

A benchmark of the implementation of the SIFT in different softwares for 3D reconstruction of terrain surfaces from UAV images

Erika UPEGUI, Ph.D¹, Karen DUARTE, Ingeniera², Javier MEDINA, Ph.D¹

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Grupo GEFEM, GRSS-IEEE UD, Colombia, esupeguic@udistrital.edu.co, rmedina@udistrital.edu.co

² Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, karen_dj@hotmail.com

Abstract– In the last decade there has been a significant increase in the use of drones in various applications, among which are the generation of cartographic products. Different software process images captured from these aerial platforms, which due to their weight conditions and vehicle type present greater movements (linear and angular) than those that occur in manned aircraft used in conventional photogrammetry. These conditions are some of the characteristics of the SfM photogrammetry, together with the mathematical concepts that it uses, such as the SIFT transform. In order to compare the effectiveness of the software: Agisoft methashape ®; Pix4D mapper®; Drone2map ®, to implement the SIFT transform, a block with 167 images captured with a UAV TAROT 680 PRO, a low cost camera and supported by 3 GCP was processed to produce a digital surface model and an orthophotograph in each of the three software. The results shows that the three software reconstructed the volumetric of the terrain, although qualitatively and quantitatively the best results were obtained with the Agisoft metashape ® software that took longer time and generated the densest 3D point cloud.

Keywords– UAV-imagery, SIFT transform, SfM photogrammetry, Pix 4D, Agisoft, Drone2Map.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.159>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Comparación de la implementación de la SIFT en diferentes softwares para la reconstrucción 3D de superficies del terreno a partir de imágenes UAV

Erika UPEGUI, Ph.D¹, Karen DUARTE, Ingeniera², Javier MEDINA, Ph.D¹

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Grupo GEFEM, GRSS-IEEE UD, Colombia, esupeguic@udistrital.edu.co, rmedina@udistrital.edu.co

² Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, karen_dj@hotmail.com

Abstract– *In the last decade there has been a significant increase in the use of drones in various applications, among which are the generation of cartographic products. Different software process images captured from these aerial platforms, which due to their weight conditions and vehicle type present greater movements (linear and angular) than those that occur in manned aircraft used in conventional photogrammetry. These conditions are some of the characteristics of the SfM photogrammetry, together with the mathematical concepts that it uses, such as the SIFT transform. In order to compare the effectiveness of the software: Agisoft methashape®; Pix4D mapper®; Drone2map®, to implement the SIFT transform, a block with 167 images captured with a UAV TAROT 680 PRO, a low cost camera and supported by 3 GCP was processed to produce a digital surface model and an orthophotograph in each of the three software. The results shows that the three software reconstructed the volumetric of the terrain, although qualitatively and quantitatively the best results were obtained with the Agisoft methashape® software that took longer time and generated the densest 3D point cloud.*

Keywords—UAV-imagery, SIFT transform, SfM photogrammetry, Pix 4D, Agisoft, Drone2Map.

Resumen– *En la última década ha habido un aumento significativo en el uso de aeronaves no tripuladas en diversas aplicaciones, entre las que están la generación de productos cartográficos. Diferentes softwares procesan imágenes de estas plataformas aéreas, las cuales debido a sus condiciones de peso y tipo de vehículo presentan mayores movimientos (lineales y angulares) que los que ocurren en las aeronaves tripuladas que son utilizadas en fotogrametría convencional. Estas condiciones son algunas de las características de la fotogrametría SfM, junto con los conceptos matemáticos que utiliza, como la transformación SIFT. Con el fin de comparar la efectividad del software: Agisoft methashape®; Pix4D mapper®; y Drone2map®, para implementar la transformada SIFT, un bloque con 167 imágenes capturadas con un UAV TAROT 680 PRO, una cámara de bajo costo y apoyado por 3 GCP fue procesado para producir un modelo digital de superficie y una ortofoto en cada uno de los tres softwares. Los resultados muestran que los tres softwares realizan la reconstrucción volumétrica del terreno, aunque cualitativamente y cuantitativamente los mejores resultados se obtuvieron con el software Agisoft methashape®, el cual tomó más tiempo y generó la nube de puntos 3D más la densa.*

Palabras clave: imágenes UAV, transformada SIFT, fotogrametría SfM, Pix 4D, Agisoft, Drone2Map.

I. INTRODUCCIÓN

Recientemente [1] se ha incrementado el uso de imágenes digitales adquiridas desde un sistema de aeronave pilotada remotamente (RPAS, por sus siglas en inglés) -más conocidos como vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés), aeronave pilotada remotamente (UAS, por sus siglas en inglés) o “drones”- con fines cartográficos. Existen multitud de tipos de UAV, cuya clasificación principal se asocia al sistema de propulsión utilizado, que normalmente, sugiere la aerodinámica o forma del equipo. En función del tipo de sistema propulsor que disponga el UAS se pueden encontrar dos clasificaciones, los de ala fija y los de ala rotatoria [2], cada una con limitaciones y ventajas distintas que los determinan para realizar un tipo de aplicación u otra. De la misma manera, [3] presenta una de las categorizaciones de UAS basadas en peso, alcance y altitud operacional, y duración del vuelo, en la cual se incluyen tanto de ala-fija como de ala-rotatoria. Los campos de aplicación donde se emplean generalmente imágenes adquiridas con UAS incluyen [4-5], entre otros:

- Agricultura: los productores pueden tomar decisiones fiables para ahorrar tiempo y dinero (por ejemplo, agricultura de precisión), pueden obtener registro rápido y exacto de daños o identificar posibles problemas en el campo
- Forestal: se puede realizar la evaluación de árboles, la vigilancia de incendios, el control de vegetación, la identificación de especies, el cómputo del volumen, así como silvicultura puede ser realizada con precisión.
- Arqueología y arquitectura: realizar la cartografía 3D y las mediciones asociadas a ello, con enfoques basados en imágenes de baja altitud, de los sitios y las estructuras hechas por el hombre.
- Medio ambiente: vuelos regulares, rápidos y económicos permiten el monitoreo de la tierra y del agua, o de otro lugar geográfico, en múltiples épocas. Los mapas de infraestructura vial, cartografía catastral, análisis térmicos, cómputo del volumen de excavación, documentación del monitoreo de recursos naturales. Las aplicaciones de geología y geomorfología también son posibles.
- -Emergencia: los UAS son capaces de adquirir rápidamente imágenes de la primera evaluación del impacto y el rescate de planificación. El vuelo puede realizarse sobre

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.159>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

áreas contaminadas sin ningún peligro para los operadores o las operaciones de tiempo antes del vuelo.

- Tráfico de control: vigilancia, estimación de tiempo de viaje, trayectorias, ocupación del carril y la respuesta rápida es la información más requerida.

El trabajo de [4] recoge la evidencia de la utilización y adaptación de los UAS en la comunidad académica en temas asociados o relacionados con Fotogrametría y Sensores Remotos, con un gran número de artículos publicados, además menciona que los ingresos del mercado de sistemas aéreos no tripulados global vale 5400 millones de euros a 2013 y espera que crezca hasta 6350 millones de euros en 2018. De otra parte, el ministerio de Fomento de España [6] estima que para el año 2035 habrá una flota de 51400 drones de uso comercial, lo cual generará un gran volumen de negocios y de empleos; igualmente señala que, en Estados Unidos, se prevé que de las 42.000 unidades registradas en 2016 se pase a 420.000 sobre el año 2022.

Frente a la situación anterior, un número importante de software, tanto de uso privativo (por ejemplo: Agisoft Methashape ®; Pix4D mapper®, Drone2map ®, entre otros), como libre (VirtualSfM, Meshlab, Cloudcompare, ColMap, MicMac, entre otros) se encuentran en el mercado ofertando la solución de convertir imágenes UAS en los productos cartográficos requeridos según la aplicación. [4] expresa que los principales productos que se derivan de los datos adquiridos con UAS, para el campo de la geomatica, corresponden a la generación de productos cartográficos como: los modelos digitales de superficie y del terreno; y las ortofotos; siendo estos productos asociados a la Fotogrametría y más específicamente a la Fotogrametría SfM (del inglés Structure from Motion).

Este trabajo busca comparar la efectividad en la reconstrucción 3D de superficies del terreno a partir de imágenes UAS en los principales softwares de uso privativo, a saber, Agisoft Methashape ®; Pix4D®, Drone2Map ®

A. El proceso fotogramétrico

Fotogrametría "es el arte, ciencia y tecnología para obtener información cuantitativa fiable de objetos físicos y su entorno, a través del registro, análisis e interpretación, y medición de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos" [7]. Así, la fotogrametría se encarga de generar productos cartográficos (entre ellos los mapas, los modelos digitales del terreno y las ortofotografías) a partir de imágenes (fotografías aéreas, imágenes de satélite, u otras). El problema geométrico es la reconstrucción de rayos homólogos (de los rayos perspectivos) de una superficie que se intersectan desde dos puntos de vista diferentes (imágenes que se traslapan), para lo que se requiere conocer las distancia desde el centro de proyección (de cada imagen) a cada uno de los puntos en la superficie.

Convencionalmente, la solución a este problema fotogramétrico se obtiene a través de la orientación del modelo [8] que comprende tres etapas fundamentales, a saber, orientación interna, orientación relativa, y orientación absoluta. La orientación interna consiste en la reconstrucción del haz de luz (rayo perspectivo) que dio origen a la fotografía [8]. La orientación relativa reconstruye la posición relativa que existía entre las dos imágenes consecutivas en el momento de la captura [8], para esto se debe cumplir con la intersección entre los rayos homólogos de cinco (5) puntos del modelo, ubicados apropiadamente. En esta etapa se tienen en cuenta los movimientos de rotación alrededor de los ejes coordenados x , y , z , que afectan a la plataforma (avión u otro) en el instante de la captura de la imagen [8]. La orientación absoluta determina la escala y orienta el modelo en el espacio [8], es decir permite dar coordenadas al modelo reconstruido. En la etapa de orientación absoluta intervienen los puntos de control terrestre (GCP por sus siglas en inglés). Resultado de la orientación del modelo se obtienen las coordenadas x , y , z , ω , ϕ , κ del centro de proyección de cada imagen, que define la posición del punto de toma en el espacio [8].

La utilización del GPS/INS (es decir, Sistema de Posicionamiento Global y Sistema de Navegación Inercial) en la plataforma (satélite, avión, o RPAS, u otro) que soporta la cámara que adquiere las imágenes, permite obtener de manera automática las coordenadas x , y , z , ω , ϕ , κ del centro de proyección de cada imagen, lo que algunos autores denominan georreferenciación directa - GD [9 – 10]. La GD automatiza el proceso fotogramétrico y puede excluir el uso de GCP y puede ser óptima en casos que requieran una rápida respuesta en casos de desastres y emergencias [8]. No obstante, cuando se requiere mayor precisión de los productos cartográficos se debe seguir el flujo fotogramétrico convencional. Siendo importante señalar que en la actualidad cada etapa de la orientación ha sufrido procesos de automatización y optimización. Sin duda, la etapa de la orientación relativa es la que de manera manual consume mayor cantidad de tiempo y operador. Los procesos de correspondencia de imágenes [11] han automatizado la búsqueda de puntos homólogos para intersectar los rayos perspectivos de las imágenes digitales. Desde el punto de vista matemático, cada etapa del proceso fotogramétrico corresponde a un concepto matemático, a saber: la orientación interna se basa en la transformada bidimensional afín; la orientación relativa se fundamenta en las ecuaciones de colinealidad y coplaneidad; y la orientación absoluta se apoya en la transformada tridimensional conforme [12]. En el caso en el que se incluya en el proceso fotogramétrico la utilización de los parámetros de GPS/INS para la inicialización del proceso, aparece el término de orientación externa [12], la cual resuelve en un solo paso la orientación relativa y absoluta (incluyendo o no GCP) y se fundamenta igualmente en las ecuaciones de colinealidad y coplaneidad. El ajuste del bloque corresponde a una etapa final en la que se eliminan simultáneamente las distorsiones

geométricas, minimiza el error entre los puntos de imagen observados y reproyectados. No obstante, a pesar de la teoría matemática, cada proveedor de software implementa diferentes soluciones en busca de un mejor desempeño y efectividad de sus algoritmos; muchos de ellos son un ‘secreto comercial’ y funcionan de manera transparente para los usuarios como una solución ‘lista para usar’ en la cual con unos insumos (input) dados por el usuario, el software realiza unos procesos (desconocidos en algunos casos), y entrega una salida (output). En otras ocasiones, diferentes investigaciones se ocupan de la adaptación, o del mejoramiento de los algoritmos matemáticos básicos utilizados en cualquiera de las etapas de un proceso. Un ejemplo de esto, puede ser las variaciones de la matriz de rotación ortogonal basada en funciones trigonométricas de tres parámetros independientes ω , ϕ , κ (matriz de Euler) usada en el proceso fotogramétrico, en la que se encuentran alternativas teóricas como la matriz de Cayley, la matriz de Olinde Rodríguez, la Matriz de Thomson, o la Matriz de Shut [12].

B. Fotogrametría SfM

El método Structure-from-Motion (SfM) es uno de los problemas más populares dentro de la visión por computador [13] que aborda la estimación de la estructura 3D a partir del recubrimiento entre imágenes (bidimensionales), y como tal puede ser visto como una automatización y ampliación de la fotogrametría. Sin embargo, se diferencia fundamentalmente de la fotogrametría clásica en que, la geometría de la escena, las posiciones de la cámara y la orientación, se resuelven automáticamente sin necesidad de especificar previamente una red de elementos con coordenadas tridimensionales conocidas [14]. El SfM no requiere una ejecución exhaustiva del vuelo para su aprobación, ni calibraciones de cámaras, incluso siendo posible el uso de imágenes procedentes de diferentes cámaras fotográficas (incluyendo cámaras convencionales), a diferencia de la fotogrametría aérea convencional que exigía planificaciones rigurosas de vuelos y la caracterización previa de las cámaras [15]. La fotogrametría SfM puede aplicarse a datos capturados en tierra o desde el aire, por lo que existen muchas aplicaciones encaminadas a la reconstrucción de volúmenes de objetos. Igualmente se aplica a datos capturados desde plataformas aéreas, y es común encontrar en literatura el término Fotogrametría UAV introducido por [16]. En cuanto al fundamento matemático, la diferencia entre el flujo fotogramétrico convencional y el de SfM se encuentra en la etapa de la orientación exterior [17], la cual se resuelve en fotogrametría SfM gracias a la transformación de características invariante a la escala (SIFT, por sus siglas en inglés) propuesta por [18 - 19]. El ajuste del bloque, generalmente, se debe usar como un paso final de cualquier algoritmo de reconstrucción [20]. En la práctica, la triangulación y la reproyección proporcionan un método para "completar" los puntos que se pierden durante el seguimiento o la coincidencia de múltiples vistas [20]. La orientación final,

en fotogrametría SfM, puede realizarse con restricciones internas y/o con restricciones externas [21]. En el flujo de trabajo, la orientación interna ha sido automatizada; el uso de GPS/INS es opcional; y la orientación absoluta, en caso de hacerse, se realiza de la misma manera que en la fotogrametría convencional.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio y materiales

La zona de estudio (fig. 1 izquierda) se localiza en el páramo de Chingaza [22] (representado en la fig. 1 de color verde) ubicado en la Cordillera Oriental de los Andes, entre los 3.100 y los 4.700 m.s.n.m., al nororiente de Bogotá (Colombia). Un área de aproximadamente una hectárea (simbolizada como el punto rojo en la fig. 1) fue cubierta con imágenes adquiridas con una cámara Canon A2300 transportada en un UAV TAROT 680 PRO, hexacoptero, con un peso de 3 Kg, y un tiempo de vuelo de 20 minutos sobre un punto y 12 minutos recorriendo ruta. El UAV posee un piloto automático Pixhawk que se compone de un controlador principal que tiene un sistema IMU, GPS y brújula integrada. La estación de control en tierra funciona con un radiocontrol de 14 canales, telemetría para control de misión en tiempo real. La planeación del vuelo se realiza con el software Mission Planer®.

Los datos del proyecto son 167 imágenes adquiridas (fig. 1 derecha) en 2016, en un vuelo con una duración de 7 minutos 25 segundos (figura 1), a una altura de aproximada de 20 metros, alcanzando un tamaño del píxel en el terreno (GSD) aproximadamente de 2 cm. Cada imagen cuenta con los datos externos del GPS/INS con lo que se obtienen las coordenadas x , y , z , ω , ϕ , κ del centro de proyección de cada imagen. Tres puntos de control (CGP) preseñalizados en forma de L de un metro de lado, y posicionados con dos antenas receptoras de GNSS Gr-5 que poseen una frecuencia de hasta 100 hertzios para el posicionamiento del cinemático en tiempo real (RTK). En cuanto a software se utilizan tres de los más conocidos para fotogrametría SfM como lo son Agisoft photoscan®; Pix4D®, Drone2Map ®.

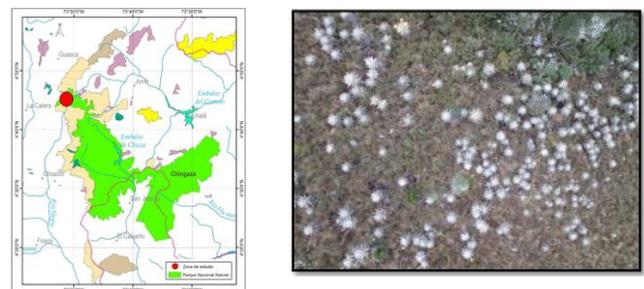


Fig. 1 Localización de la zona de estudio (izquierda) y muestra de una de las imágenes adquiridas durante el vuelo (derecha)

B. Transformada SIFT

La SIFT [19] es un método para extraer características invariantes distintivas de las imágenes que se pueden usar para realizar una comparación confiable entre diferentes vistas de un objeto o escena. Las características son invariantes a la escala y rotación de la imagen, proporcionan una coincidencia sólida en un amplio rango de distorsión afín, cambio en el punto de vista 3D, adición de ruido y cambio en la iluminación [19]. Las características son muy distintivas, en el sentido de que una única característica puede ser combinada correctamente con alta probabilidad contra una gran base de datos de puntos característicos identificados [19]. Este método se usa para el reconocimiento de objetos, el cual se realiza al hacer coincidir las características individuales con una base de datos de características de objetos conocidos utilizando un algoritmo rápido del vecino más cercano, seguido de una transformación de Hough [23] para identificar los grupos que pertenecen a un solo objeto y, finalmente, realiza la verificación a través de la solución de mínimos cuadrados para los parámetros definidos consistentes [19]. Este enfoque de reconocimiento puede identificar de forma robusta objetos entre el desorden y la oclusión, al tiempo que logra un rendimiento casi en tiempo real [19], el proceso se realiza en cuatro etapas. Resultado de la SIFT se obtiene una NUBE de PUNTOS relativa a la superficie que se reconstruye en 3D.

C. Flujos de trabajo de los softwares

Cada software ofrece a los usuarios un flujo de trabajo y unas etapas que le permiten al usuario partir de un conjunto de imágenes y llegar hasta los productos que desea. Para este proyecto se tiene como producto final tanto el modelo digital de superficie (DSM por sus siglas en inglés – que representa una distribución espacial continua y numérica de la altura de la superficie del terreno); como la ortofotografía (fotografía con escala constante y propiedades de una proyección ortogonal) de la zona de estudio.

1. Agisoft metashape ®

La fig. 2 muestra los pasos que propone este software para crear el DSM y la ortofoto, siendo un flujo paso a paso e intuitivo para los usuarios. La etapa de la creación de la nube de puntos, desde el punto de vista conceptual, supone el uso de la transformada SIFT.



Fig. 2 Flujo de trabajo del software Agisoft metashape ®

Fuente: Elaboración propia

2. Pix4D ®

Este software propone un flujo de trabajo en tres etapas (fig. 3) claramente definidas en la interface, y la etapa uno explicita el uso de una transformada como la SIFT.

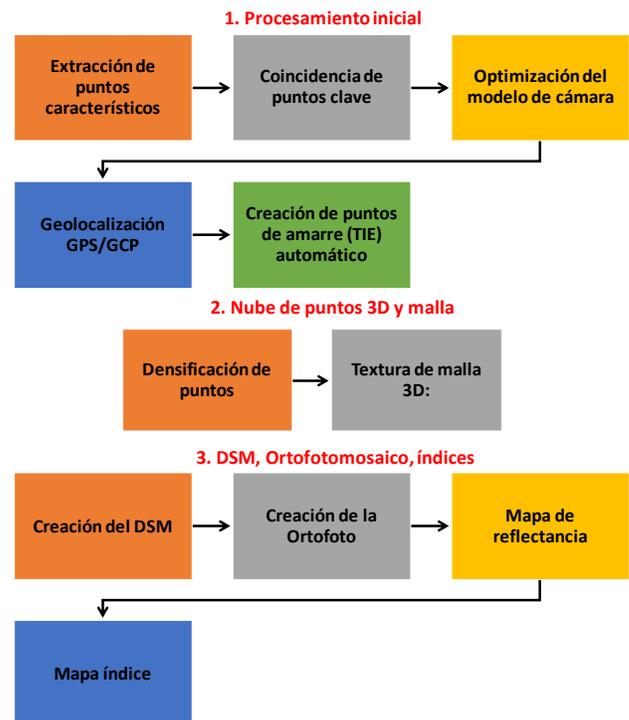


Fig. 3 Flujo de trabajo del software Agisoft metashape ®

Fuente: Elaboración propia

3. Drone2Map ®

Drone2Map es un software para usar en una de las plataformas disponibles del software ArcGIS® que facilita la creación de imágenes profesionales a partir de imágenes capturadas con dron para visualización y análisis en ArcGIS. Este software propone un flujo de trabajo en cuatro etapas (fig. 4), de las cuales la etapa tres se ocupa específicamente de la configuración de los procesos. En esta etapa se incluyen cinco tipos de opciones de procesamiento, en las cuales se incluye, lo que sería el uso de la transformada SIFT (a través de la configuración de la identificación de puntos característicos - opción *Dense*), y la definición de los productos de salida (2D o 3D) y se puede realizar la medición de los GCP.

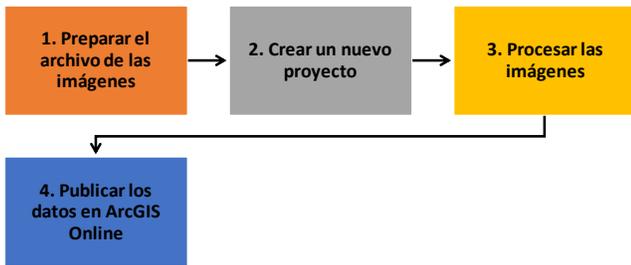


Fig. 4 Flujo de trabajo del software Drone2Map ®

Fuente: Elaboración propia

D. Metodología

La fig. 5 muestra la metodología para la realización del proyecto.

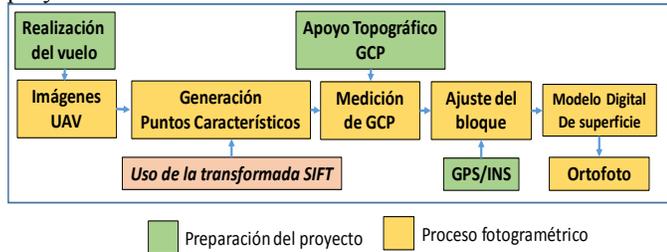


Fig. 5 Flujo de trabajo del proyecto.

Teniendo como punto de inicio las imágenes adquiridas por el UAV, se utilizan los tres softwares para realizar el proceso fotogramétrico (adaptándose a cada flujo de trabajo propuesto por cada software), en el cual se miden los tres puntos de control y se generan el DSM y la ortofoto en cada uno de los casos. Finalmente, los productos obtenidos son comparados cualitativa y cuantitativamente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentarán iniciando por las configuraciones utilizadas y los productos obtenidos por cada software y posteriormente se realizará la comparación por producto.

A. Agisoft metashape®

La tabla 1 resume las opciones de configuración de este software respecto a las diferentes etapas.

Tabla 1. Parámetros de configuración Agisoft metashape®

Paso	Parámetro	Selección
Orientación de fotos	Precisión	Alta)
	Par de preselección	Referencia (posiciones de la cámara conocida)
	Límite de puntos	40000 (puntos característicos por imagen)
	Calidad	Media
Construcción densa de la nube de puntos	Filtrado de profundidad	Moderado (en escenas de reconstrucción compleja)
	Nivel de caras del modelo	Medio
	Interpolación habilitada	Habilitado
Construcción de textura	Modo de trazado	Ortofoto
	Modo de fusión	Mosaico

La figura 7 muestra gráficamente los resultados de las diferentes etapas seguidas en el software desde el modelo inicial (fig. 7a) hasta la producción de la ortofoto (fig. 7h)

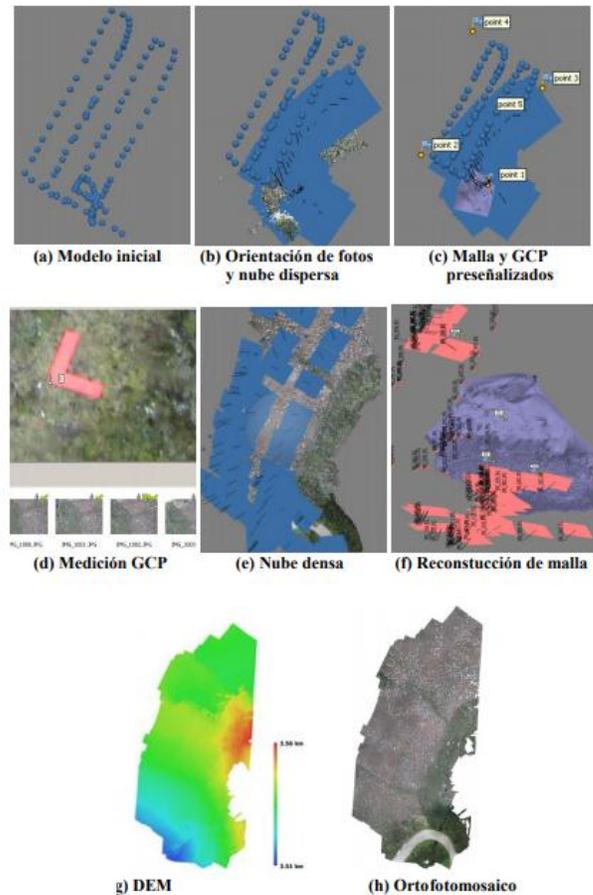


Fig. 7 Flujo de trabajo del software Agisoft metashape ®

B. Pix4D mapper ®

La tabla 2 presenta opciones de configuración dadas en cada etapa del proceso para este software.

Tabla 2. Parámetros de configuración Pix4D mapper®

Paso	Parámetro	Selección
Inicial	Número de puntos	Automático
	Escala de la imagen	½ (mitad del tamaño original)
Nube de puntos	Densidad de puntos	Óptima
	Número mínimo de emparejamientos	3
	Generación de la malla 3D Con textura	Si- Resolución media
DSM Ortofoto	Filtrado de ruido	Si
	Suavizado de la superficie	Si

La figura 8 ilustra las diferentes etapas del proceso en este software, incluyendo la medición de puntos GCP (fig. 8d), hasta la generación de la ortofoto (fig. 8g).

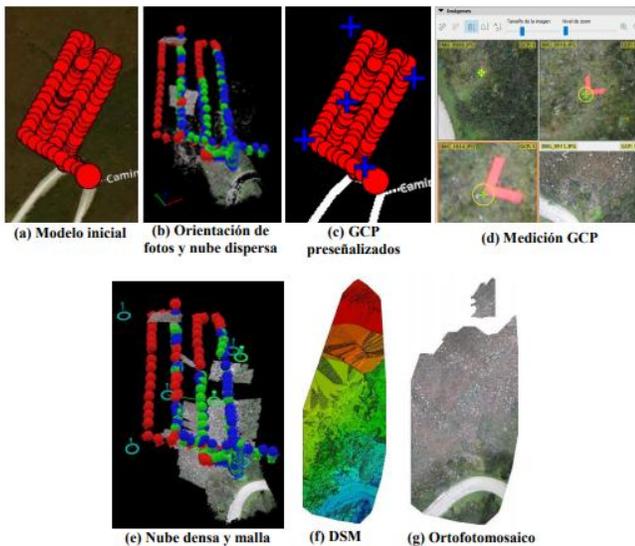


Fig. 8 Flujo de trabajo del software Pix4D mapper ®

C. Drone2Map ®

La tabla 3 presenta opciones de configuración dada en la etapa de procesamiento de imágenes de este software.

Tabla 3. Parámetros de configuración Drone2Map®

Paso	Parámetro	Selección
Inicial	Número de puntos	Automático
	Escala de la imagen	½ (mitad del tamaño original)
Nube de puntos	Densidad de puntos	Óptima
	Número mínimo de emparejamientos	3

	Generación de la malla 3D Con textura	No
DSM Ortofoto	Filtrado de ruido	Si
	Suavizado de la superficie	Si

La figura 9 ilustra las diferentes etapas del proceso en este software, incluyendo generación del DSM (9d), hasta la generación de la ortofoto (fig. 9e).

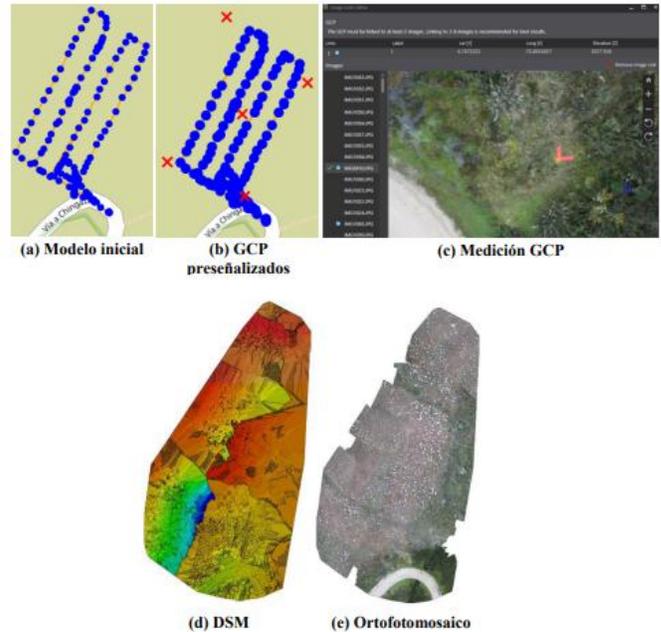


Fig. 9 Flujo de trabajo del software Drone2Map®

D. Comparación de los resultados

Inicialmente se puede abordar la comparación desde el error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) obtenido en cada proceso (tabla 4). Los valores admitidos permiten evidenciar que los mayores errores asociados a los GCP fueron alcanzados por el software Pix4D mapper ®, sin embargo, el RMSE asociado con la reproyección de la imagen muestra que los mayores errores se presentan en la ortofoto de producida por Agisoft metashape ®; mientras que los valores de Pix4D mapper ® y Drone2Map® son comparables y se acercan a una décima del tamaño del píxel.,

Tabla 4. RMSE obtenido en cada proceso

Software	RMSE en GCP				RMSE
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Total (mm)	Reproyección (píxel)
Agisoft	1.158	0.830	0.455	1.496	2.349
Pix4D	20.283	4.718	13.776	-	0.183
Drone2Map	0.046	0.061	0.254	-	0.170

Si se analizan las ortofotografías obtenidas por los tres procesos (Fig. 7h, fig. 8g, fig. 9e) se puede observar la

cobertura y distribución del área, al igual que la proporción de las grandes coberturas objetos (por ejemplo, la zona de la vía). La información cuantitativa asociada a estos productos se presenta en la tabla 5, en donde se evidencia que, respecto al área reconstruida, el software Agisoft metashape® es el que mayor área reconstruye, seguido de Drone2Map®, siendo Pix4D mapper® el que menor área reconstruye. La situación es similar respecto a los DMS.

Respecto a las características invariantes identificadas, que posteriormente son apareadas en las distintas imágenes en que se encuentran -es decir la aplicación de la transformada SIFT-, estas se traducen en la generación de puntos TIE, estos puntos no están directamente relacionados con el número de imágenes que el software logra calibrar y efectivamente utilizar en el proceso. La tabla 5 muestra que el software que mayor número de puntos genera es Drone2Map® (casi 3 veces el número de los obtenidos en Agisoft metashape®), seguido de Pix4D mapper® (que alcanza casi e veces el número de los obtenidos en Agisoft metashape®), y finalmente Agisoft metashape® con casi 200.000 puntos característicos apareados en toda el área. No obstante, esos resultados, en el momento de densificar la nube de puntos, los mayores valores son obtenidos con el software Agisoft metashape®, siendo estos últimos los que impactan en área total reconstruida en los productos cartográficos finales, la cual está asociado al número de imágenes calibradas.

Tabla 5. Información de subprocesos y producto final

Software	Puntos TIE generados	Puntos en la nube densa	Número de imágenes calibradas	Área cubierta (ha)
Agisoft	199.589	18.548.403	145/167	1.21
Pix4D	417.804	8.099.904	88/167	0.47
Drone2Map	603.864	12.515.805	120/167	0.95

Respecto a los tiempos de proceso utilizados por cada software, estos se presentan en la tabla 6. Sin embargo, los procesos de Agisoft metashape® y Pix4D mapper® se realizaron en un equipo con procesador corei7, mientras que el de Drone2Map® se realizó con un procesado corei5. Los datos muestran que el software que tardó más en el proceso es Agisoft metashape® seguido de Pix4D mapper® y de Drone2Map®. En cuanto al tiempo usado para generar la nube de puntos densa, casi el 70% del tiempo usado en el proceso de Agisoft metashape® se dedicó a esta actividad; mientras que para el software Pix4D fue casi el 14% del tiempo; y para Drone2Map®, es similar que Pix4D, y ocupó aproximadamente el 12% del tiempo. Estos datos y los resultados anteriores son una muestra que el usuario desconoce cómo es el funcionamiento del software a su interior respecto a la implementación y optimización de los algoritmos empleados, posiblemente otras métricas de la ingeniería del

software puedan establecer la eficiencia de los softwares y de las optimizaciones del mismo.

Tabla 6. Resumen tiempo de procesos empleados en los procesos

Software	Tiempo total	Procesamiento inicial	Nube de puntos densa
Agisoft	9h 21m 19s	1h 55 m 40 s	6h 38m51s
Pix4D	4h 52m 05s	2h 18 m 38 s	39m 27s
Drone2Map	2h 19m 33s	58m 46 s	16m 50 s

IV. CONCLUSIÓN

El uso creciente de vehículos aéreos no tripulados para fines cartográficos ha generado una oferta creciente de softwares que permiten generar productos cartográficos como el MDS y la ortofotos, siguiendo diferentes flujos de trabajo con diferentes grados de automatización. Desde el punto de vista conceptual, y como elemento diferenciador entre el flujo de la fotogrametría convencional y la fotogrametría SfM, se encuentra la transformada SIFT que permite la realización del proceso de correspondencia de imágenes y de la creación de las nubes de puntos 3D (parte importante del proceso).

Con el fin de comparar la efectividad de los softwares Agisoft methashape®; Pix4D mapper®; y Drone2map®, para implementar la transformada SIFT, este trabajo se centró en la realización del proceso fotogramétrico, en una zona del páramo de Chingaza, con los mismos insumos -a saber: un bloque con 167 imágenes capturadas con un UAV TAROT 680 PRO y una cámara Canon A2300 de bajo costo; elementos de orientación; y 3 puntos de control terrestre (GCP)-, siguiendo el flujo propuesto por los softwares Agisoft metashape®, Pix4D mapper®, y Drone2Map®, para obtener tanto el DSM como la ortofotografía; tratando de mantener parámetros comparables en los tres softwares.

Los mejores resultados en cuanto al número de puntos en la nube densa, el número de imágenes calibradas, como el área total de la superficie reconstruida fueron obtenidos por el software Agisoft metashape®, sin embargo, en cuanto al tiempo utilizado este software fue el que más tiempo tardó en realizar el procesamiento, superando los otros softwares por casi el doble de tiempo. De otra parte, en todos los casos, los tres softwares llegaron a obtener un resultado reconstruyendo, aunque sea parcialmente, el área de interés, lo que evidencia una diferencia en los algoritmos utilizados en los procesos.

REFERENCIAS

- [1] Organización de Aviación Civil Internacional. Circular 328. Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS). Montréal, 2011.
- [2] R. Beard, D. Kingston, M. Quigley, D. Snyder, R. Christiansen, W. Johnson, M. Goodrich, "Autonomous Vehicle Technologies for Small Fixed-Wing UAVs". *Journal of Aerospace Computing, Information and Communication*, 2005, pp. 92-108.
- [3] K. Dalamagkidis, K.Valavanis, L. Piegel, "Current Status and Future Perspectives for Unmanned Aircraft System Operations in the US". *J Intell Robot Syst*, 52, 2008, pp. 313-329.
- [4] I. Colomina, P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, pp. 79-97.

- [5] F. Nex, F. Remondino, "UAV for 3D mapping applications: a review". *Applied geomatics*, 2014, volume 6, Issue 1, pp 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- [6] Ministerio de Fomento, *Plan estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018- 2021*, Gobierno de España, 2018. https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/plan_estrategico_drones_2018-2021_0.pdf
- [7] J. McGlone (Ed.), *Manual of Photogrammetry*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 5 edition, 2004.
- [8] J. Roa, *Principios de fotogrametría*, Alcaraván, 1976.
- [9] M.L. Tsai, K.W. Chiang, Y.W. Huang, Y.S. Linb, J.S. Tsai, C.F. Loc, Y.S. Linc, C.H. Wud., "The Development of a Direct Georeferencing Ready UAV based photogrammetry platform", *XXXVIII proceedings ISPRS*, 2010.
- [10] M. Bláha, H. Eisenbeiss, D. Grimm, P. Limpach, "Direct georeferencing of UAVs", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-1/C22, 2011, pp.131-136.
- [11] T. Schenk, *Fotogrametría Digital*, Editorial Alfa y Omega, 2002.
- [12] J. Álvarez, *Apuntes de fotogrametría II* (tesis de grado), Universidad de Extremadura, Mérida, 2001.
- [13] H. Aanæs, *Methods for Structure from Motion*. Technical University of Denmark. Informatics and Mathematical Modelling (tesis doctoral). 2003.
- [14] N. Snavely, S. Seitz, R.Szeliski, "Modeling the world from Internet photo collections," *International Journal of Computer Vision*. Vol 80, n. 2, 2008, pp. 189-210. DOI 10.1007/s11263-007-0107-3
- [15] W. A. Kamal, R. Samar, "A mission planning approach for UAV applications," in *Proceedings of the 47th IEEE Conf. Decision and Control*, 2008, pp. 3101–3106. DOI: 10.1109/CDC.2008.4739187
- [16] H. Eisenbeiss, *UAV Photogrammetry*. ETH Zurich. No. 18515, (tesis doctoral) doi:10.3929/ethz-a005939264
- [17] K. Wenzel, M. Rothermel, D. Fritsch, N. Haala, "image acquisition and model selection for multi-view stereo", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1*, 2013, pp. 251- 258. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-251-2013>
- [18] D. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features". *Proceeding of Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, pp. 1150-1157. doi:10.1109/iccv.1999.790410
- [19] D. Lowe. "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints". *International Journal of Computer Vision* 60, 2, 2004, pp. 91-110.
- [20] R. Hartley, A. Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, New York, 2004.
- [21] D. Ortega-Terol, D. Hernandez-Lopez, R. Ballesteros, D. Gonzalez-Aguilera, "Automatic Hotspot and Sun Glint Detection in UAV Multispectral Images", *Sensors*, vol. 17, 2017, pp. 294-309. doi: 10.3390/s17102352.
- [22] O. V. Ríos and P. Pedraza, *El Parque Nacional Natural Chingaza*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, 2004
- [23] P. V. C. Hough, "Method and means for recognizing complex patterns". U. S. Patent 3, 069 654, December 18, 1962.
- [24] Manuscript Templates for Conference Proceedings, IEEE. http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/publishing/template_s.html
- [25] M. King, B. Zhu, and S. Tang, "Optimal path planning," *Mobile Robots*, vol. 8, no. 2, pp. 520-531, March 2001.
- [26] H. Simpson, *Dumb Robots*, 3rd ed., Springfield: UOS Press, 2004, pp.6-9.
- [27] M. King and B. Zhu, "Gaming strategies," in Path Planning to the West, vol. II, S. Tang and M. King, Eds. Xian: Jiaoda Press, 1998, pp. 158-176.
- [28] B. Simpson, et al, "Title of paper goes here if known," unpublished.
- [29] J.-G. Lu, "Title of paper with only the first word capitalized," *J. Name Stand. Abbrev.*, in press.
- [30] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," *IEEE*

- Translated J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [*Digest 9th Annual Conf. Magnetics Japan*, p. 301, 1982].
- [31] M. Young, *The Technical Writer's Handbook*, Mill Valley, CA: University Science, 1989.