnicas fotogramétricas se han transformado con la popularización de la fotografía digital, sistemas de posicionamiento global y algoritmos de visión por computadora [3]. A través de estas técnicas y junto a la tecnología UAS, es posible recopilar datos e imágenes con altas resoluciones espaciales y temporales, que a la vez permiten generar modelos de áreas abiertas de alta calidad, georreferenciados, en dos y tres dimensiones.

El proceso fotogramétrico en general consiste en tomar imágenes traslapadas a través de una plataforma UAS, las cuales son combinadas y proyectadas en un espacio tridimensional en la forma de nubes de puntos [4]-[5]. A partir de estas nubes de puntos se derivan otros productos fotogramétricos tales como modelos de elevación digital y ortomosaicos, sobre los cuales es posible hacer mediciones de distancias, áreas o volúmenes con buena precisión.

Este acercamiento de fotogrametría digital se utiliza actualmente en muchas y muy diversas aplicaciones, como, por ejemplo, la detección de cambios geomorfológicos [6] y monitorización de la erosión [7]-[8], análisis de sistemas agroforestales y agricultura de precisión [9]-[11], entre muchas otras.

En esta guía tutorial se revisa el procedimiento para realizar un levantamiento de imágenes desde una plataforma UAS con cámara digital en banda visible (RGB), la estrategia para la definición de puntos de control, y el procesamiento fotogramétrico de las imágenes con la información de posicionamiento, para lograr productos fotogramétricos de alta resolución y buena calidad, orientados al análisis de sistemas agroforestales. Para la programación de los levantamientos se utiliza la aplicación *DJI Ground Station Pro* [12], y para el procesamiento fotogramétrico el software *Agisoft Metashape Professional* [13].

2. Realización de Levantamientos Fotogramétricos

Los levantamientos fotogramétricos se implementan con misiones de vuelo automatizadas, dimensionadas para cubrir una cierta extensión de terreno a una resolución espacial en tierra determinada (también llamada distancia de muestreo en tierra, de las siglas en inglés *Ground Sampling Distance*, GSD). En fotogrametría digital, la resolución alcanzable depende de la altura de vuelo y las características del sensor de imagen, la cual se puede aproximar de manera sencilla con la siguiente relación [8]:

$$GSD = \frac{100 \cdot S \cdot h}{f \cdot l_w}, \quad (1)$$

donde h representa la altura de vuelo en metros, f es la distancia focal del sensor de imagen en milímetros, l_w corresponde a la resolución del sensor en píxeles, y S es el tamaño del sensor en milímetros.

Las imágenes deben tener suficiente traslape, usualmente superiores al 70% en imágenes adyacentes, para que posteriormente puedan ser identificadas las coincidencias entre las mismas y de esta forma los algoritmos fotogramétricos puedan proyectar las diferentes vistas exitosamente. En panoramas con vegetación densa, se recomienda aumentar el traslape sobre 80% o incluso 90% dependiendo de las condiciones, ya que algorítmicamente es más complejo la identificación de los puntos coincidentes entre imágenes.

En este trabajo se ejemplifica el proceso con la aplicación para sistema operativo *IOS* en dispositivos móviles, *Ground Station Pro* (GSP) [14], que permite la configuración de misiones automatizadas con plataformas del fabricante *DJI*. Las misiones se configuraron con una altura fija en metros con respecto al punto de despegue, según las condiciones del sitio, con trayectorias rectilíneas y la cámara orientada a -90 grados dirigida perpendicularmente sobre la superficie para los levantamientos en *dos dimensiones* (2D). Es posible también realizar levantamientos en *tres dimensiones* (3D), donde la vista perpendicular se sustituye o complementa con tomas oblicuas con la cámara orientada a ángulos típicamente entre -60 a -45 grados.

Con la aplicación instalada en una tableta, el procedimiento para la configuración de las misiones en GSP se muestra a continuación. Primero, se debe crear la misión (Figura 1), para lo cual se selecciona *Mis Misiones*, se agrega una nueva misión presionando el botón azul con el signo '+' y se especifica el tipo de misión. La misión puede definirse como 2D (mapa de fotos) o 3D (mapa de área tridimensional), seguido de la definición del polígono con el sitio que se desea levantar, el cual se puede definir en el mapa que aparece en pantalla (Figura 2). La diferencia entre una misión 2D y 3D en la aplicación radica en poder modificar el ángulo de toma de la cámara para el caso de misiones 3D. Las misiones pueden

ser salvadas, son editables y se pueden copiar al deslizar la barra con el nombre de la misión hacia la izquierda desde el menú de *Mis Misiones*.

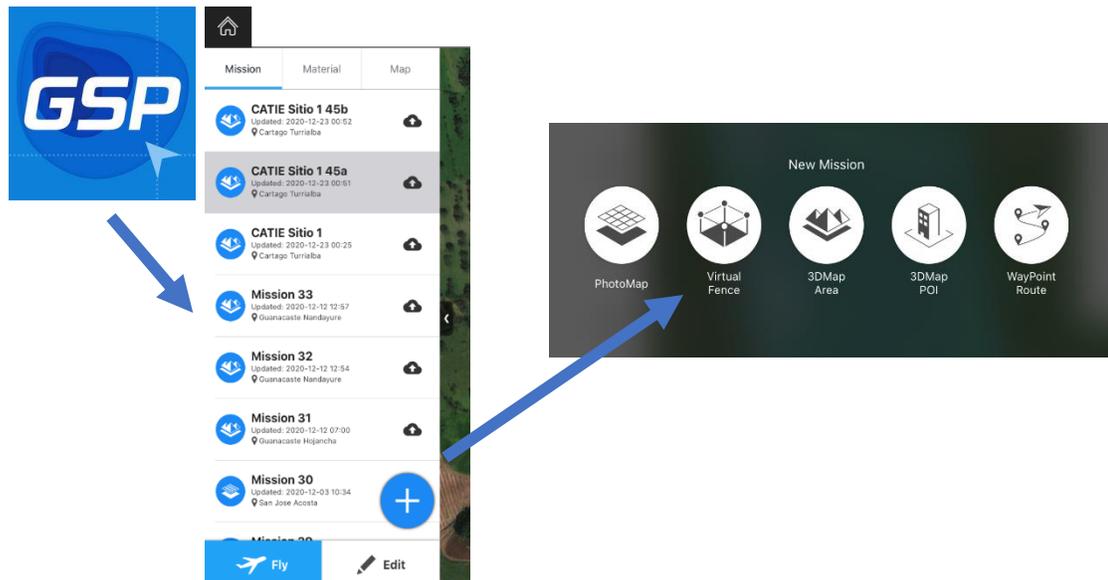


Figura 1. Ilustración sobre el proceso de creación de nueva misión con la aplicación DJI GSP.

Si la plataforma UAS está conectada a la aplicación al momento de programar la misión, la identificación del sensor de imagen y la ubicación en el mapa del dron y el control remoto deben aparecer automáticamente. De lo contrario, el estado aparece como desconectado y el tipo de sensor y ubicación base se deben seleccionar manualmente. Se considera buena práctica preprogramar las misiones antes de llegar al sitio, como un primer acercamiento para estimar el área a sobrevolar, los parámetros base de la misión, y que de esta forma sea posible únicamente llegar a hacer ajustes al sitio. Como la conectividad a internet en campo puede ser limitada, es deseable contar con los mapas de la zona precargados en la aplicación.

La Figura 2 muestra la vista de una misión, con el polígono de sobrevuelo definido (polígono azul) y la ruta de vuelo sugerida (líneas verdes dentro del polígono). Esta área es configurable, los círculos blancos que definen el polígono pueden ser movidos, eliminados o agregados, según convenga. El menú de configuración a la derecha permite definir los parámetros de la misión y el mismo contiene dos pestañas, una de configuración básica y otra de avanzada, más un carrusel en la parte superior que permite visualizar las estadísticas estimadas.

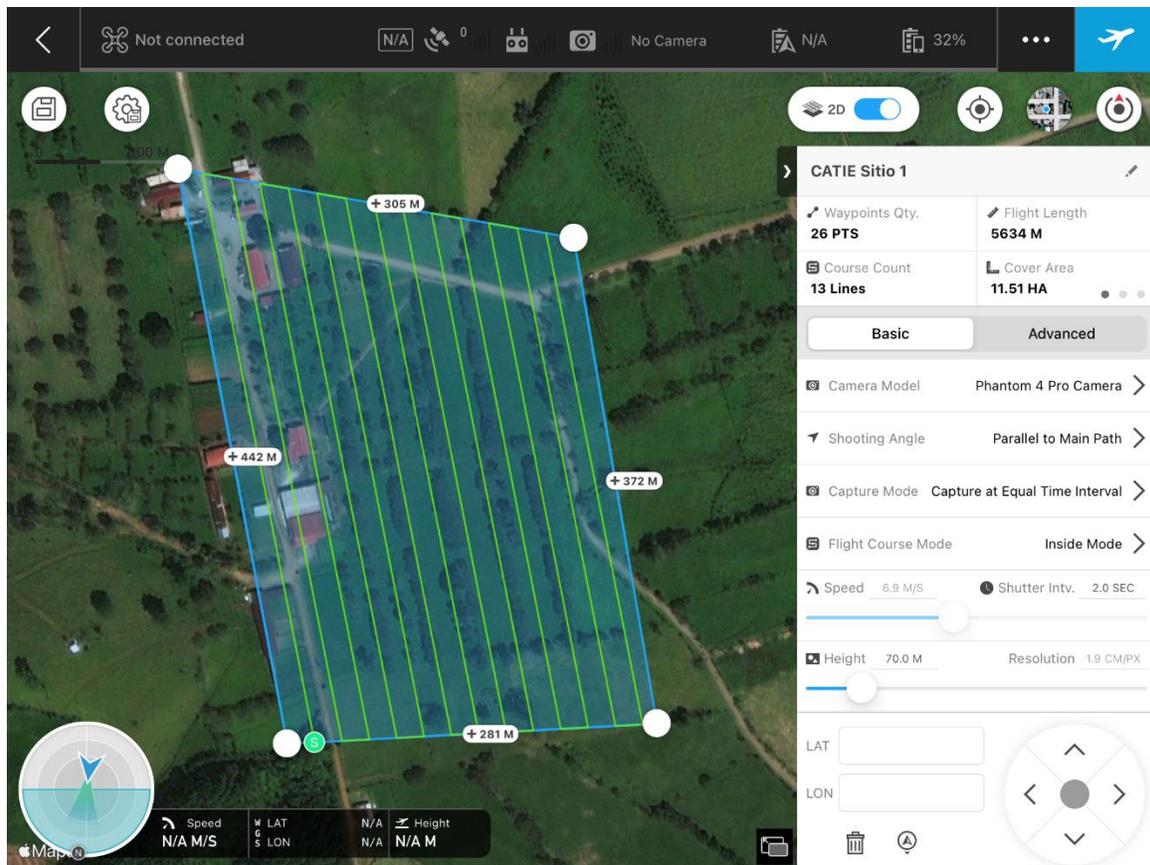


Figura 2. Captura de misión en GSP con el menú de configuración básico desplegado. En la zona del mapa se observa en azul el polígono de sobrevuelo y con la línea verde la ruta de vuelo definida.

La pestaña de configuración básica, mostrada en la Figura 2, con la configuración recomendada, permite especificar el tipo de sensor de imagen, el ángulo de disparo con respecto a la trayectoria, el modo de captura y el modo de ruta. Con las barras deslizantes o vía teclado, es posible especificar la velocidad de vuelo y la altura de vuelo medida desde el punto de despegue, a partir de los cuales se estima el intervalo de disparo de la cámara y la resolución espacial. En la parte superior se muestran algunos parámetros importantes, como el número de cambios de trayectoria (*waypoints*), el número de líneas de vuelo, la distancia recorrida en vuelo, y el área recorrida. Si esta sección se desliza, aparecen otros parámetros como el tiempo de vuelo estimado, cantidad de baterías requeridas, número estimado de imágenes e intervalos de imagen (Figura 3). En la parte inferior del menú es posible especificar una ubicación en términos de sus coordenadas, y los botones que se visualizan en el mapa, sobre el menú, permiten configurar la vista del mapa, el cual se puede orientar a gusto con el control táctil.

El modo de captura en particular hace una gran diferencia en la ejecución de la misión. En el modo flotante (*hover*), el dron se detiene al momento de tomar cada imagen. Esto es deseable desde el punto de vista de prevenir fotos borrosas, sin embargo, limita de forma drástica la autonomía de la aeronave y por tanto el área que se puede cubrir. Por esta limitante, los modos de captura mientras la aeronave se desplaza son normalmente más convenientes, siendo posible obtener imágenes de buena calidad siempre y cuando la configuración de la cámara sea la adecuada.

El menú de configuración avanzada y los parámetros recomendados, que se muestra en la Figura 3, permite definir los porcentajes de traslape frontal y lateral; con respecto a las líneas de vuelo, el ángulo de la ruta de vuelo dentro del polígono, el margen en metros desde el borde del polígono y el ángulo de la cámara cuando la misión seleccionada es 3D, desde la referencia 0 con la cámara viendo al frente, hasta -90 grados con la cámara viendo hacia abajo.

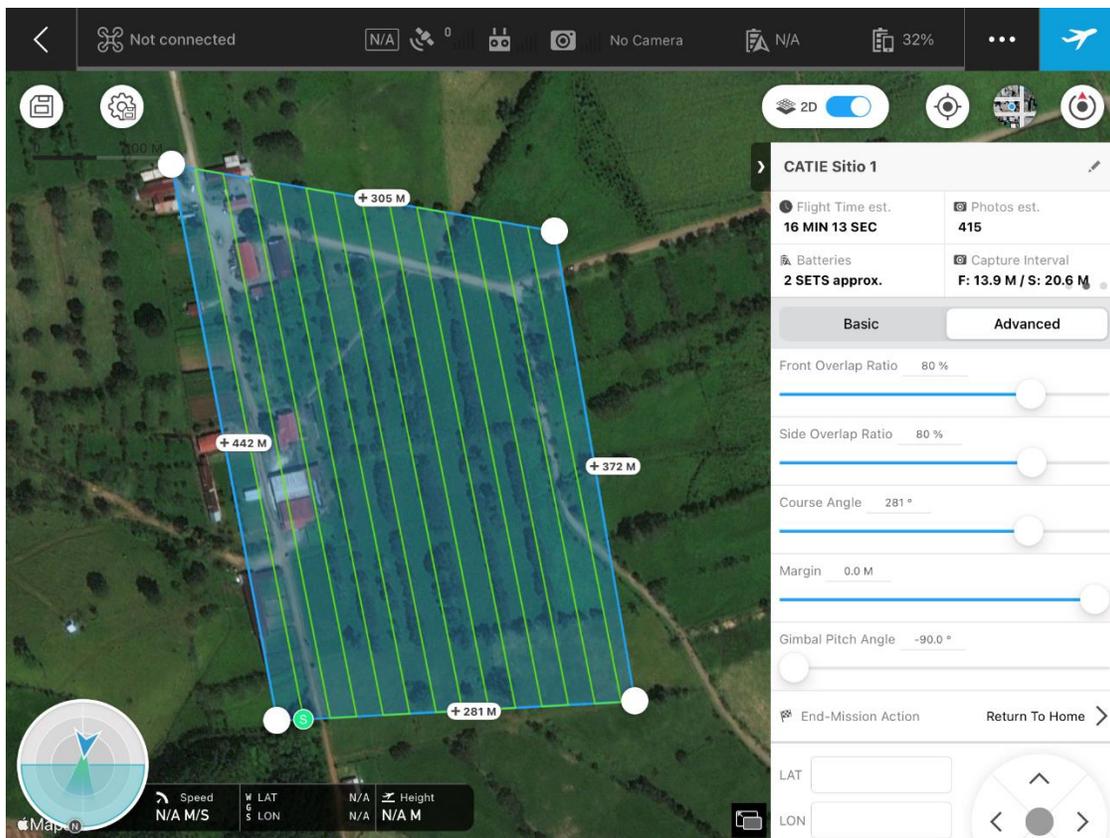


Figura 3. Captura de misión en GSP con el menú de configuración avanzado desplegado.

Se recomienda que, en presencia de vegetación abundante, los parámetros de traslape estén sobre 80%, tanto frontal como lateral, respectivamente, lo que brinda un margen seguro en caso de que algunas imágenes no resulten utilizables. La orientación de la cámara es de -90 grados para levantamientos 2D, pero para levantamientos tridimensionales, como se mencionó anteriormente, el ángulo puede variar.

Aunque la aplicación tiene la funcionalidad para realizar misiones en las que se requieran varias cargas de batería, para este trabajo se dimensionan las misiones para que se pudieran realizar con una sola carga, lo cual se considera más seguro. Los tiempos de misión efectivos varían según la distancia con respecto al punto de despegue y el sistema UAS que se esté utilizando, pero usualmente el tiempo máximo de vuelo oscila entre 15 a 20 minutos por carga de batería. Siempre se debe contemplar el tiempo requerido en las maniobras de despegue y aterrizaje, así como el punto de inicio y final de la misión con relación a la posición de despegue y aterrizaje. Es importante registrar la altitud del punto de despegue, ya que luego puede ser necesario hacer una corrección en el procesamiento fotogramétrico.

En el caso de los levantamientos 3D, se recomienda realizar trayectorias de vuelo perpendiculares entre sí, dentro del mismo polígono, variando la posición de la cámara [15]. Este acercamiento permite tener mayor riqueza espacial en el modelo fotogramétrico tridimensional una vez que se procesan las imágenes. La reconstrucción 3D va a ser tan detallada como la información en las fotografías lo permita, con lo cual se mejora el detalle tridimensional entre más imágenes con diferentes perspectivas se tenga, al costo de que más imágenes demandan más recursos de cómputo y tiempo durante el procesamiento fotogramétrico.

A continuación, se ejemplifica un caso de misión 3D en el que se realizan dos recorridos complementarios a la misión 2D base, para recorrer el mismo sitio con la cámara orientada a -45 grados. La ruta de vuelo se define perpendicularmente con respecto a la ruta de la misión 2D, buscando cubrir las perspectivas laterales con respecto a las líneas principales de árboles. En la Figura 4 se muestra una vista de estas dos misiones complementarias, derivadas de la misión 2D mostrada en las Figuras 2 y 3, en las cuales se varía únicamente el ángulo del recorrido y se define un ángulo del *gimbal*, o estabilizador de la cámara, a -45 grados con respecto a la misión base.

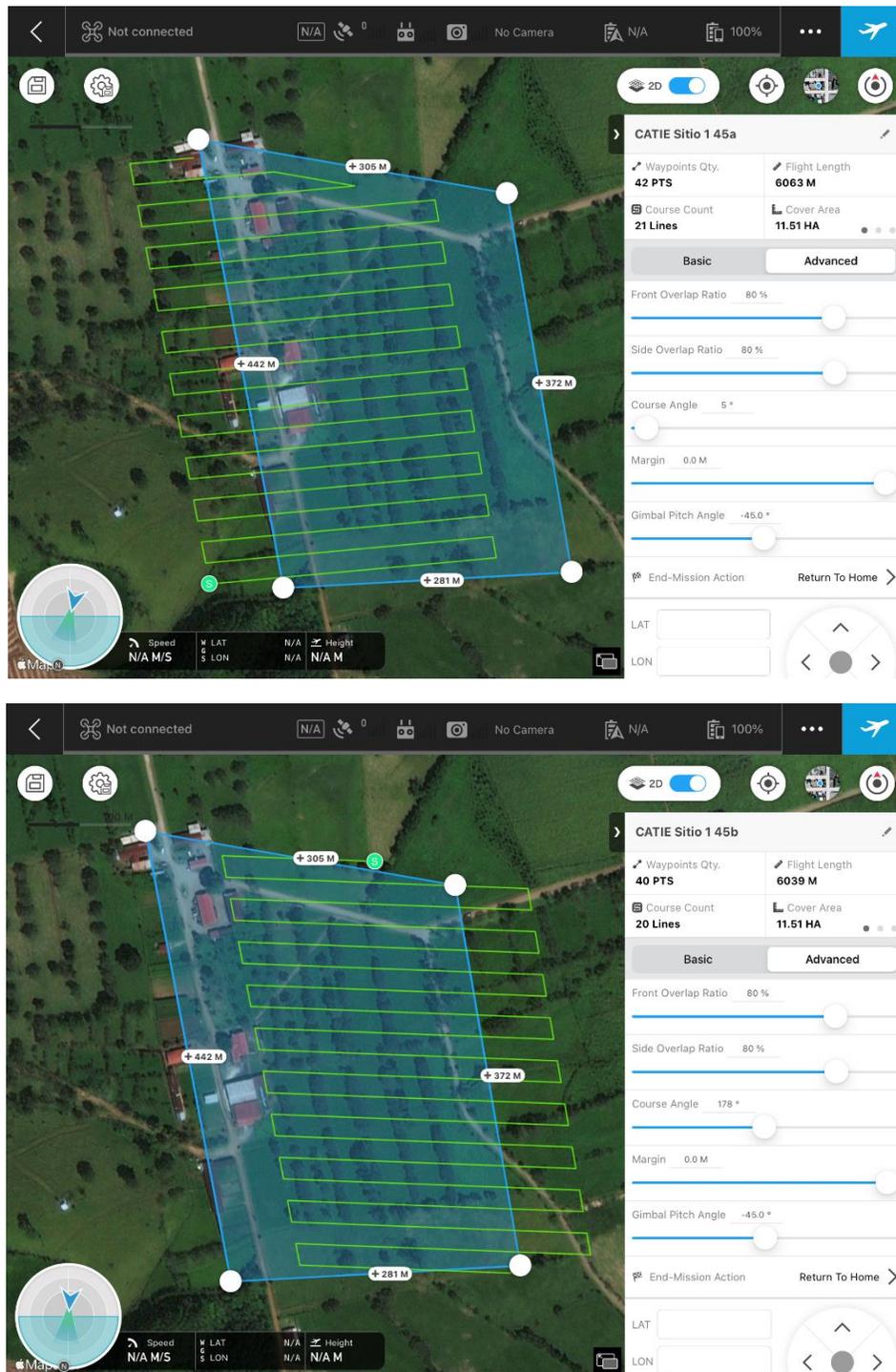


Figura 4. Misiones complementarias para los levantamientos 3D, considerando dos recorridos perpendiculares con respecto a la misión base, con la cámara a un ángulo de -45 grados. En la imagen superior se define un ángulo de la ruta de 5° para captar vistas oblicuas orientadas en dirección este-oeste, mientras que en la imagen inferior el ángulo es 178° para orientar las vistas en dirección oeste-este.

Una vez configurada la misión, su ejecución se realiza presionado el botón azul en la esquina superior derecha, confirmando su ejecución luego del proceso de revisión prevuelo del estado de la plataforma UAS a nivel de la aplicación. La aplicación además brinda información en la barra superior sobre el estado de la aeronave, disponibilidad de satélites y estado de la batería, la cual debe ser verificada antes de iniciar la misión (Figura 5).

Es importante cerciorarse de que las condiciones de vuelo son adecuadas, que la plataforma del dron está en buenas condiciones de vuelo, y que la misión contempla obstáculos presentes en el sitio de estudio tales como estructuras, torres o líneas de distribución de energía. Se recomienda que las personas a cargo de la misión tengan experiencia en el manejo de las plataformas y aplicaciones, y que se mantenga la atención en el desarrollo de la misión en caso de que haya que realizar una intervención manual de la misma si se presenta algún imprevisto.

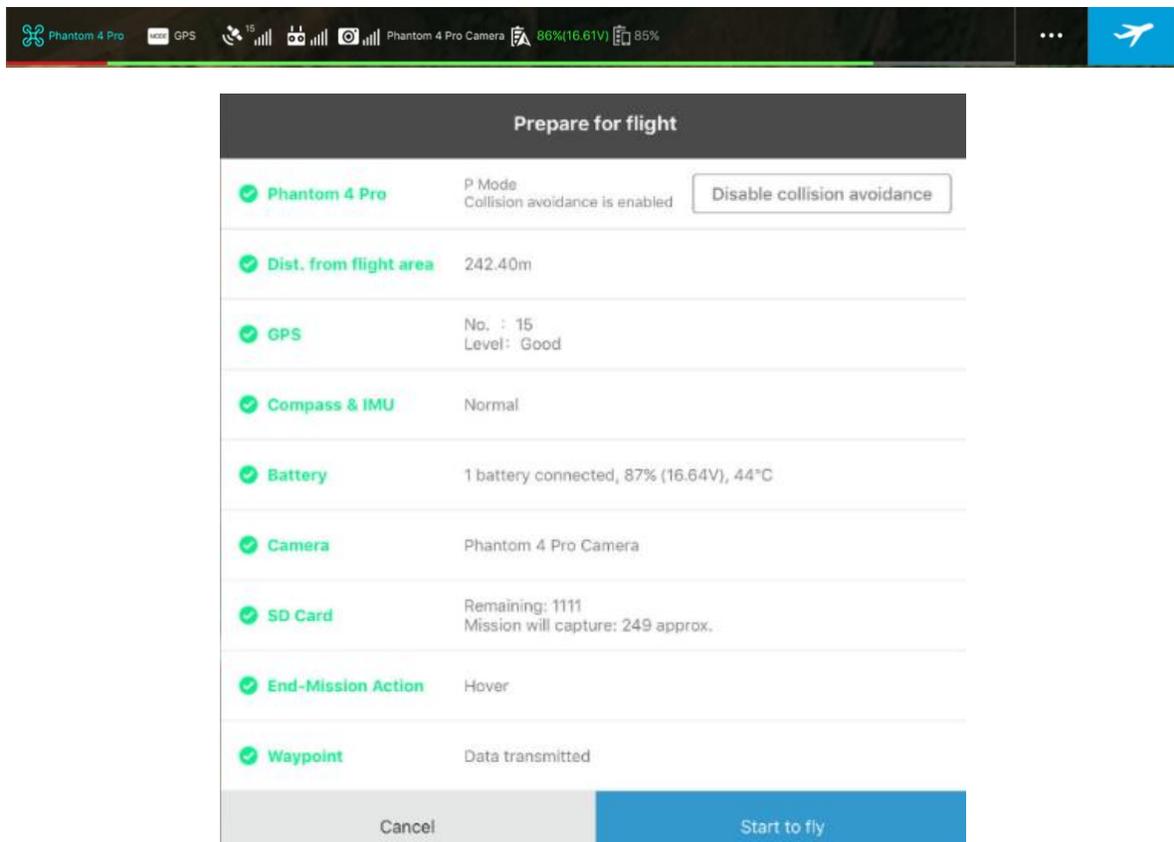


Figura 5. Barra de estado y revisión del estado de la plataforma UAS, previo a la ejecución de la misión.

El seguimiento del recorrido y progreso de la misión, así como las imágenes adquiridas se pueden monitorear con la aplicación, siendo posible cancelar o interrumpir la misión en caso requerido. El control manual puede ser recuperado al cambiar al modo de vista de la cámara, presionando el icono del dron o los controles en el recuadro de imagen, según corresponda.

Un aspecto importante que considerar previo a la ejecución de las misiones es la configuración de la cámara. La configuración automática puede llegar a ser problemática si durante la misión las condiciones de iluminación son inestables y los parámetros de la cámara están variando en respuesta a estos cambios. Normalmente, los parámetros de la cámara en modo automático van a variar de todas formas conforme el objetivo en la imagen cambia, y esto puede dificultar las correcciones y la ubicación de puntos de coincidencia durante el procesamiento fotogramétrico. Por esta razón, se recomienda ajustar la cámara previamente a la realización del vuelo y mantener una configuración fija durante el desarrollo de la misión. Aunque las imágenes resulten ligeramente sobre o subexpuestas, posteriormente es más sencillo aplicar correcciones al grupo de fotografías de forma general.

Para configurar la cámara se debe presionar, con la plataforma UAS conectada, el recuadro de imagen, y en la lista de iconos en el borde derecho de la pantalla, el botón de configuración (Figura 6). Se debe ajustar el parámetro ISO, la velocidad de obturación (*shutter*) y la apertura del lente (*F#*), buscando que el parámetro de exposición (*EV*) ronde un valor cercano a 0, lo que indica una exposición adecuada. Se debe considerar una distancia focal adecuada y un tiempo de obturación suficientemente rápido para evitar que las imágenes resulten con pobre definición o desenfocadas. Este proceso se puede ajustar en tierra y realizar un ajuste fino en aire, mientras el dron recorre el camino para iniciar la misión, en los cuales el cuadro de imagen es normalmente representativo de las tomas a desarrollar durante el recorrido programado. Valores de velocidad de obturación alrededor de 1/1000, números focales altos, superiores a 4 y valores de ISO entre 200 y 800 brindan usualmente un rango adecuado con condiciones de iluminación exterior durante el día. Sin embargo, se debe tener siempre presente que los parámetros dependen del objetivo y las condiciones de luz existentes.

En la Figura 6 se observa además la barra inferior a la barra de estado, que muestra la configuración de la cámara y espacio disponible en la tarjeta de memoria instalada. El círculo y barra en la esquina inferior izquierda muestran la orientación y estado de la telemetría de la plataforma UAS.

Mayores detalles sobre la configuración y funcionalidades de la aplicación GSP se pueden encontrar en [14].

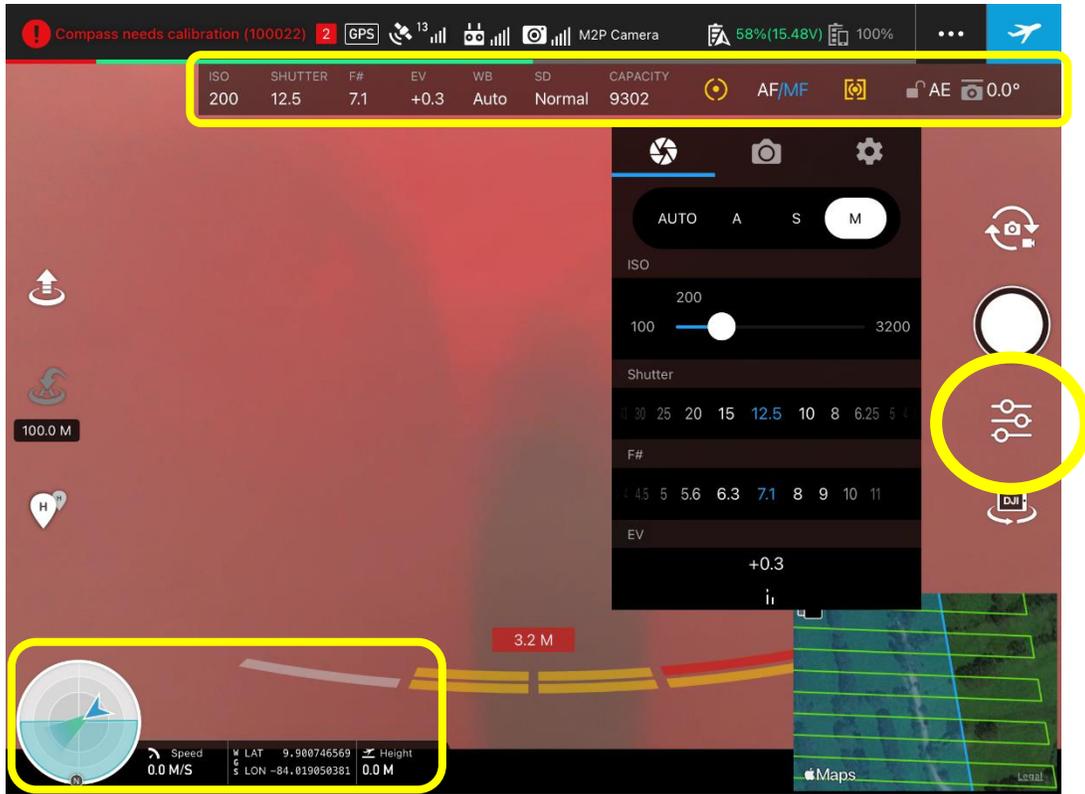


Figura 6. Vista de cámara en la aplicación GSP, con el menú de configuración de la cámara desplegado y configurado en modo manual.

3. Puntos de Control en Tierra

A pesar de que las imágenes tomadas con plataformas UAS modernas están georreferenciadas, la mayoría de los drones de bajo costo aún poseen receptores GPS de frecuencia sencilla, lo cual resulta en errores de posicionamiento relativamente grandes (de varios metros). Aunque se cuente con un receptor GNSS a bordo de mejor precisión, como receptores de doble frecuencia o RTK, la utilización de puntos en tierra es en muchos casos necesaria para mejorar la precisión en la georreferenciación. Los puntos de control en tierra permiten reducir errores posicionales y geométricos en las reconstrucciones fotogramétricas, al establecer una base de referencia y cálculo del error que puede llegar a ser muy precisa (en el orden de centímetros o inclusive milímetros) [18].

Para definir puntos de control primero se instalan las marcas en el terreno. Existen diversas alternativas, como el utilizar elementos de referencia fáciles de identificar desde el aire, o por ejemplo, estacas u otras marcas. Si se requiere que los puntos se mantengan en el tiempo se pueden instalar mojones con chapas metálicas. Otra alternativa de bajo costo es la utilización de tubos metálicos enterrados con concreto, con un tornillo en la parte superior para definir la referencia.

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de colocación y toma de puntos de control realizado en La Vega de San Carlos, Costa Rica. Los tubos sobresalen 10 cm sobre el perfil del terreno para poder instalar los marcadores posteriormente. Sobre el tornillo se coloca el receptor GPS para medir la posición del punto. En este caso se instalaron 5 puntos para referenciar un área de aproximadamente 15 hectáreas, los cuales fueron tomados con una estación GNSS Geomax Zenith 25 Pro [17]. Este equipo está conformado por un receptor base y uno móvil (*rover*) y los datos tomados se pueden enlazar posteriormente a redes de posicionamiento GNSS.

De los cinco puntos instalados en total, el más cercano al punto de despegue en la misión fotogramétrica se define como el punto base, donde se coloca el receptor base GNSS, mientras que los restantes se enlazan desde el punto base y son tomados con el *rover*. Para lograr precisión centimétrica, se utiliza el modo de posprocesamiento, con un tiempo de adquisición de al menos 2 horas para el punto base y de 10 minutos para el resto de los puntos tomados con el *rover*. En modo posprocesamiento, se utiliza software con el cual se puede enlazar la información medida en campo con los receptores y la disponible a través de las redes de posicionamiento nacional, con el fin de estimar las coordenadas del punto base primero y luego del resto de puntos enlazados a este.

Para levantamientos fotogramétricos es recomendable registrar también la altura precisa del punto de despegue de la aeronave, ya que esta altitud puede ser utilizada luego para hacer calibraciones en el proceso fotogramétrico.

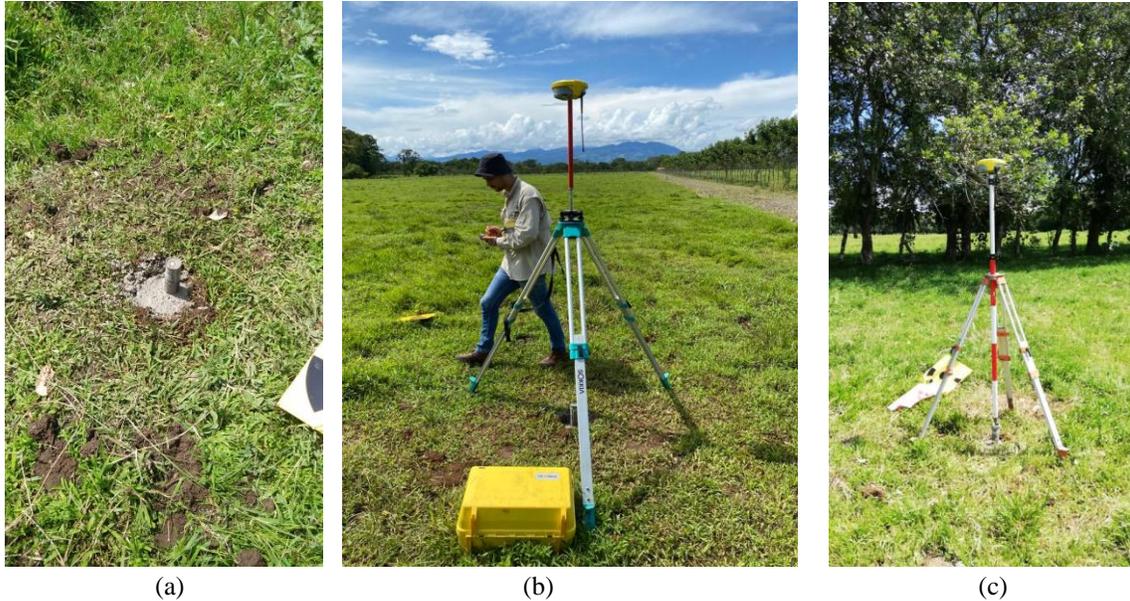


Figura 7. Toma de puntos de control en los sitios de estudio. (a) Punto instalado, (b) toma de punto de referencia con la base GNSS, (c) toma de punto de control con el receptor móvil GNSS (rover).

En el Cuadro 1 se ilustran los resultados obtenidos para otro proyecto de referenciación semejante con seis puntos: un punto base, cuatro puntos enlazados a este, más un punto de referencia sobre un mojón cercano, procesados con el software Leica Geo Office 8.4. Se logra con este procedimiento una precisión milimétrica en la mayoría de las coordenadas y en el peor de los casos una precisión de 1.53 cm.

Se utilizaron como referencia los datos de la red de estaciones GNSS del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica [18]. Con este servicio, se descargan los datos de las estaciones más cercanas al sitio de estudio, tomando un lapso de dos horas previas y dos horas posteriores al tiempo de toma de los puntos con la estación GNSS, para un lapso de unas seis horas en total. Esta información constituye la referencia para el cálculo del punto sobre el mojón y el punto base. Una vez estimado el punto base, los puntos restantes se calculan tomando el punto base como referencia. El mojón utilizado en este proyecto se ubica en las cercanías del edificio Wallace en el Campus Central del CATIE, Turrialba, el cual fue levantado por el Instituto Geográfico Nacional (mojón 105).

Debido a que los puntos tienen que ser visibles en las fotografías aéreas, se debe utilizar algún tipo de marcador que permita su visualización. Tanto el tamaño como el tipo de marcador dependen de la altura de vuelo, siendo necesario que estas características permitan la fácil visualización del punto.

Cuadro 1. Puntos de control en tierra por sitio de estudio con estimaciones de error, tomados en fincas del Campus Central del CATIE, Turrialba, Cartago, Costa Rica, en noviembre de 2020.

| Punto | WGS84 | | | CRTM05 | | | Error RMSE* | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|---------|------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| | Latitud | Longitud | Altura | Este (m) | Norte (m) | Elevación (m) | Error x (m) | Error y (m) | Error z (m) |
| Mojón 105 (Edificio Central) | 9° 53' 23.9384N | -83° 39' 2.7458W" | 601.408 | 538299.356 | 1093596.808 | 601.408 | 0.0022 | 0.002 | 0.0094 |
| CGP Base_1 | 9° 53' 32.2697N | -83° 40' 11.3497W | 616.196 | 536209.221 | 1093850.631 | 616.196 | 0.0024 | 0.0023 | 0.0153 |
| GCP 2 | 9° 53' 31.17390N | -83° 40' 6.5560W | 615.216 | 536355.283 | 1093817.109 | 615.216 | - | - | - |
| GCP 3 | 9° 53' 27.5813N | -83° 40' 7.7049W | 617.382 | 536320.393 | 1093706.705 | 617.382 | - | - | - |
| GCP 4 | 9° 53' 23.6562N | -83° 40' 4.8746W | 615.701 | 536406.733 | 1093586.207 | 615.701 | - | - | - |
| CGP 5 | 9° 53' 22.4451N | -83° 40' 11.1178W | 625.291 | 536216.584 | 1093548.809 | 625.291 | - | - | - |

*Los valores de error se incluyen solo para los puntos base, los cuales definen el error máximo del proyecto por sitio de estudio.

Es importante que el material de los marcadores no sea muy reflectivo, con el fin de evitar destellos que puedan dificultar la identificación de los puntos en las imágenes. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de con marcadores acrílicos de 40x40 cm, de marcas negras sobre fondo amarillo.

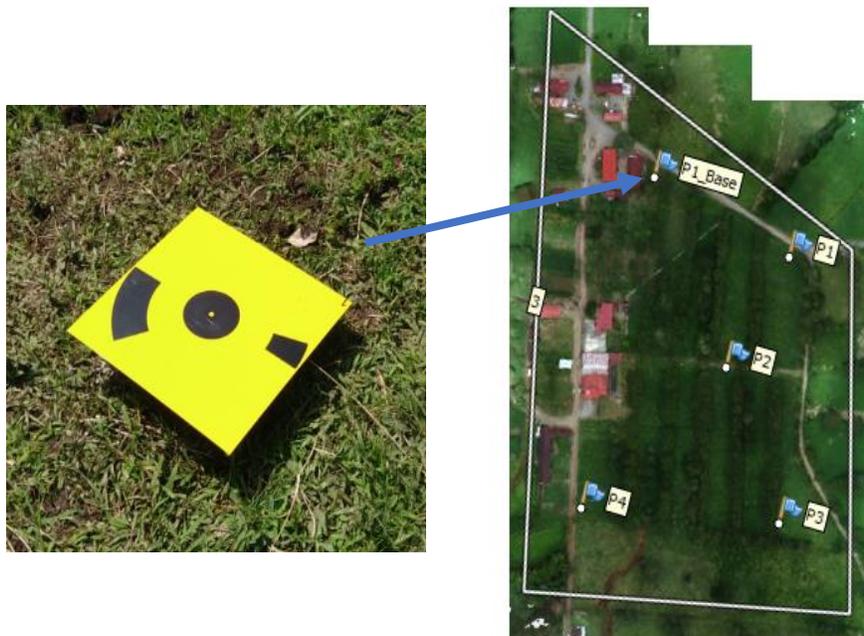


Figura 8. Ilustración de un punto de control con marcadores y del sitio en Turrialba con los puntos ubicados en el ortomapa.

4. Flujo de Procesamiento para Fotogrametría Digital

A continuación, se describe el flujo de fotogrametría digital basado en variantes de los algoritmos SIFT (Scale Invariant Feature Transform), SfM (Structure from Motion), y MVS (MultiView Stereo), ejecutado a través del software fotogramétrico *Agisoft Metashape*. Este acercamiento combina técnicas tradicionales de fotogrametría con técnicas de visión por computadora, y consiste en la detección de puntos característicos en las imágenes (*keypoints*), los cuales se enlazan entre imágenes traslapadas (*matching points*). Sobre este conjunto de imágenes con puntos enlazados, se proyectan estos puntos en un espacio tridimensional para conformar una nube dispersa de puntos (*sparse point cloud*) [5]. Con los detalles del arreglo de imágenes, se extrae, a partir de la nube dispersa, una nube densa de puntos de la que luego se pueden derivar otros productos fotogramétricos tales como ortomosaicos y modelos de elevación digital.

El procedimiento y la configuración del software, tomando como ejemplo el procesamiento de un set de imágenes tomado en las fincas del CATIE en Turrialba, Costa Rica, se detalla a continuación, utilizando la herramienta *Agisoft Metashape Professional*, versión 1.7.3 [19]. En el Apéndice A.1 se incluye la guía de instalación de esta herramienta.

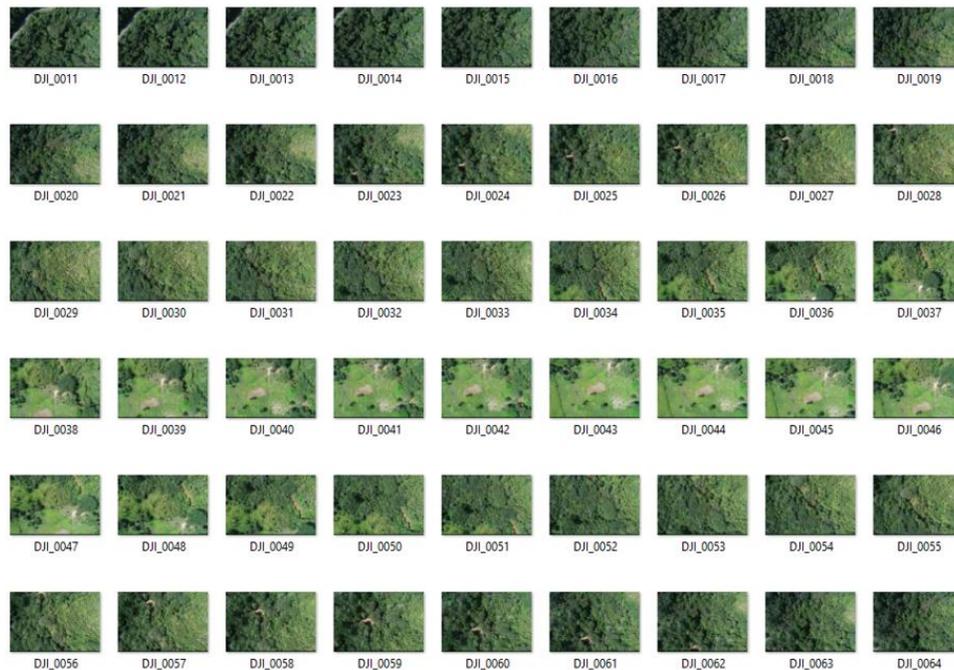
4.1. Carga y preprocesamiento de imágenes fotogramétricas

El primer paso dentro del procesamiento fotogramétrico consiste en cargar el conjunto de fotografías georreferenciadas. En los ejemplos mostrados en esta guía, se trabaja con sets de imágenes generados con plataformas DJI, utilizando el procedimiento discutido en la sección 2. La convención en el nombre de estas imágenes es DJI_XXX.jpg, donde XXX representa el número secuencial en que la foto fue tomada, como se muestra en la Figura 9. Al llegar a 1000 fotos, las imágenes se salvan en un folder nuevo y se reinicia el índice. Es una buena práctica explorar el set de imágenes antes de cargarlo, con el fin de cerciorarse de que todas las imágenes están completas y tienen una buena calidad.

Para cargar las imágenes dentro del proyecto, se localiza, en la barra de herramientas, la pestaña llamada Flujo de trabajo, donde se selecciona la opción  Añadir fotos... (Figura 10).

Con las imágenes dentro del proyecto, la herramienta crea en el espacio de trabajo un folder llamado *Chunk 1*, el cual se puede renombrar posteriormente. Se recomienda verificar que el número de imágenes cargadas sea consistente. En la Figura 11 se muestra la vista

general del programa y se indica la ventana de visualización del espacio de trabajo, donde se ubican las imágenes a procesar.



Conjunto de imágenes

Figura 9. Visualización de un subconjunto de imágenes tomadas durante una misión aérea.

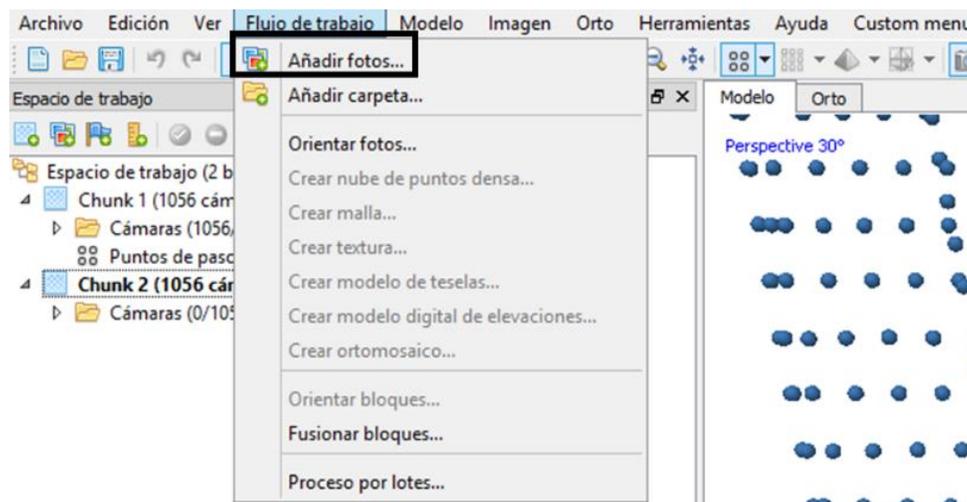


Figura 10. Pestaña del menú de flujo de trabajo para agregar las imágenes al proyecto.

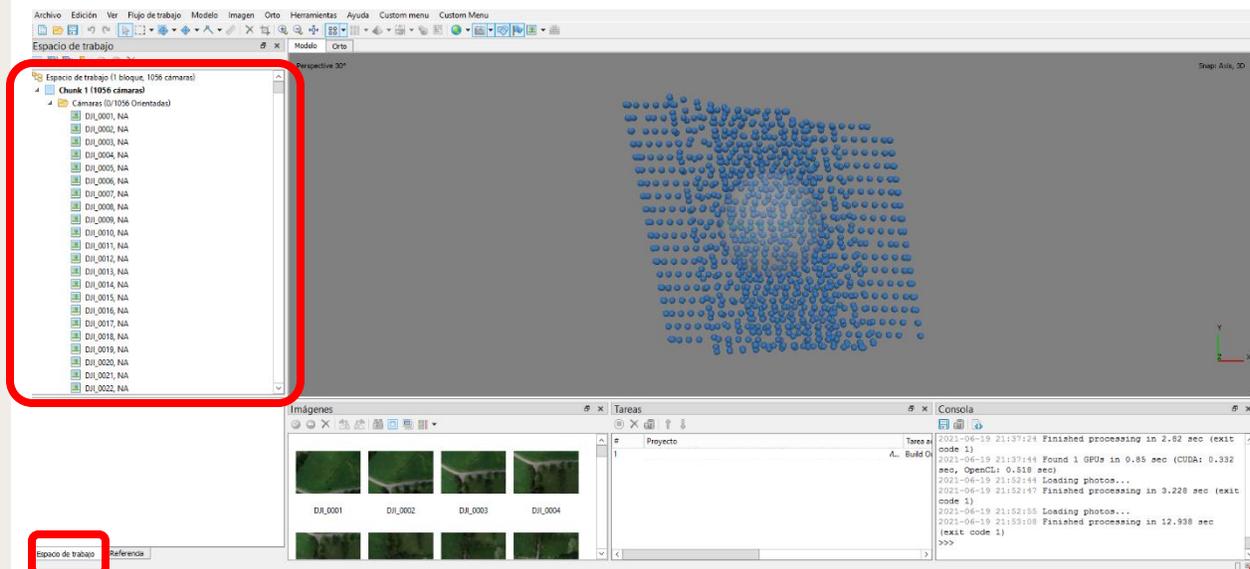


Figura 11. Ventana general de la interfaz del programa. Se destaca el panel de visualización donde aparece el grupo de fotos en la pestaña de espacio de trabajo.

Como las imágenes contienen un metadato con la posición GPS cuando fueron tomadas, es posible visualizar la ubicación de cada una de ellas a nivel de su ubicación por coordenadas espaciales. Esto, se puede visualizar tanto en la pestaña *Modelo* o en la pestaña *Orto*, con el selector de mostrar imágenes activado . En la Figura 12 se muestra la ubicación de las imágenes según la posición de captura para un ejemplo específico. Esta previsualización es útil para asegurarse de que las imágenes capturadas tengan consistencia a nivel de formato y ubicación espacial, previo al proceso de alineación. Además, es conveniente revisar posteriormente que la posición proyectada de las imágenes se mantiene consistente luego del proceso de alineación.

Es usualmente conveniente reproyectar el sistema de coordenadas en el proyecto de WGS-84 al sistema local que aplique. Para el caso de Costa Rica, las coordenadas se convierten a CRTM/CR05 (EPSG::5367). Para ello, se debe localizar la pestaña llamada Referencia en la ventana izquierda de la interfaz, donde se deberá ubicar el botón llamado *Convertir Coordenadas* , que al pulsarlo hace emerger una ventana de configuración que permite realizar la conversión de coordenadas. En la Figura 13 se muestra el menú de conversión de coordenadas.

Al proyectar las imágenes de WGS-84 a CRTM/CR05, si se utilizan sistemas aéreos no tripulados del fabricante DJI, se debe hacer una corrección de altitud, ya que la altitud reportada difiere de la altitud media sobre el nivel del mar que usualmente es utilizada. Para esto se deben copiar los scripts de Phyton del archivo comprimido *Metashape-scripts-master* (<https://github.com/agisoft-llc/metashape-scripts>) a la ubicación: <installation folder>/scripts/, donde <installation folder> corresponde al folder de instalación en el

computador que se esté usando. En esta ubicación, los scripts se cargarán cada vez que se ejecuta el programa (ver apéndice A.1).

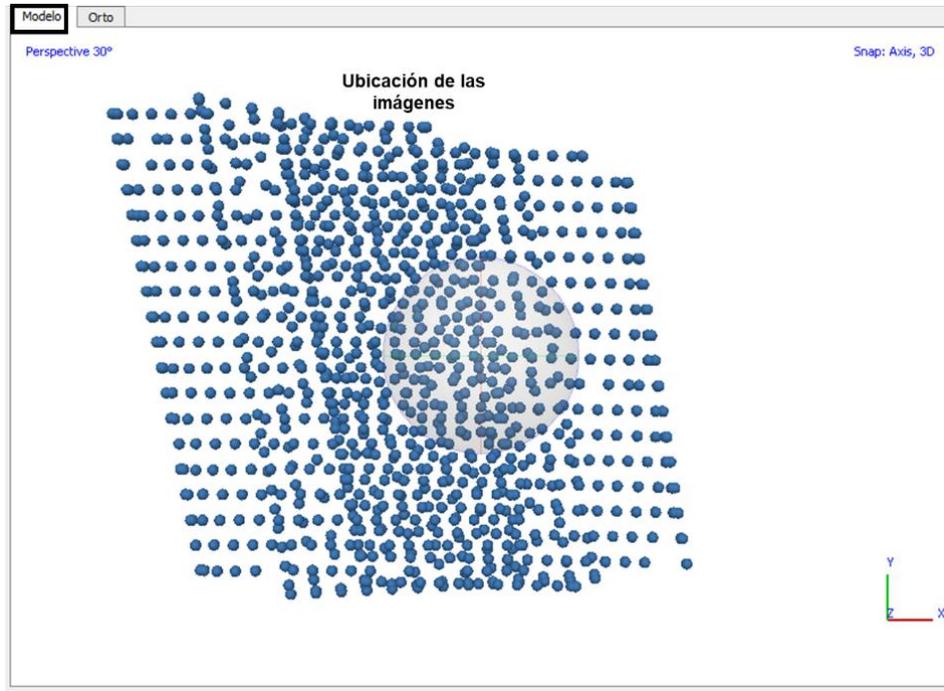


Figura 12. Ventana de visualización de las imágenes.

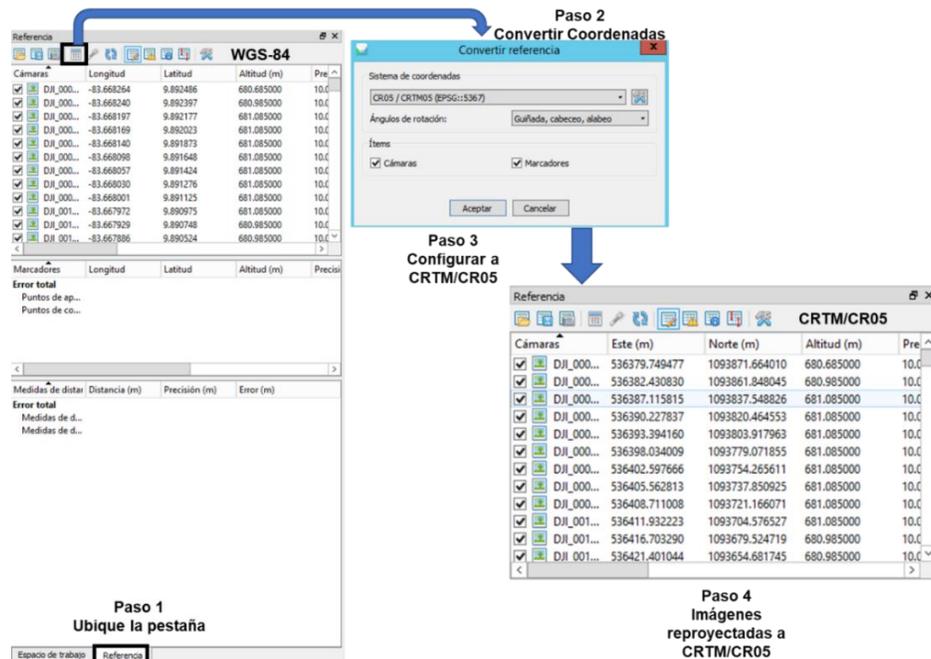


Figura 13. Proceso para la reproyección del sistema de coordenadas de las imágenes.

Con esta acción debe aparecer un menú nuevo en la herramienta llamado *Custom menu*, del cual se debe ejecutar el script “*Read Relative Altitude From DJI metadata*”, que se encarga de extraer la altura de vuelo con respecto al punto de despegue y reemplaza el valor de altitud en las coordenadas; posteriormente, se ejecuta el script “*Add reference altitude*”, el cual suma a la altura de vuelo el valor que se ingrese como la altitud del punto de despegue a la coordenada de altitud de cada imagen. Por esto es importante registrar la altitud del punto de despegue durante la ejecución de la misión o calcularla con algún sistema de información geográfica. En la Figura 14 se muestra gráficamente este proceso.

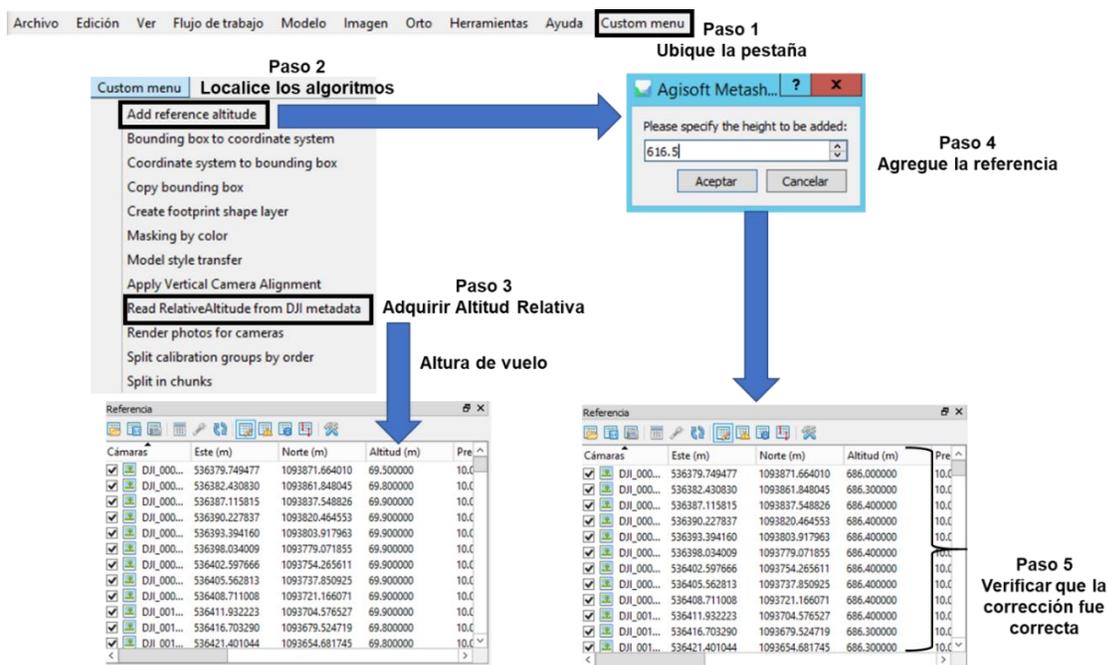


Figura 14. Proceso para la corrección de altitud al usar sistemas aéreos no tripulados del fabricante DJI en el software *Agisoft Metashape*.

Previo a la alineación, es importante realizar la estimación de calidad de las imágenes, para identificar imágenes que puedan ser problemáticas posteriormente en el procesamiento. Para llevar a cabo este proceso se ubica la pestaña llamada *Imágenes* en la sección inferior de la interfaz y se cambia el modo de vista a *Detalles*, mediante el icono . En la Figura 15, se muestra el proceso para la estimación de calidad de las imágenes. El criterio normalmente consiste en descartar imágenes, dentro de lo posible, cuyos índices de calidad estén por debajo de 0.7. Usualmente, índices bajos están asociados con imágenes borrosas o distorsionadas que van a dificultar el procesamiento fotogramétrico del set completo.

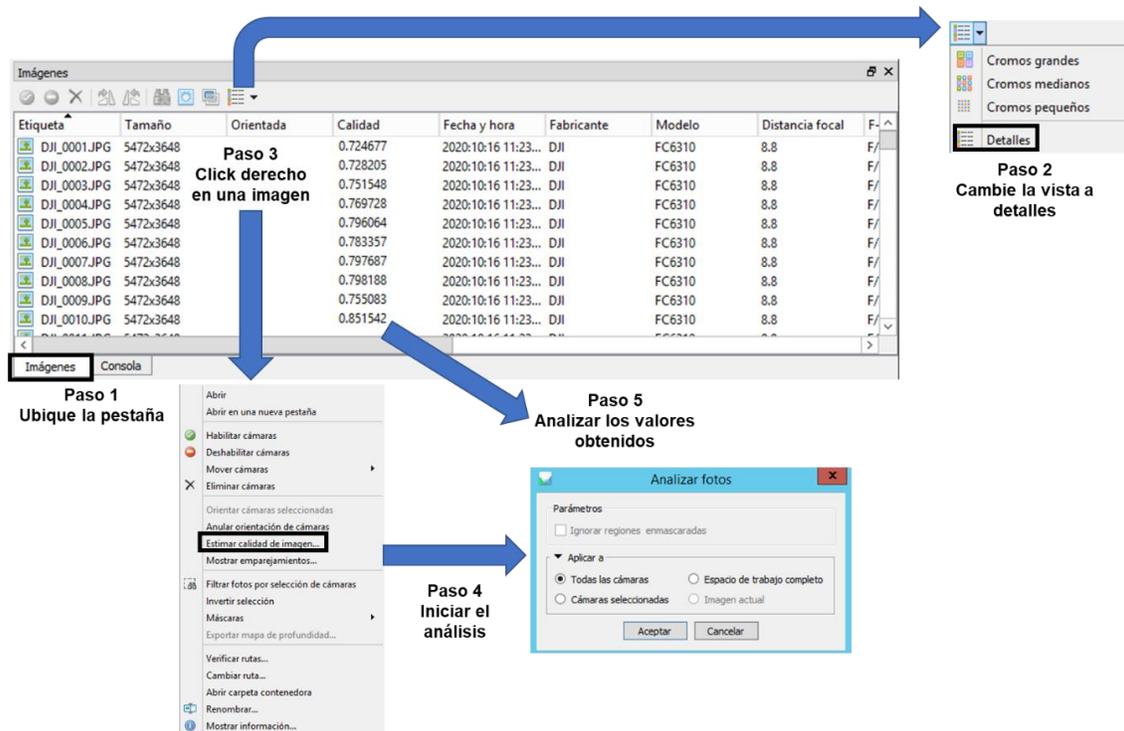


Figura 15. Proceso para la estimación de calidad de las imágenes.

A este punto es también posible hacer ajustes al set de imágenes completo, como, por ejemplo, de brillo y contraste, en caso de que el set estuviera algún problema de sobre o subexposición. Para esto se utiliza la opción , que aparece en la barra de iconos cuando la pestaña Orto está seleccionada.

4.2. Orientación de las imágenes

El proceso de alineado u orientación de las imágenes permite, a partir de algoritmos de visión por computador, extraer puntos clave (*keypoints*) y puntos de paso o enlace (*matching points*) en las zonas de traslape entre imágenes. A partir de esta información, se pueden proyectar las imágenes en un espacio tridimensional, estimar su posición y orientación, y generar una nube dispersa (o rala) de puntos.

Para dar inicio con el proceso de alineación, es necesario localizar en la barra de tareas la pestaña llamada *Flujo de trabajo* y seleccionar la opción llamada *Orientar fotos...* la cual muestra una ventana de configuración para el alineado (Figura 16).

Una precisión más alta permitirá obtener posiciones más precisas en las cámaras, mientras que precisiones bajas permiten obtener estimaciones rápidas de posicionamiento. Si el recurso de cómputo disponible lo permite, se recomienda utilizar la precisión máxima y aprovechar la preselección de referencia (que aprovecha la información de posicionamiento en el metadato de las imágenes), con un límite de 40 000 puntos clave y 4 000 puntos de paso por imagen. Estos límites se pueden incrementar si se detectan muy pocos puntos o si ocurren problemas de alineación, por ejemplo, a 60 000 y 6 000.

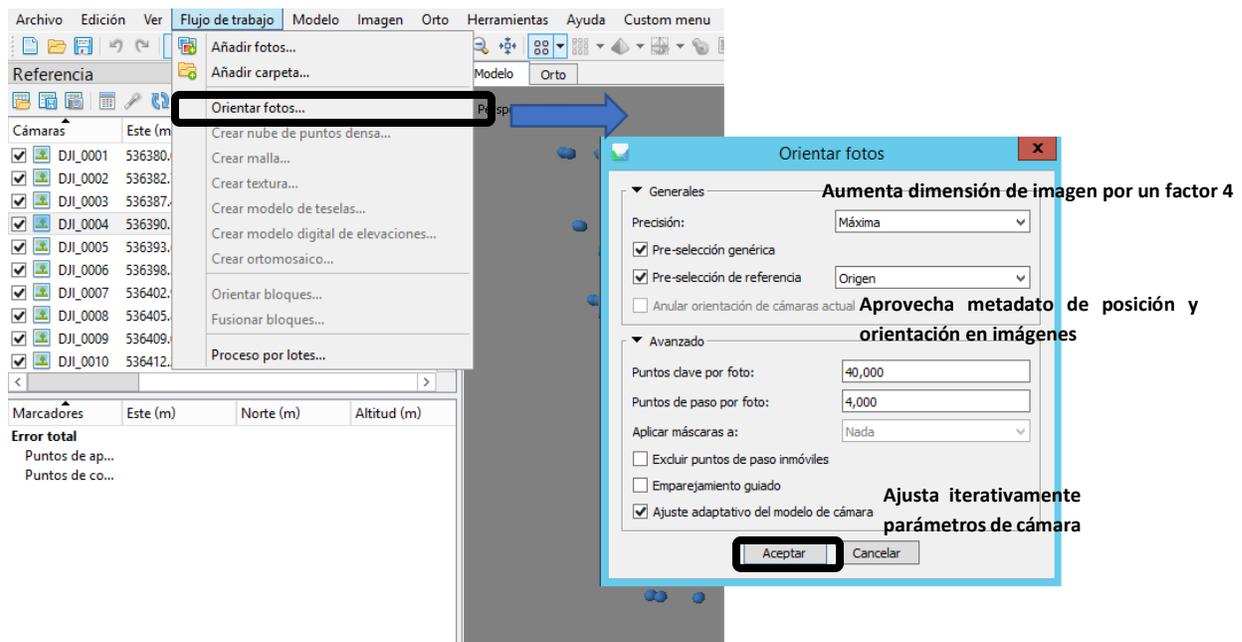


Figura 16. Configuración del proceso de orientación de las imágenes.

Se recomienda habilitar el ajuste adaptativo de la cámara si se desea el ajuste iterativo de los parámetros de la cámara, lo que puede ayudar a prevenir la divergencia en los parámetros. Configuraciones adicionales pueden ser consultadas en [19].

Una vez que el proceso de alineación ha finalizado, se crea la nube dispersa de puntos, la cual contiene los puntos enlazados, identificados y validados entre las imágenes. En la Figura 17 se muestra la ventana de espacio de trabajo y la nube de puntos dispersa resultante de un proceso de alineación.

En el espacio de trabajo se debe revisar si todas las imágenes fueron alineadas correctamente y si las ubicaciones de las cámaras son consistentes con la misión realizada. Es posible descartar imágenes con problemas (deshabilitándolas o eliminándolas del proyecto) o realinear imágenes que no fueron alineadas en una primera iteración, a través de la opción de *Alinear cámaras seleccionadas* (opción que aparece al presionar botón del ratón derecho sobre las imágenes con problemas).

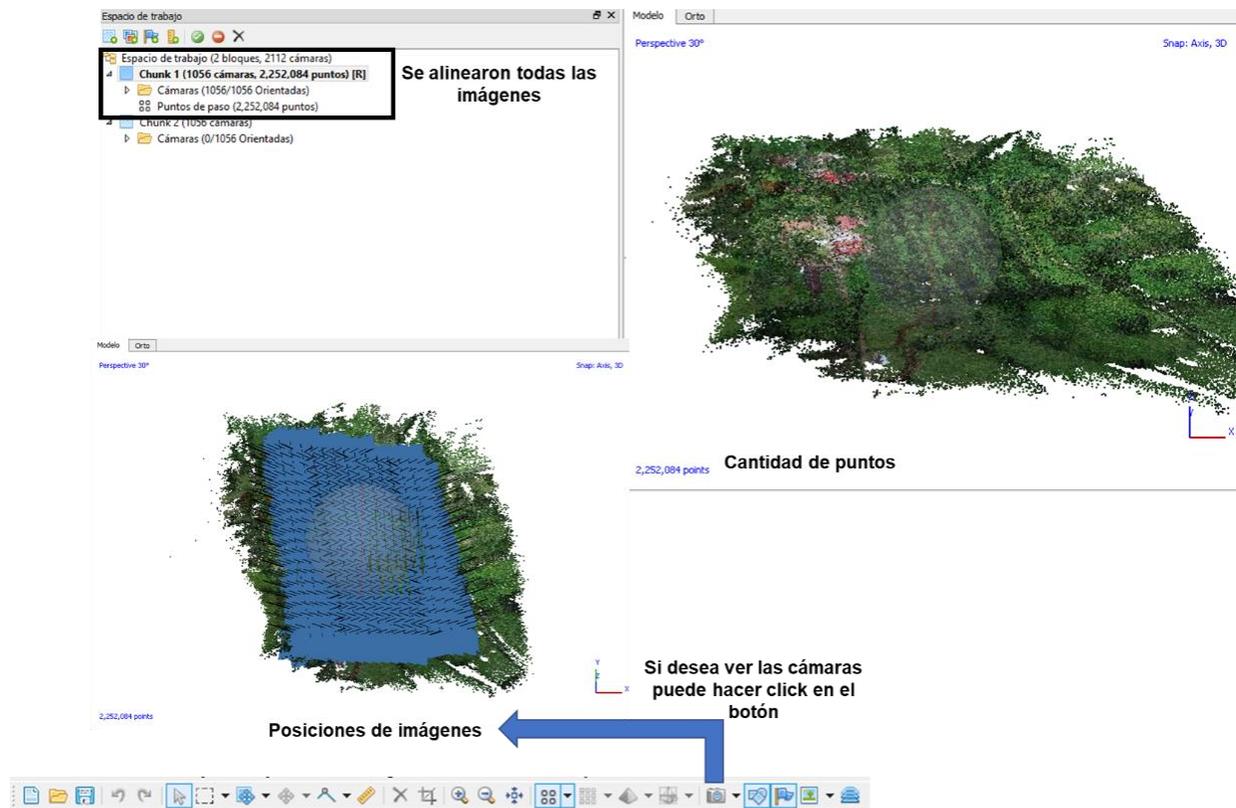


Figura 17. Visualización resultante del proceso de alineación.

Los puntos coincidentes detectados entre imágenes pueden ser explorados. Para esto (Figura 18), se puede presionar el botón derecho del ratón sobre alguna imagen y seleccionar la opción *View Matches*. Esto despliega un menú que permite seleccionar la imagen de referencia y ver los puntos coincidentes con otras imágenes del conjunto. Como es de esperar, las coincidencias serán mayores entre fotografías con mayor traslape e inexistentes en fotografías que no tienen traslape. Los puntos se catalogan en puntos válidos e inválidos, siendo los válidos los que se utilizan finalmente en la generación de la nube dispersa de puntos.

Luego de la alineación, en el espacio de trabajo, pestaña de *Referencia*, se pueden encontrar las estimaciones de error, que corresponden a las diferencias entre los registros de posición en el metadato de las imágenes, con respecto a las proyecciones derivadas de los puntos coincidentes. Si existiesen puntos de control, esta estimación también aparece para los puntos de control y puntos de revisión que se incluyan. En la Figura 19 se muestra un ejemplo con los valores totales de error en el plano x , y , z y el error combinado. Para receptores GPS de frecuencia sencilla a bordo, es común que el error reportado esté en el orden de metros.

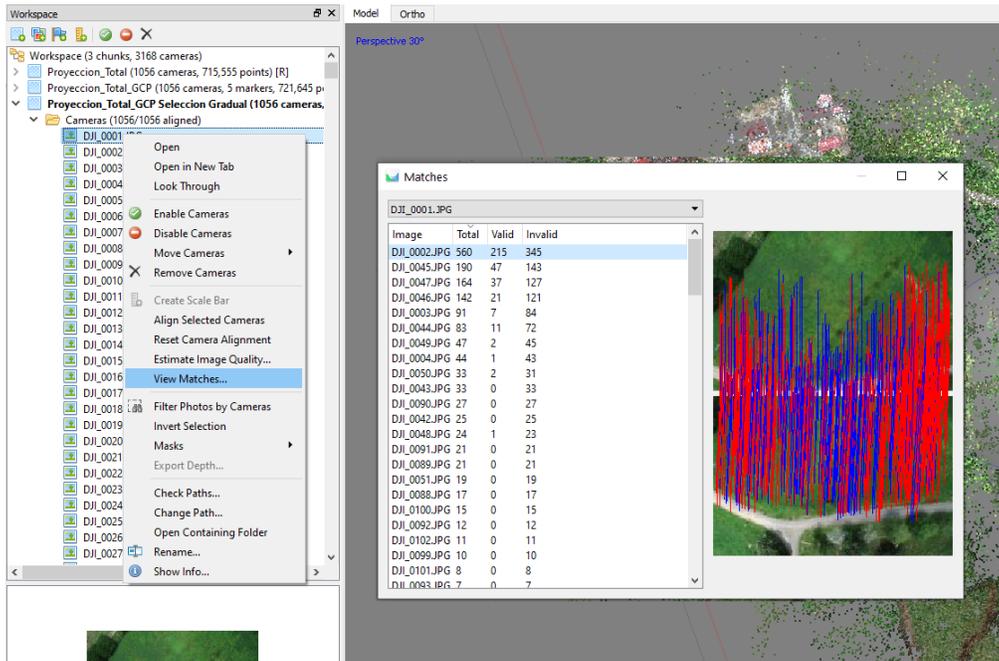


Figura 18. Inspección de puntos enlazados entre el set de imágenes alineado.

| Cámaras | Este err (m) | Norte err (m) | Alt. err (m) | Precisión (m) | Error (m) |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1047 | -1.465610 | 0.110542 | 0.275832 | 10.000000 | 1.495432 |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1048 | -1.424300 | 0.273067 | 0.181430 | 10.000000 | 1.461544 |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1049 | -1.282815 | 0.283798 | 0.558467 | 10.000000 | 1.427600 |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1050 | -1.716531 | 0.265161 | 0.716470 | 10.000000 | 1.878861 |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1051 | -1.788159 | 0.309537 | 0.598862 | 10.000000 | 1.911011 |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1052 | -1.883982 | 0.393602 | 0.116178 | 10.000000 | 1.928161 |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1053 | -1.962665 | 0.446706 | -0.371424 | 10.000000 | 2.046841 |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1054 | -2.094736 | 0.494730 | -0.791916 | 10.000000 | 2.293428 |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1055 | -1.539084 | 0.630143 | -0.266982 | 10.000000 | 1.684381 |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_1056 | -1.616946 | 0.603580 | 0.498862 | 10.000000 | 1.796576 |
| Error total | 3.298698 | 2.569487 | 1.142630 | | 4.334660 |

Figura 19. Totalización de errores de posicionamiento posterior al proceso de alineación.

El proceso de proyección de las cámaras se puede optimizar y al depender éste de las características del sensor de imagen, es posible corregirlo. Si se dispone de información detallada del sensor, de manera opcional, es posible configurar valores iniciales y factores de ajuste de la cámara. Para esto se puede ingresar desde la barra de herramientas al menú Herramientas, opción de *Calibración de la Cámara*, como se muestra en la Figura 20.

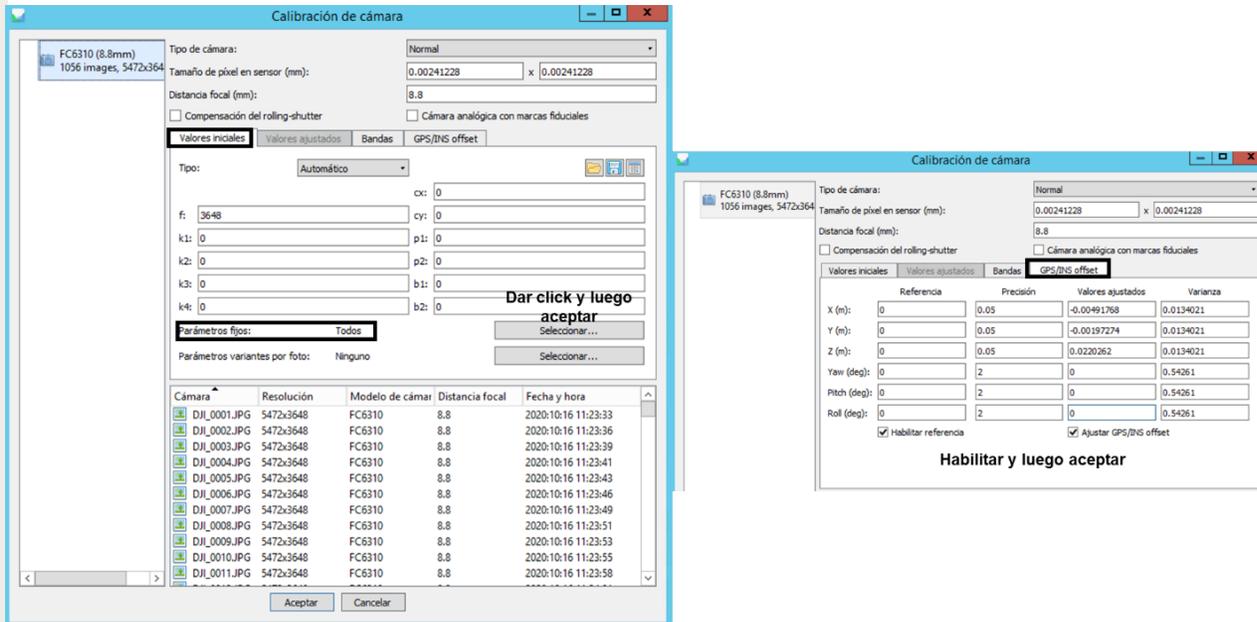


Figura 20. Calibración de cámara como proceso opcional para mejorar el proceso de alineación.

4.3. Utilización de puntos de control

Como se mencionó anteriormente, con la utilización de puntos de control y puntos de revisión se puede mejorar la precisión en el proceso de alineación y reducir los errores de posicionamiento. Los puntos se agregan como marcadores, ya sea importando un archivo de texto o un archivo separado por comas (CSV), o ingresando los marcadores manualmente. En la Figura 21 se muestra una estructura ejemplo del formato de los puntos de control para ser importados en *Agisoft Metashape*.

Para importar las coordenadas de los puntos de control, dentro del espacio de trabajo, pestaña referencia, se selecciona el icono Importar referencia , que despliega la venta en la Figura 22. Si aparece un mensaje con la leyenda de que no existen los marcadores, cuando es la primera vez que se agregan, se responde afirmativamente.

Una vez establecidos los puntos de control, estos deben ser ubicados en todas las imágenes en las que sean visibles. Este proceso se realiza manualmente, como se ilustra en la Figura 23, ubicando las banderas en el centro de los marcadores. Al agregar el marcador en más de dos imágenes, el programa trata de aproximar el punto en las imágenes restantes visibles, con lo que el proceso se facilita; sin embargo, es importante revisar que todos los puntos están ubicados correctamente, ya que imprecisiones en la

ubicación o identificación de los puntos resulta en un incremento del error en las proyecciones.

| | A | B | C |
|---|--|---|---|
| 1 | P1,536355.283,1093817.109,615.219 | | |
| 2 | P1_Base,536209.221,1093850.631,616.199 | | |
| 3 | P2,536320.393,1093706.705,617.385 | | |
| 4 | P3,536406.733,1093586.207,615.704 | | |
| 5 | P4,536216.584,1093548.809,625.294 | | |

Figura 21. Formato de valores separados por coma, como ejemplo de un archivo de coordenadas asociado a puntos de control.

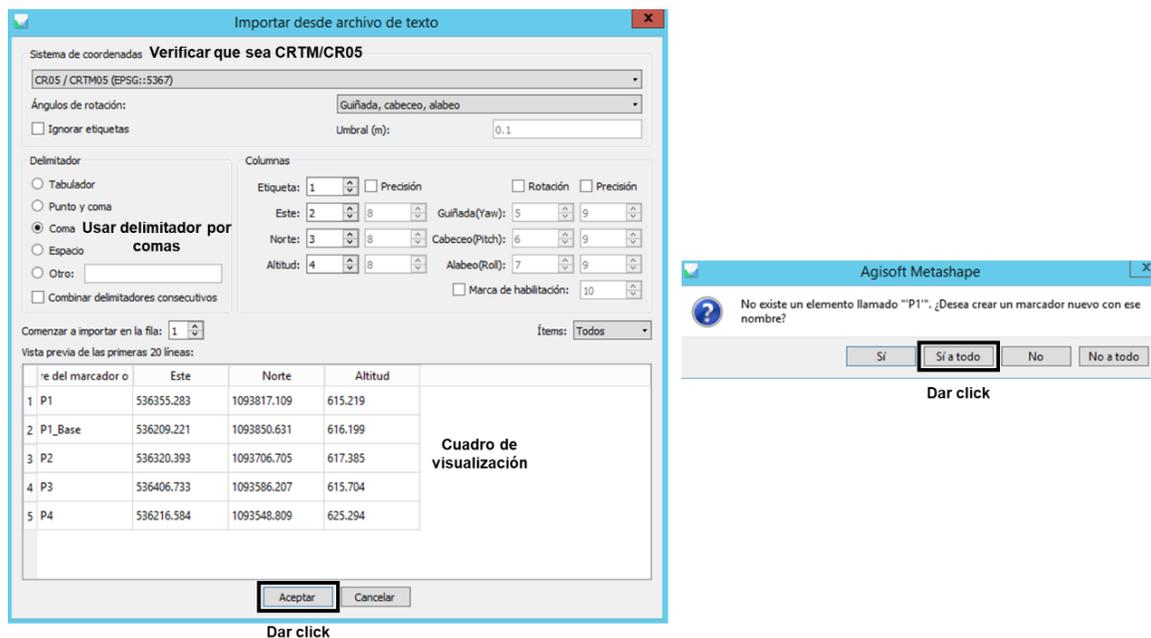


Figura 22. Cuadro de configuración para la inserción de puntos de control en el proyecto.

Si algún punto no se ubica, este punto se asignará como punto de revisión, que frecuentemente se utilizan para efectos de validación. Es decir, este punto no se va a utilizar en el proceso de alineación, pero es de utilidad para estimar el error en la proyección de ese punto.

El proceso de ubicación de los marcadores se puede automatizar con la utilización de marcadores codificados, los cuales se pueden identificar automáticamente por el software

fotogramétrico. La herramienta es capaz de generar estos patrones con las opciones del menú *Herramientas>Marcadores*. Sin embargo, para que esto sea posible, los marcadores tienen que ser suficientemente grandes, lo cual puede ser difícil dependiendo de la altura de vuelo que se utilice. Como en el caso que se muestra en la Figura 23, a pesar de que los marcadores utilizados son codificados, debido a la altura de vuelo, la detección automática no es funcional.

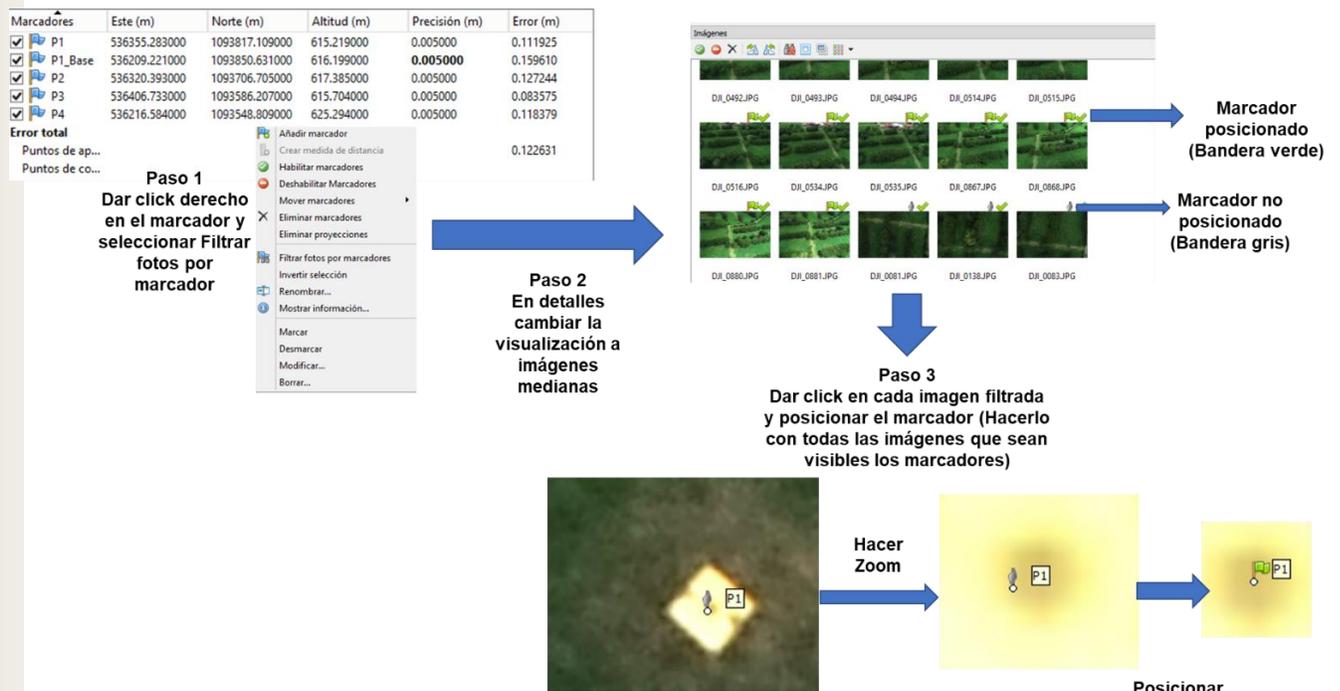


Figura 23. Proceso de asignación de los puntos de control de manera manual.

La Figura 24 muestra un ejemplo con los puntos de control ya posicionados e identificados en la nube de puntos. Dentro del proyecto, los mismos son identificados con el ícono , tanto en las nubes como en las imágenes y menú de referencia.

Finalizado el proceso de localización y posicionamiento de los puntos de control, si ya existe una alineación previa, es posible afinar las coordenadas espaciales de la nube de puntos ejecutando el proceso llamado *Optimizar cámaras* , el cual está ubicado en la barra de herramientas de la pestaña de *Referencia*. Alternativamente, se puede ejecutar el proceso de alineación nuevamente, considerando los puntos directamente.

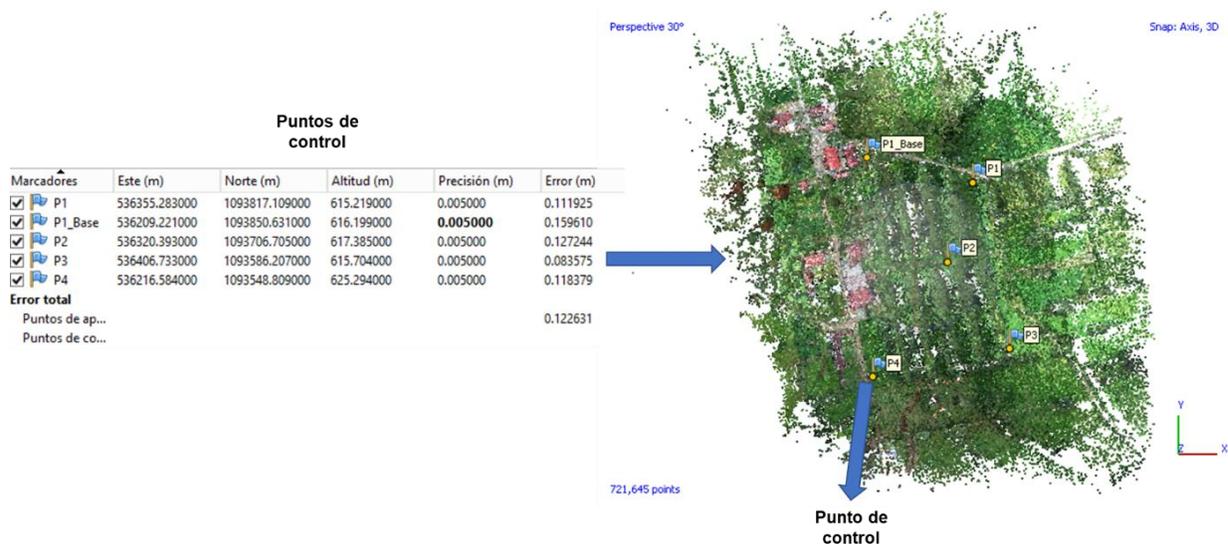


Figura 24. Visualización de las coordenadas de los puntos de control y su respectivo posicionamiento espacial en la nube dispersa de puntos.

Al aplicar el proceso de alineación u optimización de cámaras con los puntos de control, es posible visualizar los errores, error cuadrático medio (RMSE) y error a nivel de píxel resultantes. Para esto, localice la pestaña *Referencia* y en el botón de *Mostrar errores* puede visualizar los errores anteriormente mencionados. En la Figura 25 se muestra un ejemplo de la tabla de errores luego de llevar a cabo el proceso de georreferenciación.

| Marcadores | Este err (m) | Norte err (m) | Alt. err (m) | Precisión (m) | Error (m) | Proyecciones | Error (pix) |
|---|--------------|---------------|--------------|-----------------|-----------|--------------|-------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> P1 | -0.063962 | -0.091869 | -0.006796 | 0.005000 | 0.112148 | 14 | 3.593 |
| <input checked="" type="checkbox"/> P1_Base | 0.046635 | 0.141949 | 0.056571 | 0.005000 | 0.159764 | 27 | 2.840 |
| <input checked="" type="checkbox"/> P2 | -0.045606 | 0.014597 | -0.117879 | 0.005000 | 0.127234 | 22 | 3.419 |
| <input checked="" type="checkbox"/> P3 | -0.033728 | 0.003961 | 0.076302 | 0.005000 | 0.083518 | 32 | 1.420 |
| <input checked="" type="checkbox"/> P4 | 0.096568 | -0.067988 | -0.007920 | 0.005000 | 0.118366 | 28 | 1.195 |
| Error total | | | | | | | |
| Puntos de ap... | 0.061333 | 0.081781 | 0.067862 | | 0.122700 | | 2.486 |
| Puntos de co... | | | | | | | |

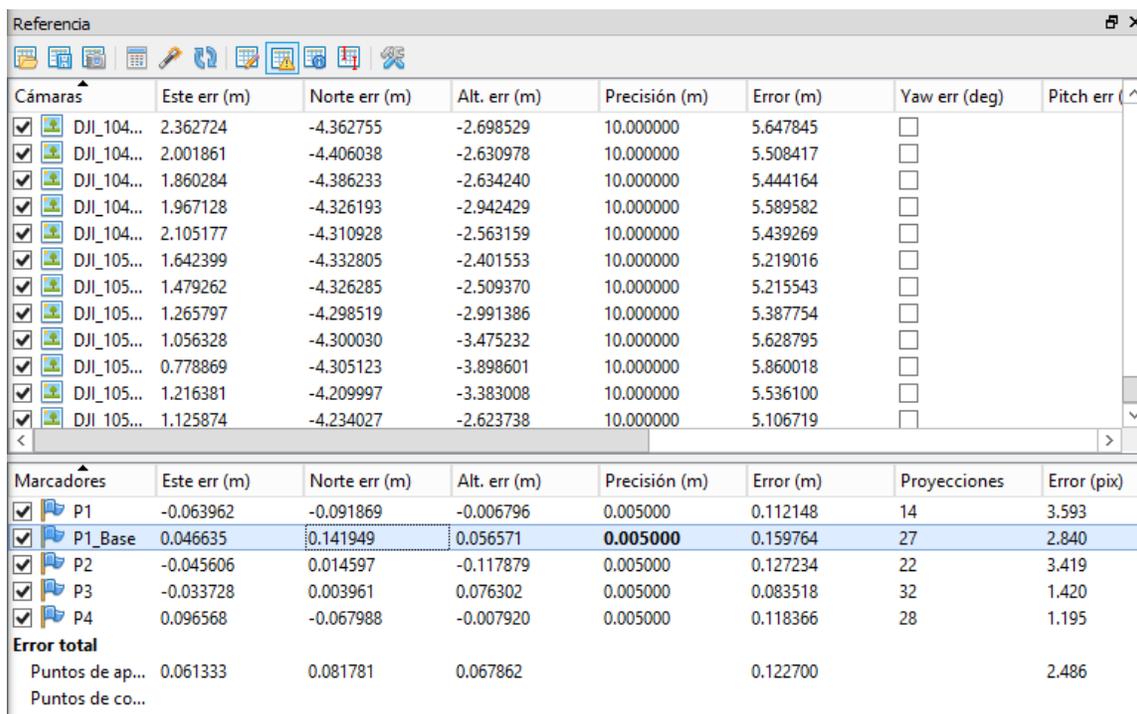
Figura 25. Tabla resumen de los errores obtenidos luego del procesamiento de la georreferenciación.

El error obtenido va a estar limitado por la precisión de los puntos de control. Para el ejemplo mostrado en la Figura 26, los puntos se ubicaron con el procedimiento indicado en la sección 3, con una estación GNSS de doble frecuencia. Con este acercamiento se logra precisión centimétrica que se traduce a un error esperado en los procesamientos en el orden de unos pocos centímetros. El proceso de proyección de las imágenes va a favorecer

la ubicación de los puntos de control si estos poseen un error más bajo, lo cual es un caso común para plataformas UAS con receptores GPS de frecuencia sencilla y puntos de control tomados con estaciones GNSS. Es importante verificar que la configuración del error esperado en la posición de las imágenes y los puntos de control es adecuada, lo cual se configura desde las opciones de la barra de herramientas  en la pestaña *Referencia* del espacio de trabajo.

Para fines de evaluación del modelo de posición, se puede llevar a cabo un proceso de alineación utilizando en este caso el metadato de posición de las cámaras en conjunto con las coordenadas de los puntos de control; es decir, ambos pueden ser marcados para ser utilizados. En la Figura 26 se muestra el ejemplo con el conjunto de imágenes y puntos de control para un alineado en conjunto.

El error se puede reducir mejorando la estimación de los puntos o referenciación en las imágenes, variando la calibración del sensor de imagen, o filtrando la nube dispersa de puntos, al eliminar los puntos con mayor error. Esta última opción se discute en el siguiente apartado.



| Cámaras | Este err (m) | Norte err (m) | Alt. err (m) | Precisión (m) | Error (m) | Yaw err (deg) | Pitch err (°) |
|--|--------------|---------------|--------------|---------------|-----------|--------------------------|---------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_104... | 2.362724 | -4.362755 | -2.698529 | 10.000000 | 5.647845 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_104... | 2.001861 | -4.406038 | -2.630978 | 10.000000 | 5.508417 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_104... | 1.860284 | -4.386233 | -2.634240 | 10.000000 | 5.444164 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_104... | 1.967128 | -4.326193 | -2.942429 | 10.000000 | 5.589582 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_104... | 2.105177 | -4.310928 | -2.563159 | 10.000000 | 5.439269 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_105... | 1.642399 | -4.332805 | -2.401553 | 10.000000 | 5.219016 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_105... | 1.479262 | -4.326285 | -2.509370 | 10.000000 | 5.215543 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_105... | 1.265797 | -4.298519 | -2.991386 | 10.000000 | 5.387754 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_105... | 1.056328 | -4.300030 | -3.475232 | 10.000000 | 5.628795 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_105... | 0.778869 | -4.305123 | -3.898601 | 10.000000 | 5.860018 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_105... | 1.216381 | -4.209997 | -3.383008 | 10.000000 | 5.536100 | <input type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DJI_105... | 1.125874 | -4.234027 | -2.623738 | 10.000000 | 5.106719 | <input type="checkbox"/> | |

| Marcadores | Este err (m) | Norte err (m) | Alt. err (m) | Precisión (m) | Error (m) | Proyecciones | Error (pix) |
|---|--------------|---------------|--------------|-----------------|-----------|--------------|-------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> P1 | -0.063962 | -0.091869 | -0.006796 | 0.005000 | 0.112148 | 14 | 3.593 |
| <input checked="" type="checkbox"/> P1_Base | 0.046635 | 0.141949 | 0.056571 | 0.005000 | 0.159764 | 27 | 2.840 |
| <input checked="" type="checkbox"/> P2 | -0.045606 | 0.014597 | -0.117879 | 0.005000 | 0.127234 | 22 | 3.419 |
| <input checked="" type="checkbox"/> P3 | -0.033728 | 0.003961 | 0.076302 | 0.005000 | 0.083518 | 32 | 1.420 |
| <input checked="" type="checkbox"/> P4 | 0.096568 | -0.067988 | -0.007920 | 0.005000 | 0.118366 | 28 | 1.195 |
| Error total | | | | | | | |
| Puntos de ap... | 0.061333 | 0.081781 | 0.067862 | | 0.122700 | | 2.486 |
| Puntos de co... | | | | | | | |

Figura 26. Conjunto de imágenes y puntos de control activos y sus errores estimados luego de un proceso de alineación.

4.4. Filtrado de la nube rala de puntos mediante selección gradual

La nube dispersa que resulta de un proceso de alineación siempre va a tener diferentes tipos de errores, sin importar que haya sido generada con o sin puntos de control. Con el método denominado Selección Gradual se filtran los puntos con mayor error iterativamente, hasta lograr unas ciertas metas de reducción del error [15].

Como el proceso de selección gradual implica eliminar puntos de la nube, es probable cometer errores y eliminar más puntos de los necesarios, por lo cual se recomienda duplicar el bloque original (*Chunk*), para poder volver a la nube original en caso de que el proceso de selección gradual no resulte bien. Para esto se debe localizar el bloque activo, con el botón derecho del ratón seleccionar la opción de *Duplicar*, y renombrar el bloque con un nombre representativo (Figura 27).

El proceso de selección gradual permite escoger puntos basado en criterios de error para así reducir el tamaño de la nube dispersa de puntos, con lo que también mejora la eficiencia del proceso en términos de recurso computacional y tiempo de procesamiento en la generación de la nube densa de puntos. Un proceso de selección gradual puede resultar en la eliminación de más del 80% de los puntos, siendo necesario a veces realinear algunas imágenes que pierden sus puntos de enlace. La métrica para juzgar el éxito del proceso debe ser el error resultante, que debe ir reduciéndose conforme se eliminan puntos.

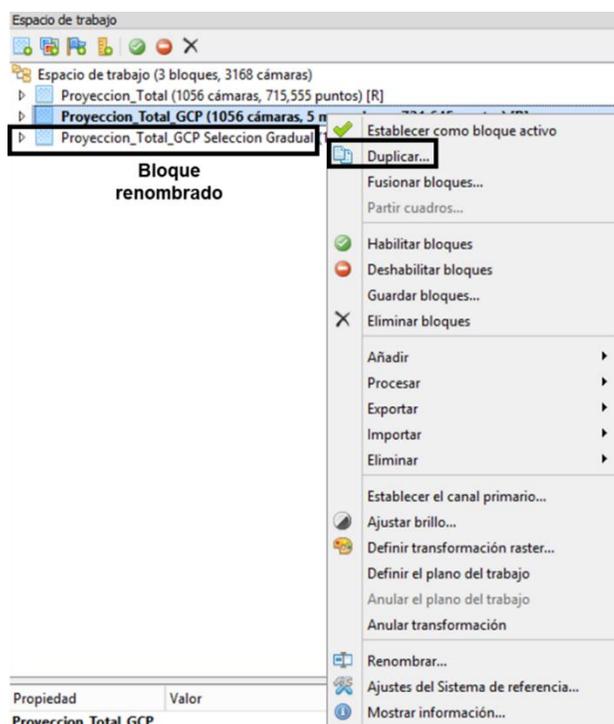


Figura 27. Visualización de bloque duplicado y luego renombrado antes de la aplicación del método de reducción de la nube mediante selección gradual.

Para dar inicio al proceso, la selección gradual se ubica en la barra superior, el menú *Modelo* y la opción *Selección gradual...* En el menú que se despliega se pide escoger el criterio de selección, que debe ser *Error de reproyección*, *Incertidumbre en la reconstrucción*, *Número de Imágenes*, o *Precisión de proyección* (Figura 28).

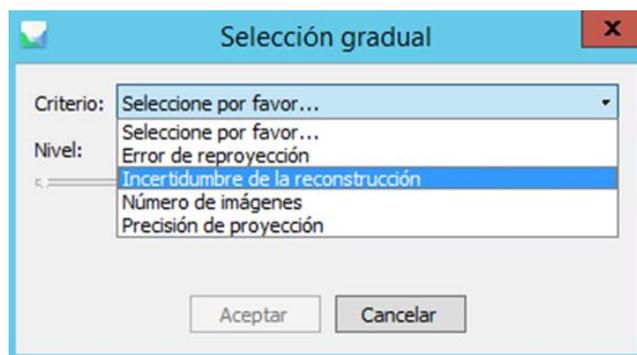


Figura 28. Criterios de optimización utilizando el método de selección gradual.

Esto criterios se pueden describir de la siguiente manera [15]:

Error de reproyección: es el error *rms* en los puntos enlazados. Valores altos indican que existe puntos localizados de manera deficiente; eliminar dichos puntos mejora la precisión del modelo. Es recomendable usar valores bajos.

Incertidumbre de la reconstrucción: es una razón de los ejes de la elipse de error proveniente de la triangulación de los puntos; la eliminación de puntos con incertidumbres altas no afecta la precisión, pero ayuda a mejorar la geometría del modelo.

Número de imágenes: número de imágenes donde un punto enlazado es medido. Se reconstruyen los puntos medidos en al menos en dos fotos, y con este criterio se pueden filtrar puntos que aparecen en pocas imágenes y generalmente son poco confiables. Debido a que la nube dispersa de puntos puede quedar con poca información, se debe utilizar con reserva.

Precisión de proyección: es la escala promedio en la imagen, en las que las coordenadas del punto de enlace se miden. Permite escoger puntos donde la proyección resultante es mala. Es recomendable usar valores bajos.

Los valores de filtrado según estos parámetros van a depender de muchos factores y de cada caso en particular. Para imágenes con plataformas UAS tomadas a alturas entre 70 y 100 metros, se pueden obtener errores de reproyección inferiores a 0.5, incertidumbre en la reconstrucción inferior a 20, y precisión de proyección inferior a 5.

El proceso de selección gradual normalmente inicia con la definición del área que se desea tomar de la nube rala, lo cual se puede ajustar con las herramientas de edición de la zona

activa  en la barra de iconos, con la pestaña de *Modelo* activa en el espacio de trabajo. Con esta área definida, los puntos exteriores serán ignorados. Puntos que a simple vista están mal ubicados o están fuera de la zona de interés se pueden eliminar manualmente con las herramientas de selección  y luego el comando de eliminar  en la misma barra.

Posteriormente, se sigue el procedimiento ilustrado en la Figura 29, donde, al escoger un criterio y establecer un límite con la barra deslizante y presionar aceptar, los puntos seleccionados se muestran en color rosa y puede ser eliminados con el comando Eliminar . Al repetir el proceso con los tres criterios de interés: error de reproyección inferior, incertidumbre en la reconstrucción y precisión de proyección, se procede a ejecutar el proceso de optimización de las cámaras , considerando cámaras y luego puntos de control (de haberlos), verificando que el error se esté reduciendo, tanto el error en metros como el error en píxeles.

El procedimiento se puede repetir progresivamente hasta alcanzar la meta de error o hasta llegar a reducir aproximadamente un 80% de los puntos. Si el proceso se continúa sin límite de puntos, es posible que la información en la nube dispersa de puntos no sea suficiente para reconstruir el modelo, con lo cual el resultado no será satisfactorio.

Si el proceso resulta exitoso, es de esperar una nube dispersa más pequeña y con métricas de errores menores, que permiten la generación de una nube densa más eficientemente y con una mejor calidad.

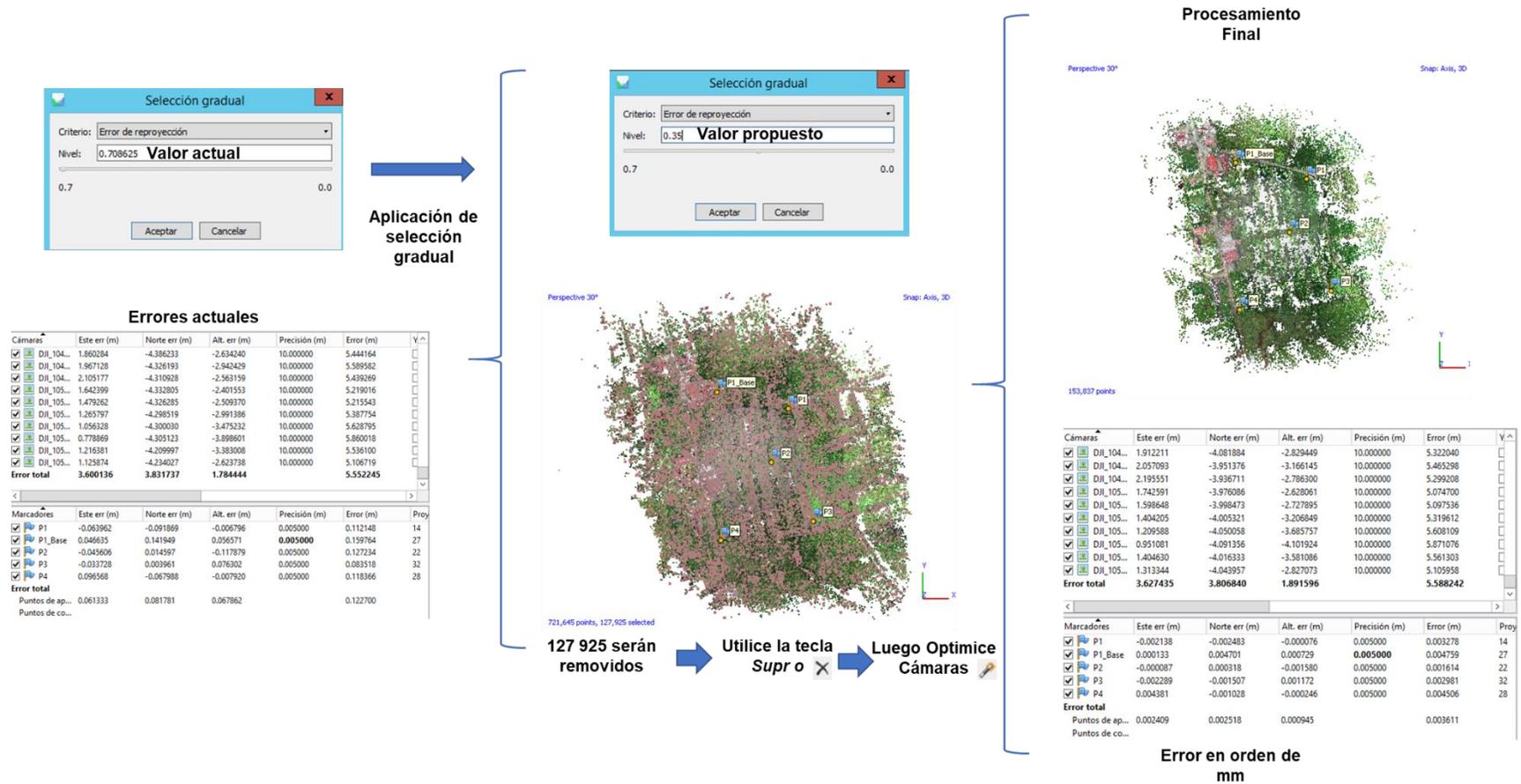


Figura 29. Visualización del proceso de reducción gradual utilizando como criterio el error de reproyección.

4.5. Generación de la nube densa de puntos

Concluido el proceso de selección gradual, se continúa con el proceso más intensivo en tiempo y demanda de recursos computacionales: la generación de la nube densa de puntos.

Para esto se localiza en el *Flujo de trabajo* la opción *Crear nube de puntos densa...*, que despliega la ventana mostrada en la Figura 30. En esta ventana de diálogo se escoge la calidad de la nube, que incluye desde extra alta, que utiliza la máxima resolución disponible en las imágenes, hasta resoluciones más bajas, en las cuales se submuestra la información disponible, con la consecuente baja en la calidad espacial de la nube resultante y reducción de tamaño. Para el ejemplo en la Figura 31, se utilizó la resolución extra alta.

En la pestaña *Avanzado* se debe seleccionar las opciones de filtrado de profundidad de la nube. Un filtrado moderado usualmente brinda buenos resultados en nubes para sitios con vegetación abundante, aunque las opciones se pueden modificar si los resultados obtenidos no son del todo satisfactorios (por ejemplo, cambiando el filtrado de profundidad a agresivo).

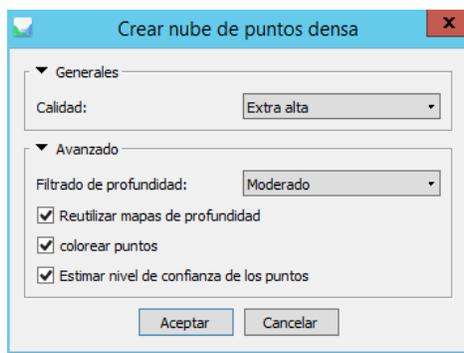


Figura 30. Parámetros de configuración para la generación de la nube de puntos densa.

Finalmente, cuando el proceso de la nube densa de puntos ha finalizado, ésta se visualiza en la pestaña de *Espacio de trabajo*, en el bloque de procesamiento activo, donde se muestra la cantidad de puntos generados. En la pestaña *Modelo* se puede visualizar la nube densa de puntos resultante (Figura 31).

A partir de la nube de puntos densa se generan diferentes productos, tales como un modelo de elevación digital, ortomosaicos, modelos mallados, modelos de teselas, nubes submuestreadas o clasificadas, etc. A continuación, se describe el procedimiento para generar modelos de elevación digital y ortomosaicos (ortomapas).

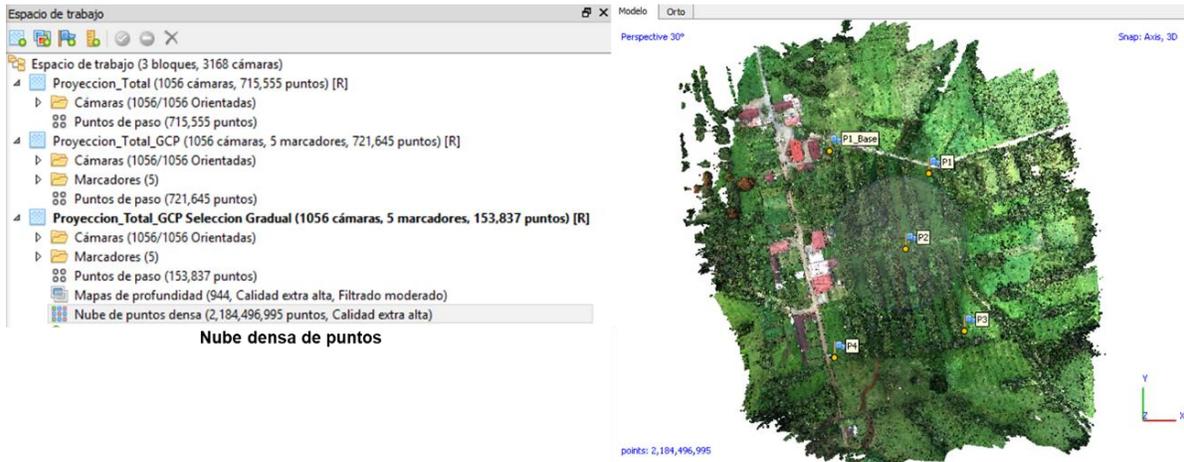


Figura 31. Información y visualización de una nube de puntos densa.

4.6. Creación de Modelos de Elevación Digital y Ortomosaicos

Para la generación del modelo digital de elevación (DEM de sus siglas en inglés, o MDE de las siglas en español), se debe localizar en la barra principal de herramientas la pestaña llamada *Flujo de trabajo* y luego ubicar el proceso llamado *Crear modelo digital de elevaciones...* La Figura 32 describe el proceso para generarlo.

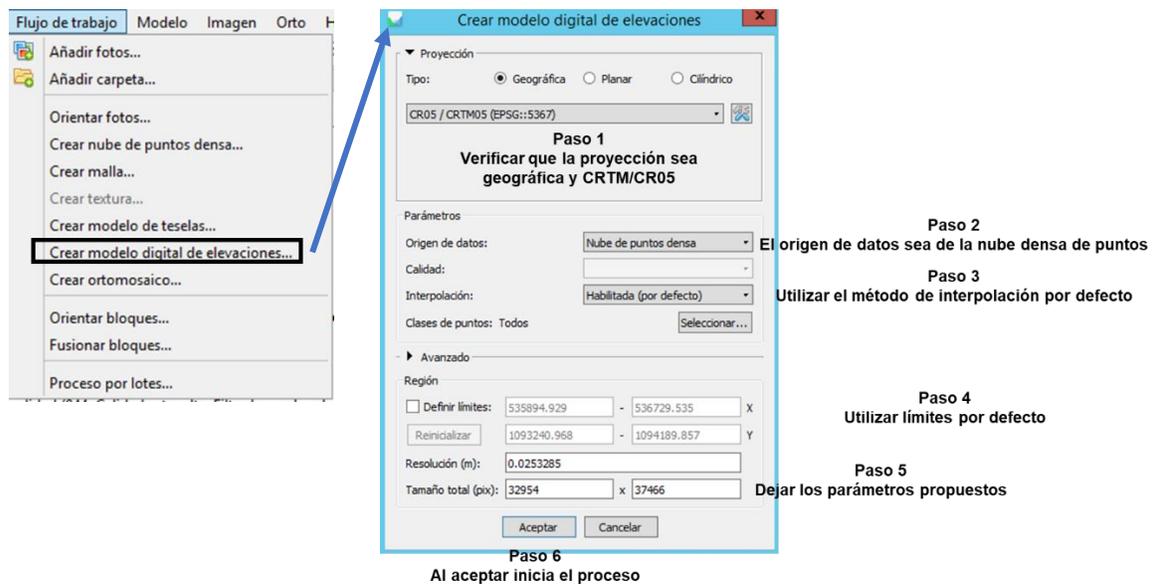


Figura 32. Ubicación de pestaña, ventana de diálogo y pasos para la generación del modelo digital de elevaciones.

Para obtener la mejor resolución posible, la fuente de origen para crear el modelo debe ser la nube densa, habilitando la interpolación y manteniendo los parámetros de resolución y tamaño inferidos de la nube. Es posible, no obstante, generar modelos con resoluciones menores.

Al finalizar el proceso, aparece en el espacio de trabajo el elemento del modelo digital de elevaciones (MDE o DEM), indicando su tamaño y resolución espacial estimada. Desde la barra de herramientas en la pestaña Orto también es posible acceder al DEM, a través del botón , donde se puede además activar o desactivar la opción de sombreado . En la Figura 33 se muestra la visualización del modelo digital de elevaciones generado.

Con la opción en el menú de *Herramientas Crear contornos...*, se crean curvas de nivel, que se generan como formas vectoriales (*shapes*) en el espacio de trabajo, las cuales son exportables. El proceso se ilustra en la Figura 34, donde además se muestra el proceso de hacer mediciones sobre líneas, áreas y cortes a partir de formas insertadas con el menú de dibujo  en la vista *Modelo*. Posicionándose sobre las formas se selecciona la opción de *Medir* (con el botón derecho), se despliega la ventana de dialogo mostrada en la Figura 34.

El DEM se puede exportar en diversos formatos. Es común utilizar el formato ráster (Geo Tiff), el cual se puede generar presionando el botón derecho del ratón sobre la línea MDE, y seleccionando las opciones mostradas en la Figura 35. Otro formato puede ser el .kmz, para visualización en *Google Earth* (Figura 36).

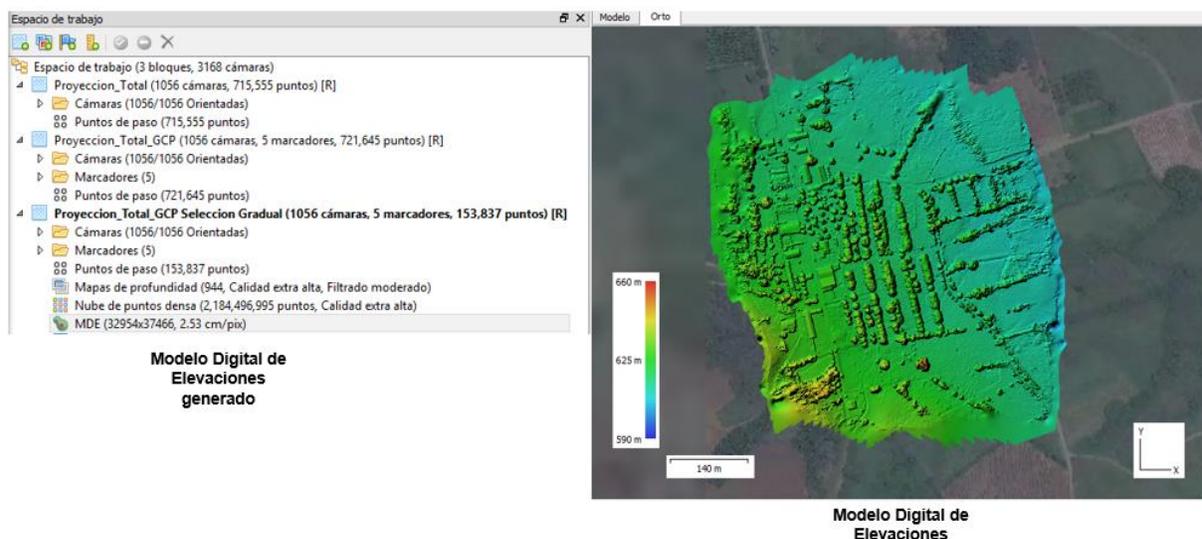


Figura 33. Visualización del modelo digital de elevaciones generado.

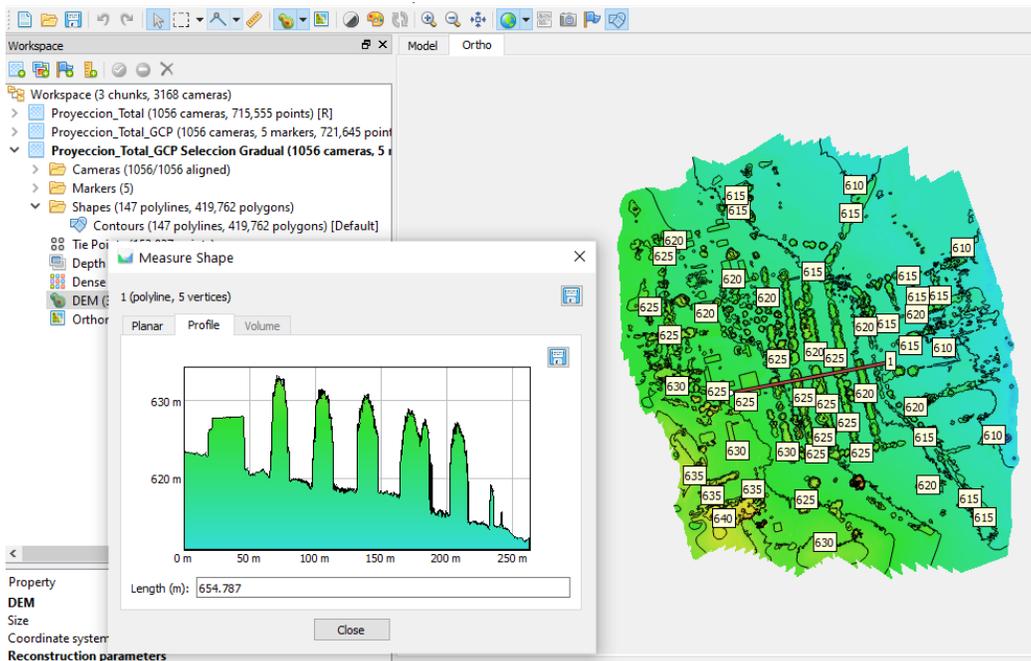


Figura 34. Creación de formas y curvas de nivel en el modelo de elevación digital.

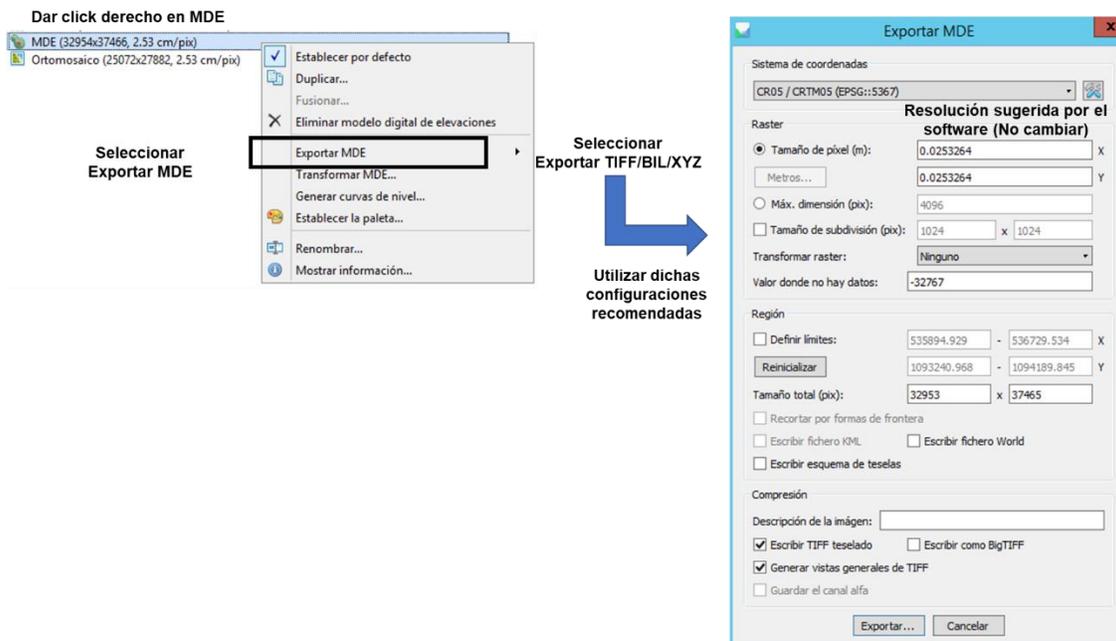


Figura 35. Ventana de configuración para exportar el modelo digital de elevaciones.

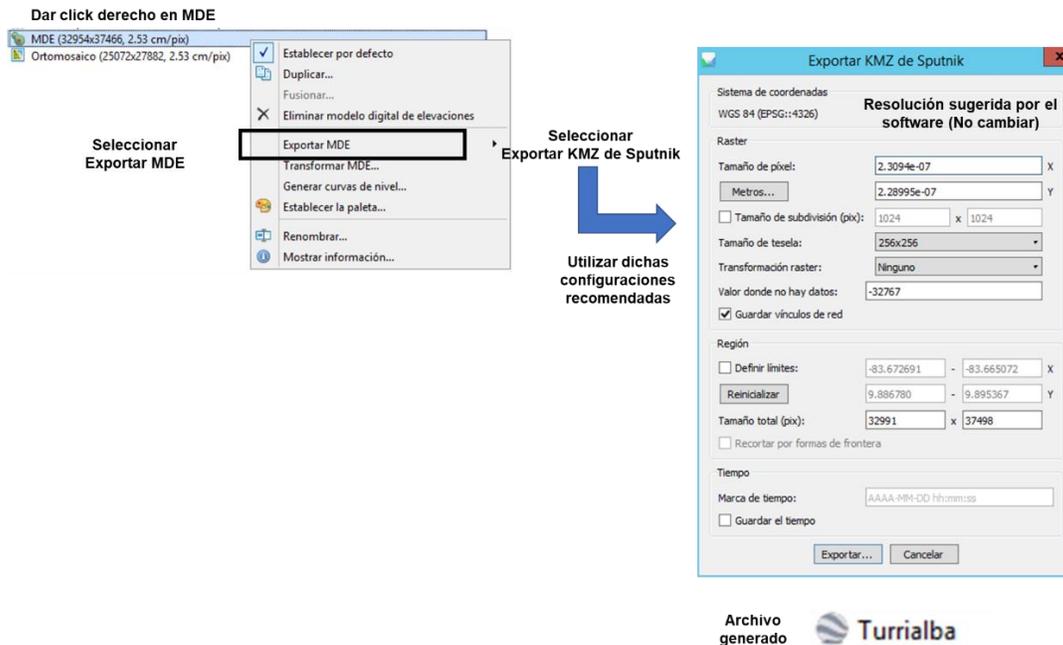


Figura 36. Proceso para generar el archivo KMZ, para visualización en el software de Google Earth.

El ortomosaico se crea y exporta de manera muy semejante al DEM. En el menú *Flujo de trabajo* se ubica el proceso llamado *Crear ortomosaico...* (Figura 37). El modelo de superficie en la proyección de coordenadas utilizadas constituye la opción más común, dejando los espacios de resolución en los valores autocompletados para preservar la máxima resolución. Es posible exportar una subregión regular con las opciones en la sección inferior de la ventana.

En el proceso se escogen, entre las imágenes disponibles, las secciones proyectadas que mejor reconstruyen el mosaico, resultando el producto mostrado en la Figura 38. Estos segmentos se pueden observar si se grafican las porciones de las imágenes y las líneas divisorias (*Crear líneas de costura o seamlines*). Esta opción se ubica en el menú de *Herramientas, Ortomosaico*. Las líneas son almacenadas como formas exportables en el menú respectivo (Figura 39).

Exportar el ortomosaico en formato ráster requiere ubicarse en el espacio de trabajo, sobre la opción *Ortomosaico* y mediante el botón derecho del ratón se despliega un menú con la opción *Exportar ortomosaico*; luego, se selecciona *Exportar JPEG/TIFF/PNG para exportar en formato Geo TIFF (ráster)*, de acuerdo con la Figura 40. La opción de exportar en formato .KMZ se muestra en la Figura 41 y el resultado en la Figura 42.

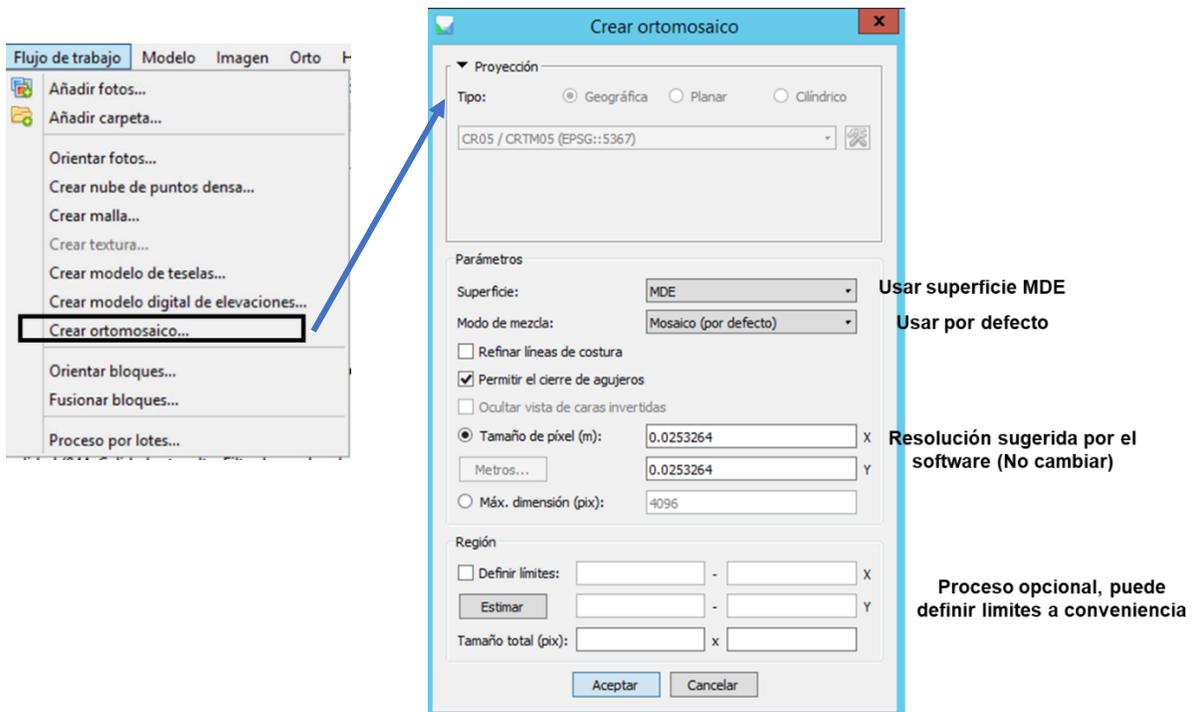


Figura 37. Ubicación de pestaña y ventana de diálogo para la generación del ortomosaico.

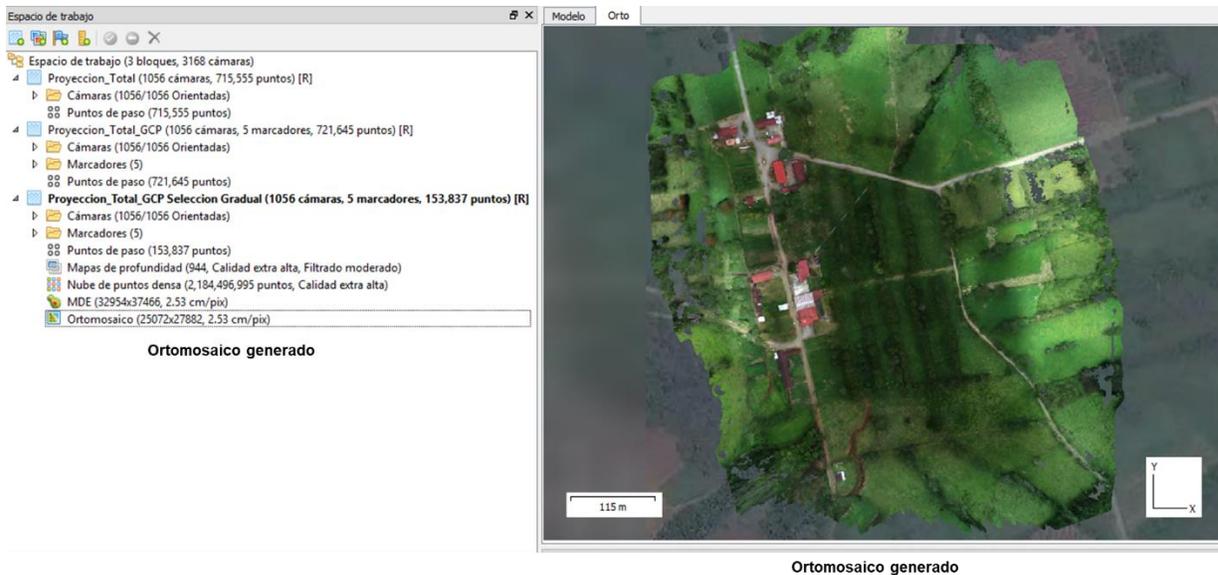


Figura 38. Visualización de un ortomosaico generado.



Figura 39. Ejemplo de visualización de un ortomosaico con líneas divisorias de reconstrucción (líneas de costura).

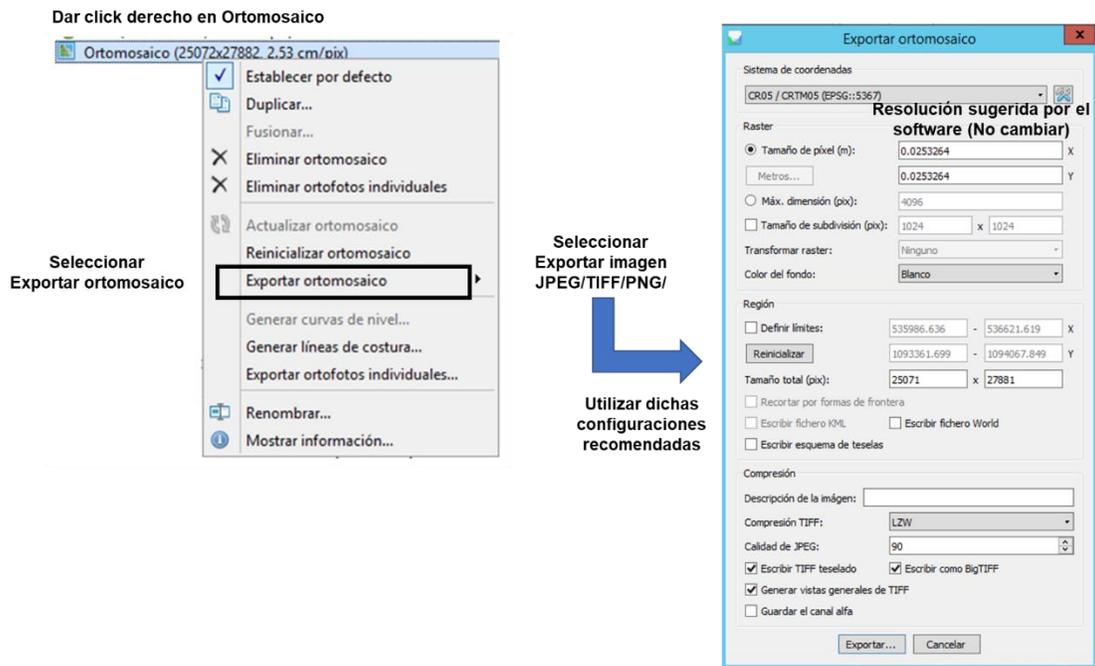
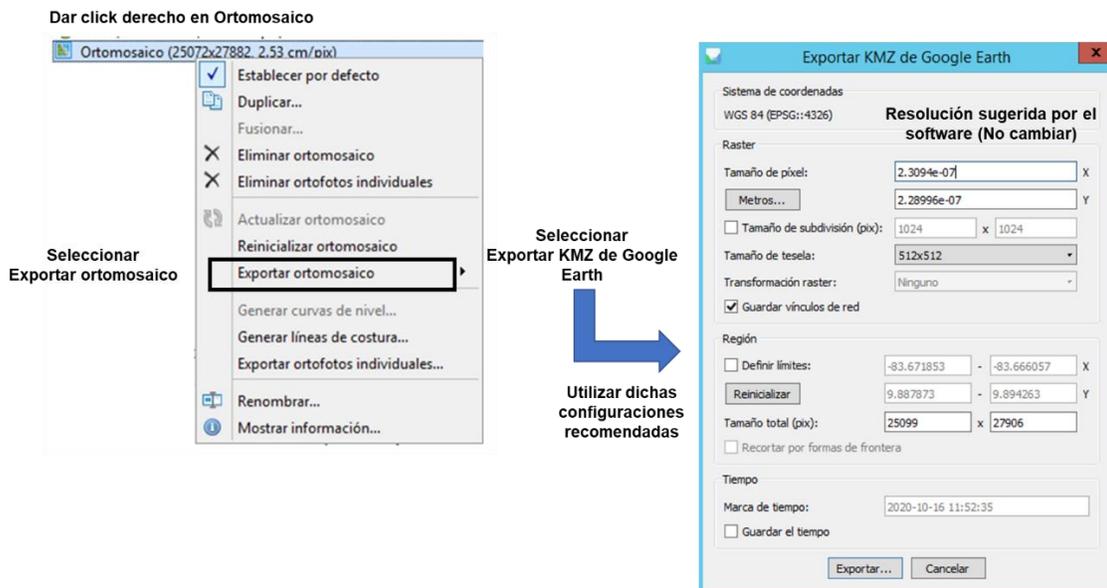


Figura 40. Ventana de configuración para exportar el ortomosaico.



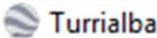
Archivo generado 

Figura 41. Proceso para exportar ortomosaico como archivo .KMZ para Google Earth.



Figura 42. Visualización del ortomosaico exportado a *Google Earth*.

4.7. Creación de Modelos de Elevación del Terreno

Para análisis de cobertura vegetal es conveniente tener un modelo de elevación del terreno (DTM, del inglés *Digital Terrain Model*), el cual es semejante a un DEM, pero considerando únicamente el nivel del suelo, sin vegetación u otras estructuras que puedan estar en la escena. Aunque un DTM preciso puede requerir la utilización de otras técnicas como escaneo láser, con fotogrametría es posible aproximar un modelo siempre y cuando partes del nivel de suelo sean visibles en el set de imágenes.

Agisoft Metashape brinda la opción de crear un DTM con la función de reclasificación en el menú de *Herramientas, Nube de puntos densa, Clasificar puntos del terreno...* En este proceso se asignan los puntos de la nube que se identifican como puntos de suelo a una clase llamada *Terreno*. El proceso es controlado con los siguientes parámetros, los cuales se deben ajustar iterativamente según la escena:

Angulo máximo: define el límite de inclinación entre puntos asignados como suelo, representando la pendiente máxima presente en la escena.

Distancia máxima: determina la distancia entre un punto y el modelo de terreno, definiendo un límite en la variación máxima del nivel de suelo.

Tamaño de celda: determina el tamaño de la celda en que se subdivide la nube de puntos para la clasificación y debe ser indicada considerando el área mayor en la escena donde el suelo no es visible.

La Figura 43 muestra la ventana de diálogo y el resultado de una clasificación de puntos para la generación del DTM. El proceso de clasificación es intensivo en recursos de cómputo, por lo que se recomienda considerar reducir el tamaño de la nube de puntos antes de iniciar. El modelo mostrado en la Figura 43 se generó a partir de una nube creada con resolución media.

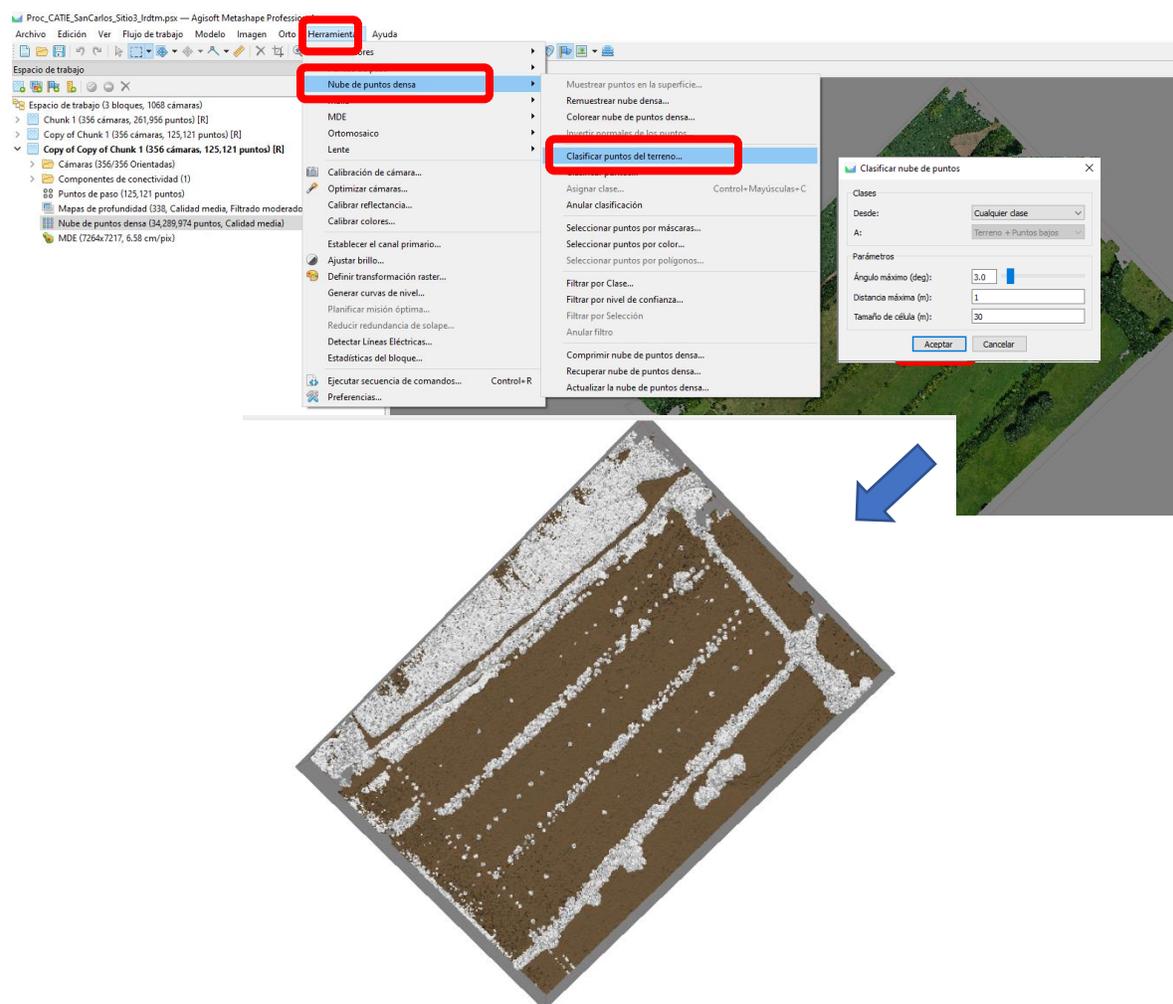


Figura 43. Proceso de reclasificación de la nube de puntos densa para encontrar los puntos del terreno o nivel bajo. Los puntos en color café en la nube reclasificada corresponden a las zonas identificadas como terreno.

El proceso para la generación del DTM, y eventual exportación, es exactamente el mismo que para el DEM, con la única diferencia de que la nube fuente que se debe seleccionar corresponde a la nube de puntos reclasificada, como se muestra en la Figura 44.

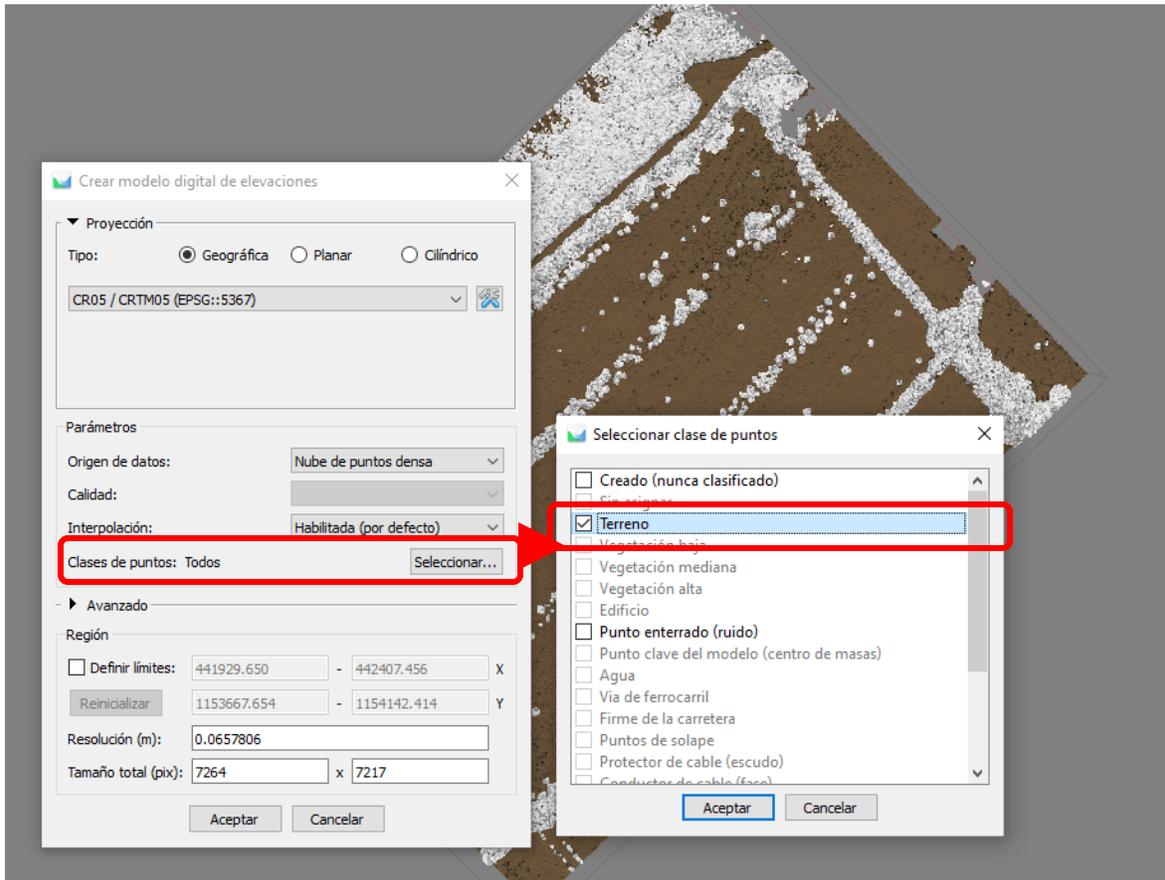
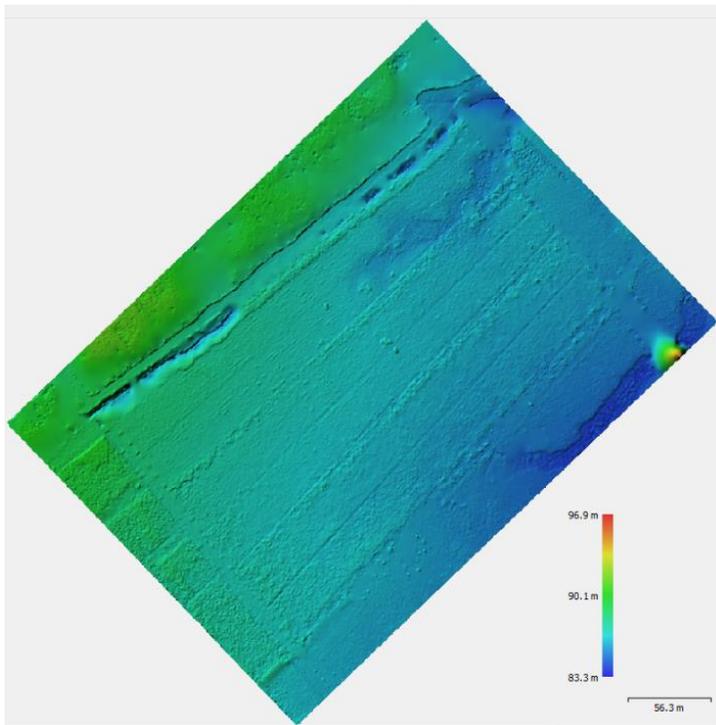


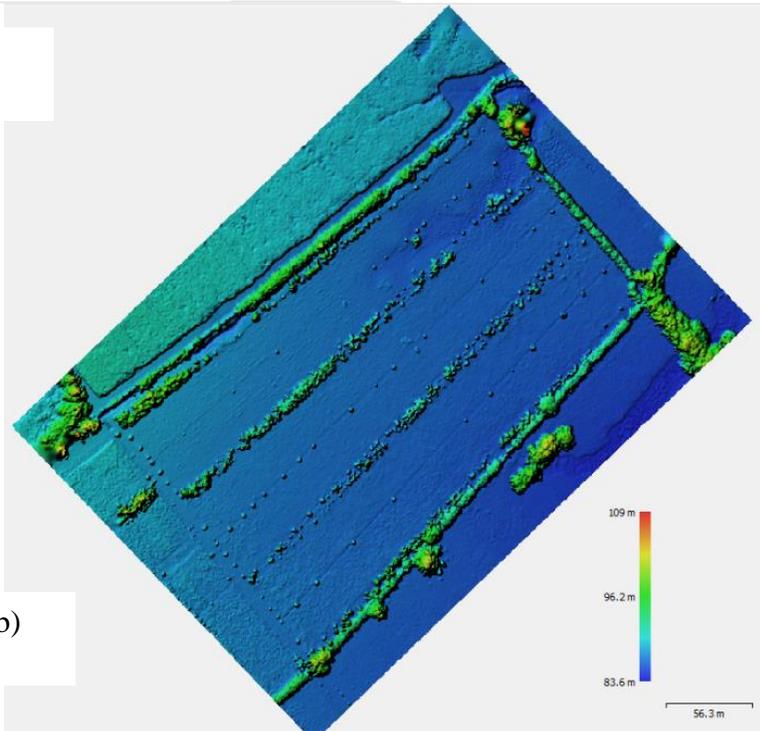
Figura 44. Creación del modelo de elevación del terreno. Se debe especificar la clase de puntos para seleccionar únicamente los puntos de terreno como fuente para construir el modelo.

En la Figura 45 se muestra el resultado del DTM generado, en comparación al DEM, donde se observa que se elimina la mayor parte de la cobertura, a pesar de que la extrapolación en esas áreas puede resultar poco precisa.

Si la clasificación automática no funciona bien luego del ajuste de los parámetros, los puntos se pueden asignar manualmente con las opciones de edición y clasificación de puntos en el menú de *Herramientas, Nube de puntos densa* [20].



(a)



(b)

Figura 45. Comparación del modelo de elevación del terreno (a), versus el modelo de elevación digital general (b). Se observa que en el DTM se remueve la mayor parte de la cobertura vegetal y se interpola el nivel de suelo para esas áreas de forma aproximada.

5. Introducción al posprocesamiento de productos fotogramétricos con QGIS

Diversas herramientas y paquetes de sistemas de información geográfica (SIG) puede ser utilizados para el manejo de los productos fotogramétricos como capas ráster y/o vectoriales. Dentro de ellos, la herramienta de código abierto *QGIS* [21] permite el manejo de este tipo de modelos para que se pueda extraer información de manera más conveniente. En esta guía se introduce brevemente al manejo de los productos fotogramétricos exportados desde *Agisoft Metashape*. En el Apéndice A.2 se brinda una guía rápida de instalación del paquete QGIS.

Al iniciar la herramienta por defecto tiene el sistema de coordenadas WGS-84, lo que se debe cambiar al sistema de proyección que se desee. En el caso de Costa Rica se utiliza el sistema CRTM/CR05, que se puede configurar en la esquina inferior: el sistema por defecto aparece como *ESPG:4326* y para cambiarlo se presiona el botón izquierdo del ratón sobre el sistema para abrir la pantalla llamada *Propiedades del proyecto – SRC*. En la opción llamada *Filtro* digite *CRTM05*, luego seleccione el sistema de coordenadas proyectadas *CR05/CRTM05 EPSG:5367* y para guardar los cambios pulse el botón *Aplicar* y luego *Aceptar*. En la Figura 46 se muestra la configuración del sistema de proyección en el software QGIS.

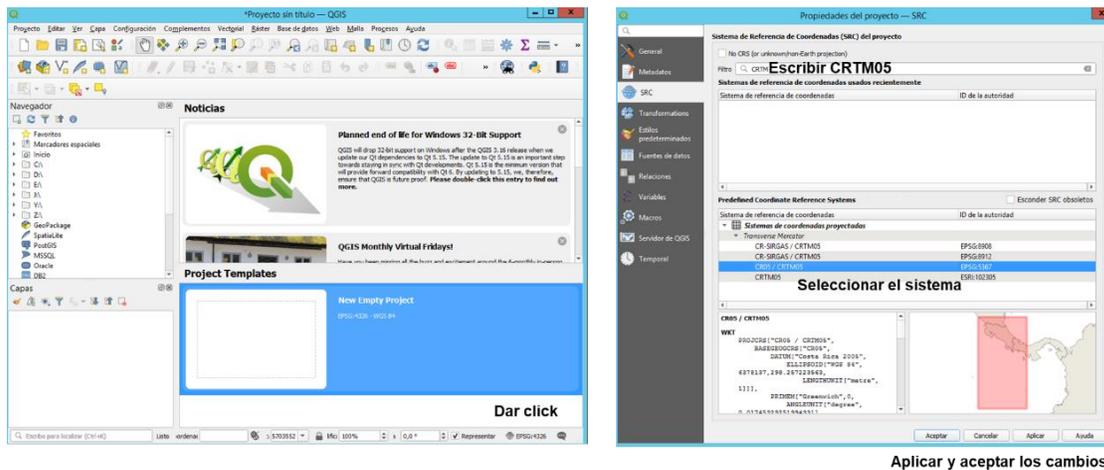


Figura 46. Configuración del sistema de proyección en QGIS.

Para el análisis de perfiles de terreno a partir de DEMs es necesario instalar el complemento llamado *Profile tool*, el cual se identifica en la barra de herramientas con el icono , como se indica en la Figura 47.

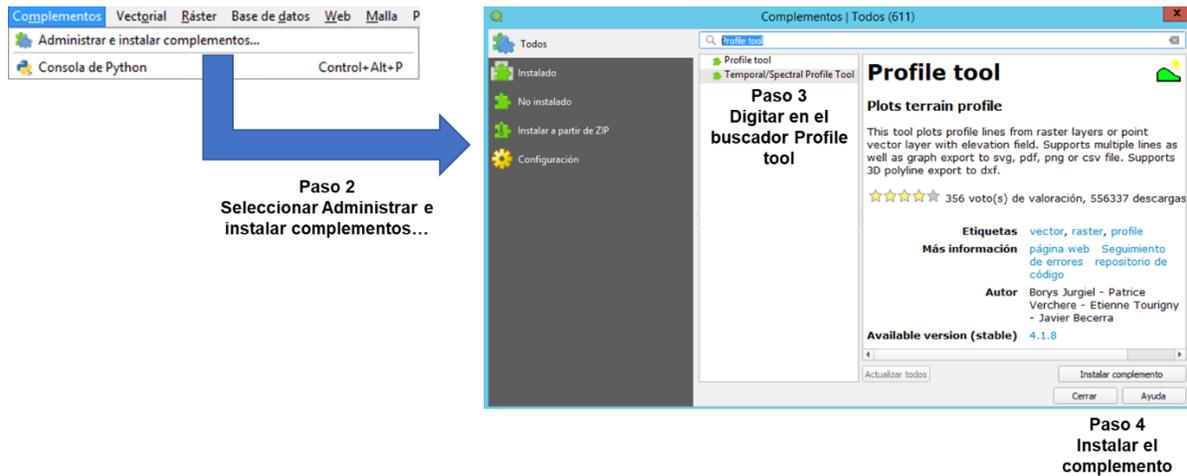


Figura 47. Proceso de instalación del complemento para generación de perfiles (*Profile tool*) en QGIS.

Para importar capas ráster, se arrastra el archivo exportado desde *Agisoft Metashape* hasta la sección de la pantalla llamada capas (sección izquierda inferior). En la Figura 48 se muestra el proceso para importar un mapa tipo ráster dentro del software QGIS.

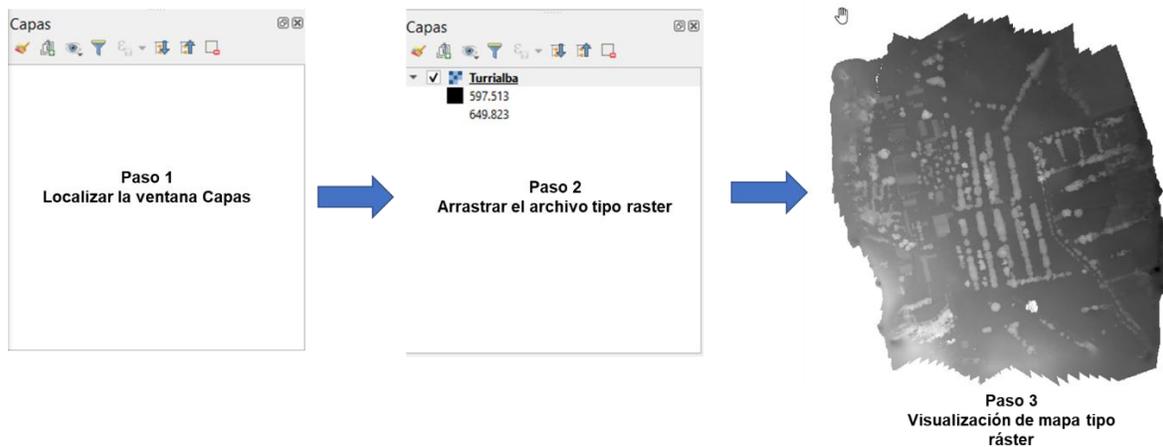


Figura 48. Visualización del proceso para importar el mapa tipo ráster dentro de QGIS.

Para analizar perfiles, hacer recortes o ediciones de las capas ráster, se definen las máscaras en capas vectoriales. Para la creación de una capa vectorial se utiliza el icono , el cual despliega una pantalla de configuración. En este caso se crea una capa de línea, llamada corte, para estudiar perfiles sobre el DEM (Figura 49).

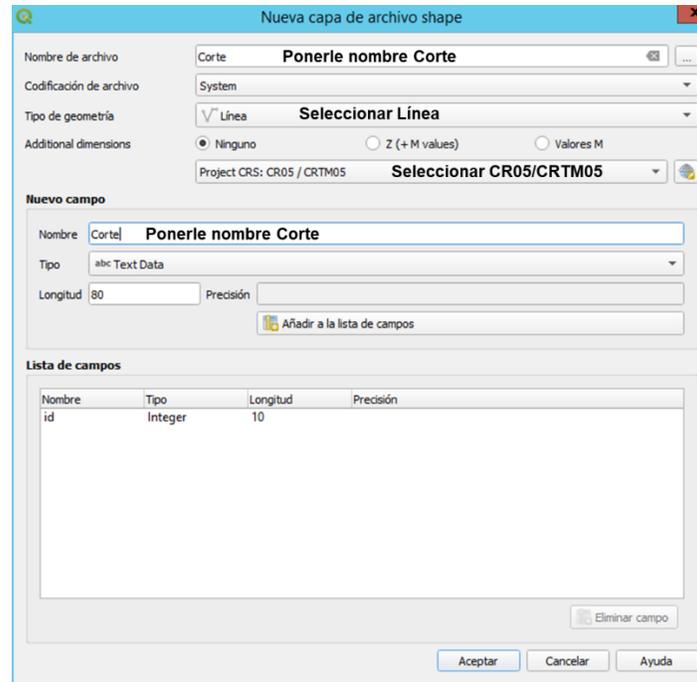


Figura 49. Visualización de la configuración de la capa vectorial.

Al configurar la capa vectorial ahora es posible generar el proceso de edición que permite establecer los límites dentro del mapa que desea analizar. Para ello, en la barra de herramientas se habilita el icono de edición . Una vez que sea seleccionado, se debe utilizar el icono de trazado , que habilita dentro del mapa ráster un cursor que permite trazar líneas. Para completar la línea se debe presionar el botón izquierdo del ratón, con lo que se despliega una ventana para asignarle un identificador a la forma (Figura 50).

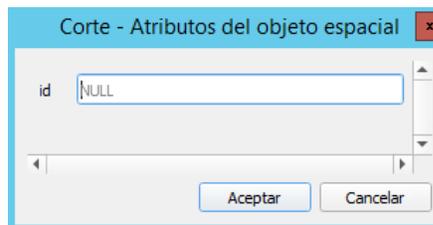


Figura 50. Atributo espacial de la línea creada con el nombre Corte.

Para finalizar la edición de la capa, se desactiva el icono de edición , y se confirma la acción guardando las modificaciones realizadas (Figura 51).

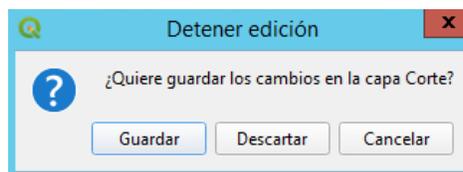


Figura 51. Ventana para guardar la edición de la línea creada en la capa vectorial llamada Corte.

Para realizar un análisis del perfil, a manera de ejemplo, se debe seleccionar la capa del DEM dentro de la herramienta de perfil de terreno. Primero se abre el complemento de perfiles , con lo que se despliega una ventana llamada *Profile tool*. En dicha ventana se incluye la capa del DEM, se toma la capa vectorial creada, y se enlaza la línea con el perfil a analizar. Este proceso se ilustra en la Figura 52.

De forma semejante, otras capas ráster se pueden importar, como ortomosaicos, sobre las cuales se pueden realizar diversas operaciones. Las capas ráster se pueden editar, manipular, y hacer cálculos con ellas para extraer diferentes tipos información. Por ejemplo, para recortar una sección de un modelo ráster, se puede crear o importar una capa vectorial adicional a la capa ráster con un polígono o forma arbitraria, y generar una nueva capa únicamente conteniendo el área dentro de la forma. Para esto se recurre al menú de *Raster, Extracción*, con la operación *Clip*.

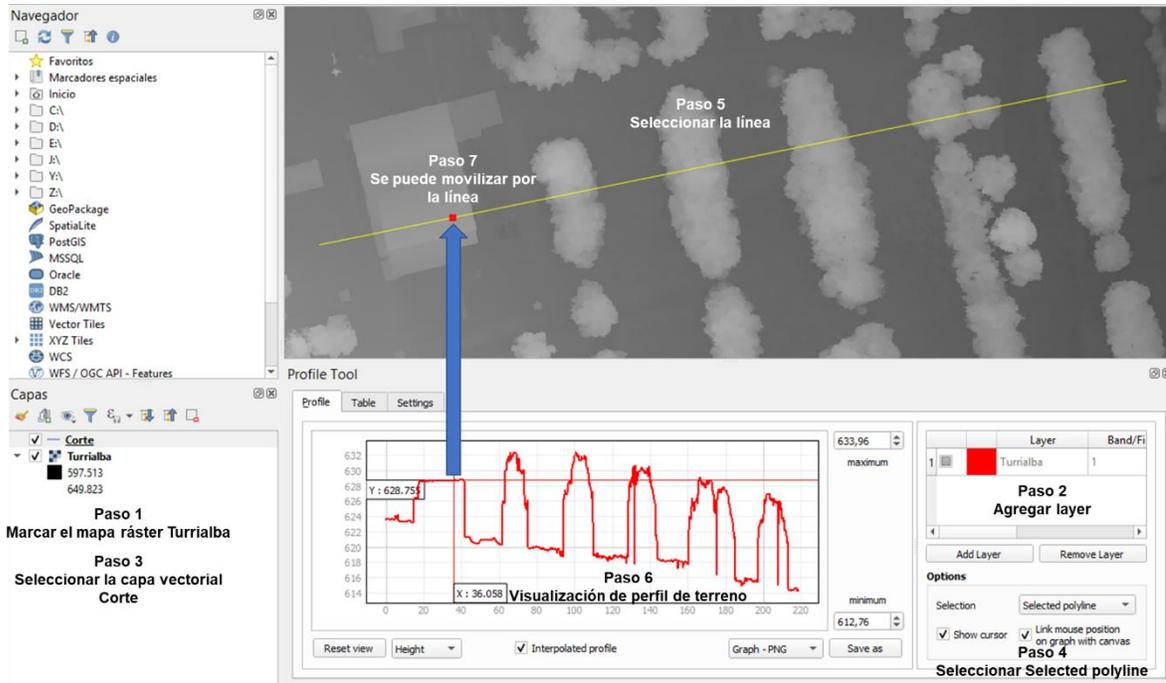


Figura 52. Procedimiento para visualización de perfil de elevación en el software QGIS.

Agradecimientos

Entre los socios de financiación que han apoyado esta investigación están: Programa de Investigación de CGIAR sobre Bosques, Árboles y Agroforestería (CRP-FTA), con el apoyo financiero del Fondo del CGIAR y el CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza).

Esta investigación fue realizada por el CATIE como parte del Programa de Investigación de CGIAR sobre bosques, árboles y agroforestería (CRP-FTA). El objetivo del programa es mejorar el manejo y uso de los bosques, agroforestería y los recursos genéticos de los árboles a lo largo del paisaje, desde bosques hasta plantaciones. El CATIE forma parte del programa CRP-FTA en asociación con Bioversity, CIRAD, CIFOR, CIAT, INBAR, TROPENBOS y el ICRAF.

Los autores desean agradecer la asistencia de María Marta Mora Rivas y Carlos Gómez Salazar, del Instituto Geográfico Nacional (IGN), por la asistencia con el levantamiento de los puntos de referencia en el CATIE y las recomendaciones para el adecuado levantamiento de los puntos de control y su enlace con la red GNSS del IGN.

Se hace extensivo el agradecimiento para las personas que colaboraron en facilitar los sitios explorados para generar esta guía, especialmente al Dr. Milton Villareal y a la Escuela de Agronomía del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Santa Clara, San Carlos, al Sr. Eduardo Arata, propietario de la Finca el Quebracho y para Francis Delannoy en San Pedro de Turubares. A Nicolás Garita Sequeira y Christian Monge Mora se les agradece la asistencia con la ubicación de los puntos de control.

Bibliografía

- [1] H. Shakhathreh et al., "**Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges**," in IEEE Access, vol. 7, pp. 48572-48634, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.
- [2] G. Battsengel, S. Geetha, and J. Jeon, "**Analysis o Technological Trends and Technological Protfolio of Unmanned Aerial Vehicle**", Journal of Open Innovation, Technology, Market and Complexity, 6 48, 2020. doi:10.3390/joitmc6030048
- [3] M. Pepe, L. Fregonese, and M. Scaioni, "**Planning airborne photogrammetry and remote sensing missions with modern platforms and sensors**," European Journal of Remote Sensing, vol 51, no. 1, 412-436, 2018. DOI: 10.1080/ 22797254.2018.1444945
- [4] B. P. Wrobel, "**The Evolution of Digital Photogrammetry from Analytical Photogrammetry**," in Photogrammetric Record, vol. 13, no. 77, p. 765-776, April 1991.
- [5] A. Eltner and G. Sofia, "**Structure from motion photogrammetric technique**," Developments in Earth Surface Processes, vol. 23, chapter 1, March 2020. DOI: 10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1
- [6] H. Obanawa, "**Quantitative Measurement of the Topographic Change at Overhanging Sea Cliff with Small UAV Survey System**," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, pp. 4684–4687, 2015, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326874.
- [7] A. Stumpf, J. P. Malet, P. Allemand, M. Pierrot-Deseilligny, and G. Skupinski, "**Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion**," *Geomorphology*, vol. 231, pp. 130–145, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.geomorph.2014.10.039.
- [8] Sergio Arriola-Valverde, Luis Carlos Villalobos-Avellán, Karolina Villagra-Mendoza, Renato Rimolo-Donadio, "**Erosion Quantification in Runoff Agriculture Plots by Multitemporal High-Resolution UAS Digital Photogrammetry**", Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing IEEE Journal of, vol. 13, pp. 6326-6336, 2020. Doi: [10.1109/JSTARS.2020.3027880](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3027880)
- [9] S. Arriola-Valverde, K. Villagra-Mendoza, M. Méndez-Morales, N. Gómez-Calderón, M. Solórzano-Quintana, and R. Rimolo-Donadio, "**Analysis of crop dynamics through close-range UAS photogrammetry**," in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.: FoodCAS Track*, Seville, Spain, Oct. 10-21, 2020. Doi: [10.1109/ISCAS45731.2020.9181285](https://doi.org/10.1109/ISCAS45731.2020.9181285)
- [10] D. C. Tsourous, S. Bibi, and P. G. Sarigiannidis, "**A Review of UAV-Based Applications for Precision Agriculture**," Information, 2019, 10 249, doi:10.3390/info10110349

- [11] Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Morais, R. (2017). **“UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications,”** *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2349–2391. doi:10.1080/01431161.2017.1297548
- [12] DJI, Ground Station Pro. Disponible en línea: <https://www.dji.com/ground-station-pro>
- [13] Agisoft, Metashape Professional 1.7.3. Disponible en línea: <https://www.agisoft.com/>
- [14] DJI GS PRO. **User Manual**, V2.0, 2018.11, disponible en línea: <https://www.dji.com/ground-station-pro/info>
- [15] M. Röder, S. Hill, and H. Latifi, **“Best practice tutorial: Technical handling of the UAV ‘DJI Phantom 3 Professional’ and processing of the acquired data,”** University Würzburg, Würzburg, Germany, Tech. Rep., Apr. 2017, doi: [10.13140/RG.2.2.36355.91680](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36355.91680).
- [16] G. Soares, L. Campos-Inocencio, M. R. Veronez, L. G. da Silveira, F. Bordin, and F. P. Marson, **“Analysis of Positional and geometric accuracy of objects in survey with unmanned aerial vehicles (UAV),”** in *Proc. IEEE Int. Symp. Geosci. Remote Sens.*, Jul. 2018.
- [17] Geomax, Hexagon Group. **Receptor GNSS. Serie Zenith 25 Pro.** Ficha Técnica. Empresa fabricante: <https://geomax-positioning.com/>
- [18] Instituto Geográfico Nacional, **Red de estaciones de referencia de operación continua (GNSS) del Registro Nacional.** Accesible en Línea: http://www.registronacional.go.cr/instituto_geografico/enlaces.htm
- [19] Agisoft. Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.7, 2021. Disponible en línea: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf
- [20] Agisoft. Tutorial. Dense Cloud Classification, disponible en línea: <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000148866>
- [21] **QGIS**, Un Sistema de información geográfica libre y de código abierto, disponible en línea: <https://www.qgis.org/es/site/>
- [22] Agisoft, Metashape Professional Edition, **“Requerimientos del sistema,”** 2020. Disponible en línea: <https://www.agisoft.com/downloads/system-requirements/>.

Apéndices

A.1. Instalación y configuración del software fotogramétrico Agisoft Metashape

En esta sección se introduce en detalle el flujo de instalación y configuración del software fotogramétrico *Agisoft Metashape Profesional* versión 1.7.3, el cual se describe para un sistema operativo Windows. No obstante, el software fotogramétrico puede ser instalado en sistemas operativos alternativos tales como MacOS y Linux; la información de dichos instaladores puede ser descargada en este enlace:

<https://www.agisoft.com/downloads/installer/> .

Proceso de instalación del software fotogramétrico

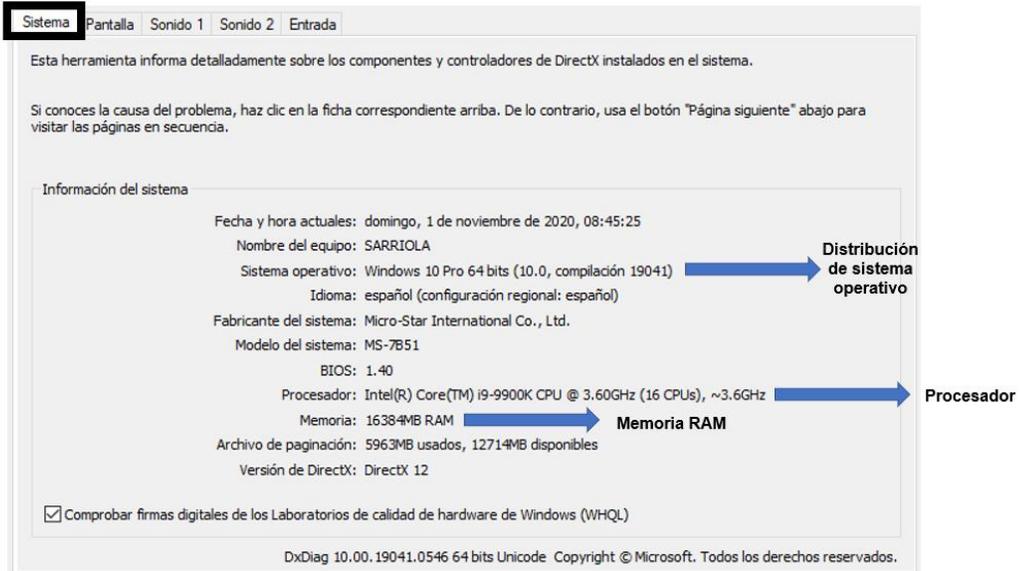
Para una correcta instalación del software fotogramétrico Agisoft Metashape se recomienda seguir los siguientes procesos.

1. Para llevar a cabo los procesamientos fotogramétricos, el fabricante del software recomienda tres diferentes configuraciones de hardware mínimas, las cuales son descritas en [22]. Revise que su configuración soporta bien la aplicación.

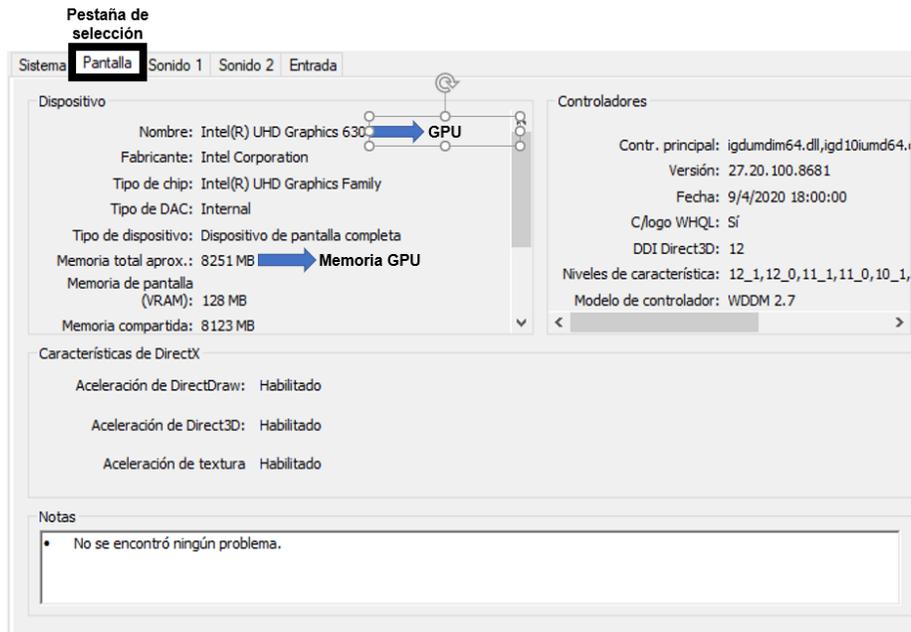
Puede verificar las especificaciones de su computador en el ambiente de Windows localizando en el menú de inicio o búsqueda, digitando el comando "*dxdiag*". Con esto debe aparecer la configuración de su computador según se ilustra en la Figura A.1.

2. Se descarga el archivo de instalación en este enlace; al ingresar es necesario seleccionar la versión *Agisoft Metashape 1.7.3 Professional Edition*, (en este caso será Windows).
3. Proceda a ubicar el archivo de descarga llamado *Metashape-pro_1_7_3_x64* (si su computadora es de 64 bits). Al abrirlo, siga las instrucciones y además acepte el acuerdo de licenciamiento según se muestra en la Figura A.2.
4. Una vez finalizada la instalación localice el botón de inicio de Windows , utilice el teclado e introduzca el nombre del programa *Agisoft Metashape Profesional* y proceda en abrir el software. Si no posee algún tipo de licenciamiento, aparece una ventana tipo *cmd*, la cual indica "*No license found*"; sin embargo, el software le permite utilizar un modo de evaluación por un periodo de 30 días (esta evaluación permite un uso al 100% del software). La Figura A.3 describe el formato de uso según su condición.

Pestaña de selección

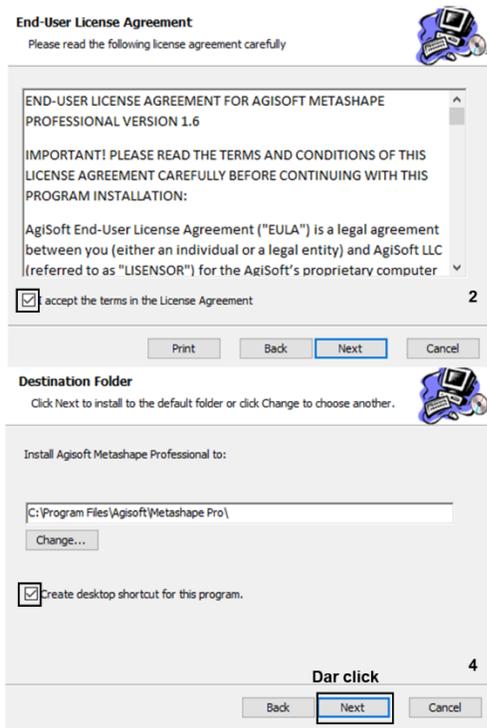
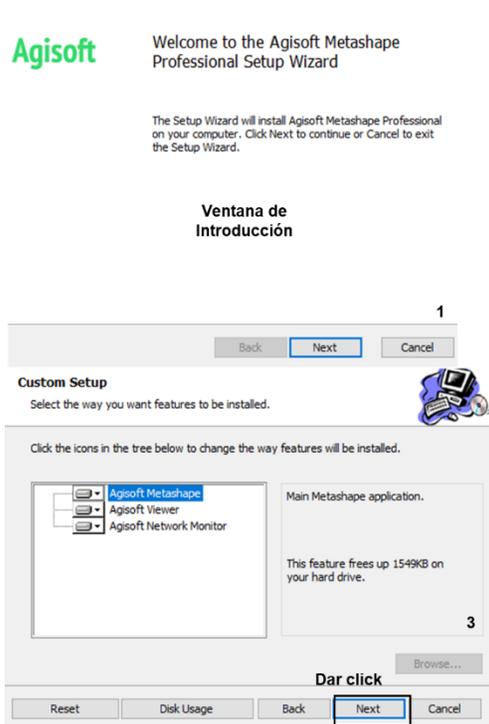


a)



b)

Figura A.1. Visualización del arreglo de hardware de un computador en el entorno de Windows: a) descripción del sistema, b) descripción del adaptador de pantalla.



Completed the Agisoft Metashape Professional Setup Wizard

Click the Finish button to exit the Setup Wizard.



Figura A.2. Proceso de instalación del software fotogramétrico Agisoft Metashape Professional versión 1.6.5

Proceso de configuración del software fotogramétrico

Aunque la tecnología en sistemas aéreos no tripulados ha evolucionado con sistemas de posicionamiento global más precisos, en algunos casos, según el fabricante, es necesario hacer un ajuste en la altura de captura de imágenes debido a que el registro del metadato de la imagen puede estar referido a un valor inadecuado. Los pasos que se explican a continuación permiten corregir el parámetro de altura de vuelo en los metadatos de las imágenes obtenidos con sensores pasivos de imagen RGB del fabricante DJI.

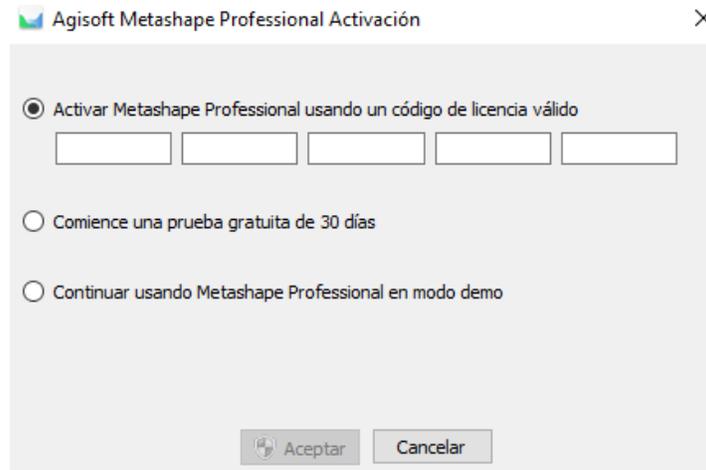


Figura A.3. Ventana para la selección de modalidad según la condición que tenga el usuario para utilizar el software.

1. Una vez instalado el software fotogramétrico *Agisoft Metashape Profesional* versión 1.7.3, favor descargue los scripts de Python provenientes de este enlace: <https://github.com/agisoft-llc/metashape-scripts>
(NOTA: Por conveniencia cierre el software para llevar a cabo este proceso).
2. Al haber descargado los scripts, proceda a descomprimir el archivo llamado *Agisoft_Scripts-main.zip* y localícelo en su Computador.
3. Al descomprimir el archivo encontrará una carpeta llamada *Scripts* la cual contiene 14 scripts elaborados en el lenguaje interpretado Python.
4. Para habilitar el menú llamado *Custom menu* con los scripts en Python, ubique la dirección de instalación del software fotogramétrico *Agisoft Metashape Profesional* (por defecto el software se instala en la ruta C:\Program Files\Agisoft\ Metashape Pro). Dentro de esa ruta debe crear un folder llamado *scripts*, donde moverá los 14 scripts. Es posible que el equipo solicite permisos de administrador para realizar el movimiento de los scripts.
5. Al crear la carpeta *scripts* con el contenido de los 14 scripts deberá ver la organización de carpetas que se muestra en la Figura A.4.
6. Vuelva al menú de inicio y localice el software *Agisoft Metashape Profesional*, ábralo, y verifique que en la ventana principal aparece una pestaña llamada

Custom menu, la cual contiene los scripts de Python. En la Figura A.5 se muestra la pestaña del *Custom menu* activada en el software.

| Nombre | Fecha de modificación | Tipo | Tamaño |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------|
| geoids | 1 nov. 2020 09:32:p. m. | Carpeta de archivos | |
| help | 1 nov. 2020 09:32:p. m. | Carpeta de archivos | |
| lang | 1 nov. 2020 09:32:p. m. | Carpeta de archivos | |
| licenses | 1 nov. 2020 09:32:p. m. | Carpeta de archivos | |
| modules | 1 nov. 2020 09:32:p. m. | Carpeta de archivos | |
| plugins | 1 nov. 2020 09:32:p. m. | Carpeta de archivos | |
| python | 1 nov. 2020 09:32:p. m. | Carpeta de archivos | |
| scripts | 1 nov. 2020 10:38:p. m. | Carpeta de archivos | |
| crashreporter | 30 sep. 2020 11:03:a. m. | Aplicación | 236 KB |
| crashreporter | 30 sep. 2020 11:00:a. m. | Opciones de confi... | 4 KB |
| D3DCompiler_43.dll | 26 may. 2010 11:41:a. m. | Extensión de la ap... | 2 467 KB |
| eula | 30 sep. 2020 11:01:a. m. | Formato de texto ... | 13 KB |
| ftd2xx.dll | 19 sep. 2017 04:46:p. m. | Extensión de la ap... | 308 KB |
| libEGL.dll | 5 ago. 2019 11:33:a. m. | Extensión de la ap... | 15 KB |
| libGLSv2.dll | 5 ago. 2019 11:33:a. m. | Extensión de la ap... | 1 962 KB |
| libgmp-10.dll | 3 mar. 2011 05:36:p. m. | Extensión de la ap... | 531 KB |
| libopenblas.dll | 8 nov. 2019 02:12:p. m. | Extensión de la ap... | 28 096 KB |
| metashape | 30 sep. 2020 11:58:a. m. | Aplicación | 88 253 KB |
| monitor | 30 sep. 2020 12:03:p. m. | Aplicación | 14 173 KB |
| opengl32sw.dll | 25 sep. 2014 02:28:p. m. | Extensión de la ap... | 17 182 KB |
| python35.dll | 5 ago. 2019 10:59:a. m. | Extensión de la ap... | 3 831 KB |
| qt.conf | 30 sep. 2020 12:08:p. m. | Archivo CONF | 1 KB |
| Qt5Core.dll | 5 ago. 2019 11:34:a. m. | Extensión de la ap... | 5 527 KB |
| Qt5Gui.dll | 5 ago. 2019 11:36:a. m. | Extensión de la ap... | 5 985 KB |
| Qt5Multimedia.dll | 5 ago. 2019 11:44:a. m. | Extensión de la ap... | 707 KB |
| Qt5MultimediaWidgets.dll | 5 ago. 2019 11:44:a. m. | Extensión de la ap... | 99 KB |
| Qt5Network.dll | 5 ago. 2019 11:35:a. m. | Extensión de la ap... | 1 046 KB |
| Qt5OpenGL.dll | 5 ago. 2019 11:39:a. m. | Extensión de la ap... | 317 KB |
| Qt5PrintSupport.dll | 5 ago. 2019 11:39:a. m. | Extensión de la ap... | 313 KB |
| Qt5SerialPort.dll | 5 ago. 2019 11:40:a. m. | Extensión de la ap... | 74 KB |
| Qt5Svg.dll | 5 ago. 2019 11:40:a. m. | Extensión de la ap... | 311 KB |

Figura A.4. Organización final del folder de Agisoft Metashape Profesional con los scripts de Python.



Figura A.5. Pestaña de *Custom menu* habilitada en el software Agisoft Metashape Profesional versión 1.6.5.

Si posee GPU en su computador, se recomienda activar su uso para obtener un mejor rendimiento al momento de procesar imágenes dentro del software. Para ello ubique la pestaña llamada *Herramientas* y luego en la pestaña de GPU deberá aparecer el recurso disponible. Las opciones de GPU y CPU se pueden activar, lo cual hace que los procesamientos avancen más rápido. En la Figura A.6 se muestra la ventana de configuración del GPU en el software fotogramétrico.

Finalmente, es necesario definir la configuración avanzada dentro de la ventana de *Preferencias de Metashape*. En la Figura A.7 se muestra una configuración avanzada recomendada.

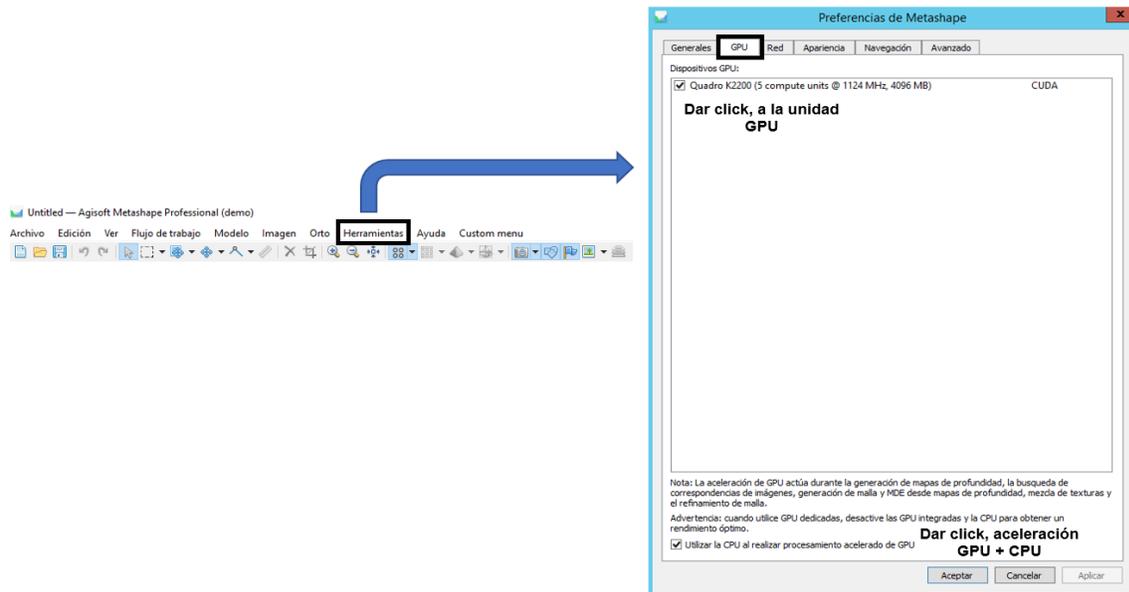


Figura A.6. Pestaña de configuración de la unidad GPU dentro del software Agisoft Metashape.

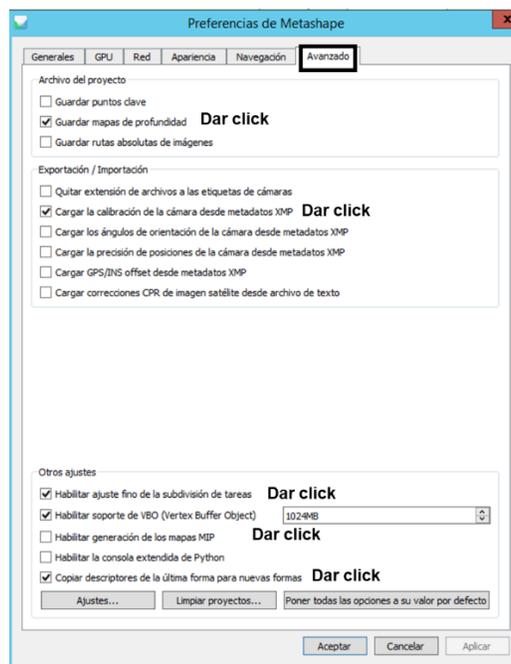


Figura A.7. Pestaña de configuración avanzada recomendada en Agisoft Metashape.

A.2. Guía de instalación del Software QGIS

Para la instalación de la herramienta QGIS se utiliza la distribución QGIS 3.16 Hannover. Dicha versión puede ser descargada de manera gratuita en este enlace:

<https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>

Es importante que tome en cuenta la distribución adecuada para su sistema, si es de 32 o 64 bits. En Windows, para verificar esto puede pulsar el botón de inicio  y escribir *dxdiag*; ahí podrá ver qué tipo de distribución requiere su computador. Para otros sistemas operativos también existen instaladores disponibles bajo el mismo enlace.

Una vez que abra el ejecutable en Windows verá la secuencia de pantallas que se muestran en la Figura A.8, y una al finalizar la instalación podrá ejecutar el software y verá la pantalla mostrada en la Figura A.9.

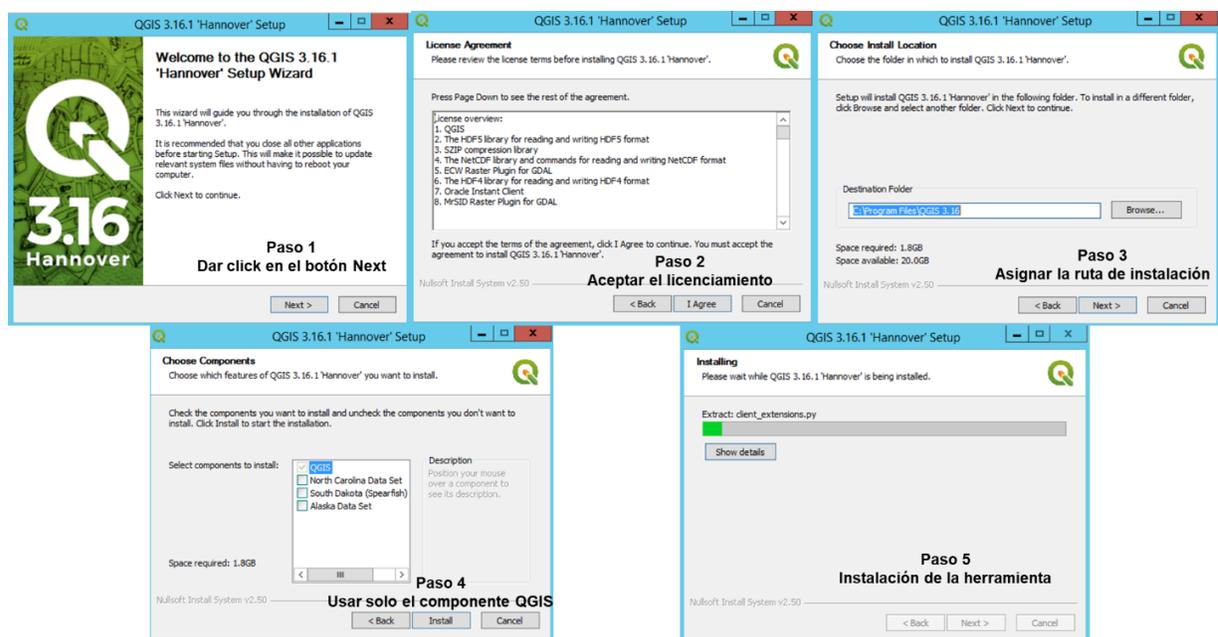


Figura A.8. Proceso de instalación en sistema operativo Windows del software QGIS 3.16.

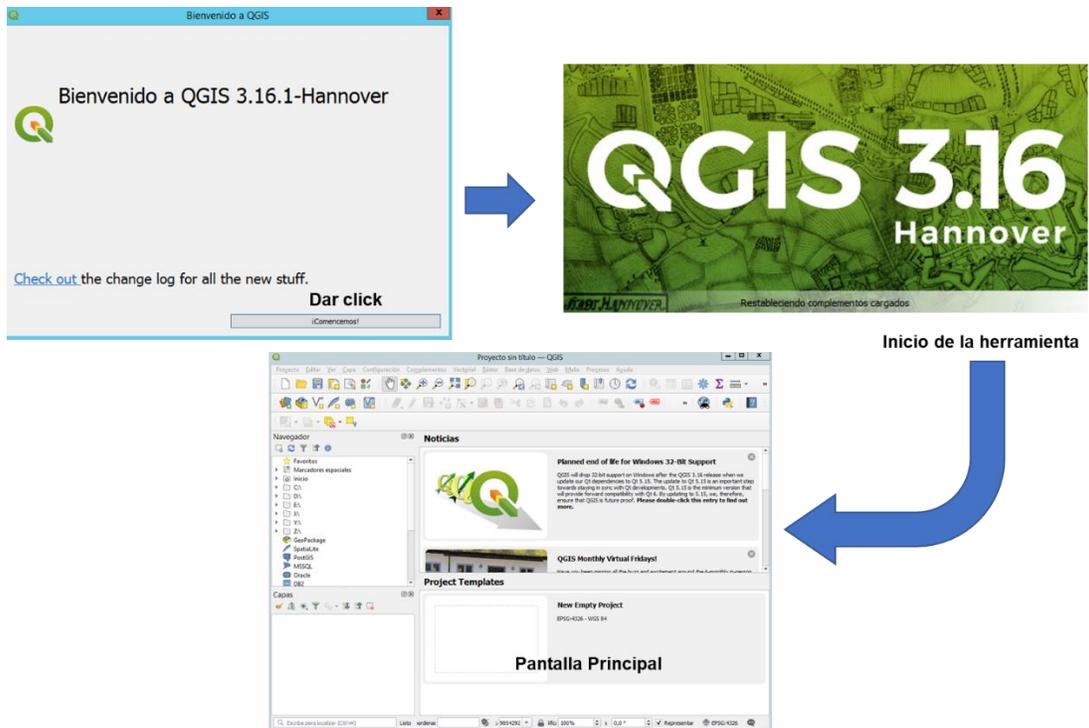


Figura A.9. Secuencia de inicio de QGIS 3.16 por primera vez en el sistema operativo de Windows.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).



Sede Central, CATIE
Cartago, Turrialba, 30501
Costa Rica
Tel. + (506) 2558-2000

