



Geología desde los ojos de un dron

Una poderosa herramienta educativa para los actuales ingenieros en Ciencias de la Tierra

Proyecto DGAPA/UNAM/PAPIME: PE101020

Unidades Teóricas

UT-02

Fotogrametría digital: reconstrucción de modelos 3D con Structure from Motion



Macías-Medrano Sergio



UNAM / FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA



Este producto docente ha sido financiado por la DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIIME PE101020 “Geología desde los ojos de un dron: una poderosa herramienta educativa para los actuales ingenieros de la Tierra”.

Por favor cítanos como:

Macías-Medrano S. (2021), Fotogrametría Digital: reconstrucción de modelos 3D con Structure from Motion, Unidad teórica UT-02, proyecto PAPIIME clave PE101020 (DGAPA-UNAM): “Geología desde los ojos de un dron: una poderosa herramienta educativa para los actuales ingenieros de la Tierra”. Facultad de Ingeniería, UNAM.

1. Introducción

A través de la fotogrametría digital es posible reconstruir en 3D un objeto o superficie (ver colecciones en [Sketchfab](#)) a partir de un conjunto de imágenes digitales ([Leberl et al., 2010](#)). Lo anterior es producto de una evolución tecnológica que ha incidido directamente en la disciplina desde sus orígenes a la fecha, sin embargo, hay que mencionar que los principios básicos retomados en el trabajo [Unidad Teórica A.1 Fotogrametría digital: adquisición de fotografías aéreas con dron](#), siguen siendo vigentes.

Con base en la revisión de literatura científica hecha por [Goodbody et al. \(2019\)](#) referente a la fotogrametría aérea digital, es posible identificar diferentes nombres asociados a dicha técnica para la generación de datos 3D, como puede ser *image-matching* (coincidencia entre imágenes), visión 3D o *Structure from Motion* (SfM, traducido al español como estructura del movimiento de la cámara). En tanto que la manera en cómo se definen los datos 3D derivados del proceso, apunta a nube de puntos basada en imágenes, nube de puntos fotogramétrica, nube de puntos o imágenes estereoscópicas digitales.

De cualquier manera, es importante saber que la fotogrametría digital está constituida por los principios básicos mencionados anteriormente en conjunto con la asistencia de los algoritmos propios de visión por computadora conocidos como SfM. Es así como se puede partir de un conjunto de imágenes y llevarlas a elementos geométricos 3D a través de la proyección de puntos coincidentes entre fotografías.

La importancia de trabajar con métodos fotogramétricos digitales dentro de la enseñanza de las geociencias radica en que de principio a través de ella se puede obtener una superficie topográfica de manera tridimensional por medio de Modelos Digitales de Elevación (MDE) que expresan la elevación del terreno. Este es un aporte tecnológico trascendental para la investigación de la geomorfología, considerado así por el propio [Chandler \(1999\)](#) en su artículo que se ha vuelto referente dentro del tema, por lograr conjuntar los diversos aportes fotogramétricos de la época y establecer conceptos teóricos y consideraciones prácticas.

Sin embargo, a poco más de dos décadas las cosas han cambiado en cuanto a programas de cómputo, métodos, equipo y aplicaciones. En concreto, la incorporación del dron como una herramienta de adquisición fotográfica y los algoritmos de SfM ([Fawcett et al., 2019](#)), abren un abanico más amplio en los diversos estudios geocientíficos como es el caso de [Carrera-Hernández et al. \(2021\)](#) o de [Vasuki et al. \(2014\)](#) entre otros, de

vanguardia favorecidos por la capacidad del manejo, procesamiento y visualización de datos tridimensionales a gran escala y multitemporales, pero también con la oportunidad de acceder vía remota a aquellos lugares complicados por lo inhóspito que puede llegar a ser el terreno.

Con esta unidad teórica se busca que el estudiante conozca el flujo de trabajo fotogramétrico a partir del procesamiento de fotografías con el cual se obtienen datos 3D de interés geocientífico. Para ello se hablará de conceptos teóricos, programas de cómputo y productos finales.

2. Marco teórico de referencia

Como ya se comentó en la sección anterior, la fotogrametría digital incorpora conocimientos de visión por computadora dentro de su flujo de trabajo. Esta es un área sumamente extensa, sin embargo, es importante rescatar de ella un fragmento de su identidad relacionada con el procesamiento de imágenes que puede conducir a la creación de modelos 3D basados en la coincidencia de áreas o puntos determinados entre fotografías tomadas desde diferentes perspectivas de objetos de la vida real. Es decir, que encuentra coincidencias en los píxeles de las imágenes y convierte posiciones de 2D a profundidades en 3D.

A partir de esta idea y con el empleo de algoritmos de tipo SfM, es posible obtener diversos productos como son las nubes de puntos, los ortomosaicos y los MDE, elementos de interés por parte de la cartografía. Si se quiere ahondar más sobre la visión por computadora y conocer el fondo matemático de estos procesos, sugerimos consultar el libro de [Szeliski \(2011\)](#), ya que de momento, solo señalaremos algunos conceptos.

Dicho lo anterior y con apoyo del escrito de Goodbody et al. (2019) se define el flujo de trabajo general de la fotogrametría digital, sin embargo, hay que precisar que para fines didácticos, se ha dividido en dos partes y el objeto de interés de esta unidad teórica, se centra en el entendimiento del procesamiento del conjunto de imágenes (parte 2 de la Tabla 1) previamente adquiridas para la reconstrucción tridimensional de superficies.

Tabla 1. Fragmento de tabla con las secciones de SfM. Tomada del artículo de Goodbody et al. (2019).

1. Adquisición de imágenes	2. Generación de nube de puntos
Tipo de sensor	Alineación de imágenes
Overlap	Generación de key-points
Traslape	Generación automática de tie-points
Altitud y GSD	Densificación de la nube de puntos
Iluminación	Malla con textura 3D y ortomosaico

Como se observa, los puntos a seguir dentro del paso 2 de la Tabla 1, son incorporados en los diferentes programas que manejan algoritmos SfM para reconstruir modelos 3D, como es el caso del flujo de trabajo definido por Metashape (licencia de paga) definido en la Figura 1. Esta es una constante con otras opciones de programas de cómputo como Pix4D (licencia de paga), OpenDroneMap (licencia libre y de código abierto), Colmap (licencia libre), 3DF Zephyr Free (licencia libre y de paga), entre otros que siguen el procedimiento.

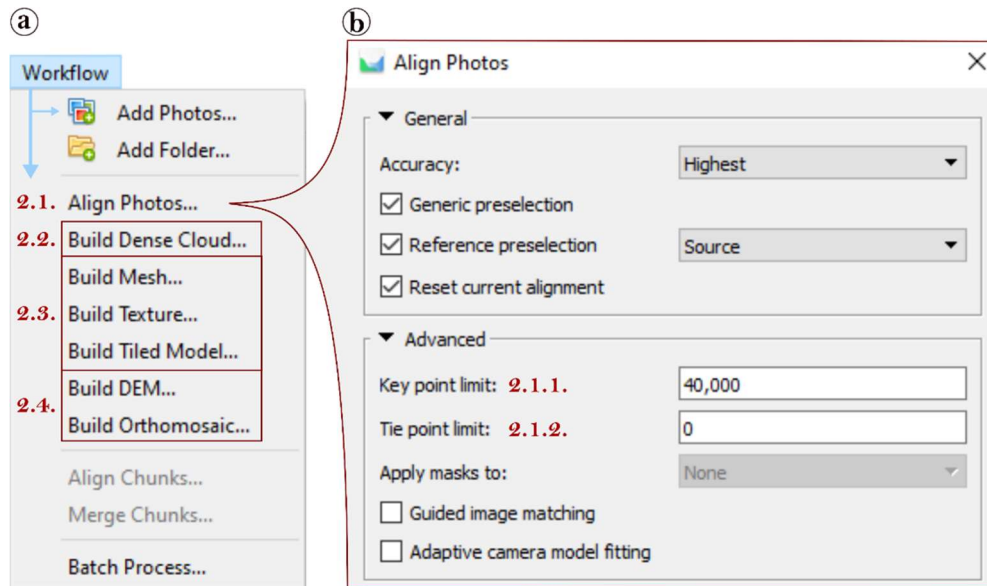


Figura 1. Las capturas de pantalla pertenecen al programa Metashape de Agisoft. a) Pestaña de Workflow del menú principal con la numeración correspondiente del marco de referencia de la unidad teórica. b) Para el caso del primer paso, se presenta una segunda captura de pantalla que muestra el desglose de los tres primeros pasos mencionados en la parte 2 de la Tabla 1.

2.1. Alineación de fotografías

La alineación de las fotografías es el paso inicial. Consta de encontrar la posición de las imágenes que conforman el proyecto fotogramétrico, dentro de un espacio virtual a través del recorrido (*track*) hecho por la cámara para adquirir cada fotografía.

Un ejemplo de lo anterior se muestra en la Figura 2 en donde la alineación está marcada por la secuencia de las escenas partiendo del punto de inicio de la línea de vuelo 1 (L1) y cambiando de línea bajo la misma lógica del punto inicial al punto de destino.

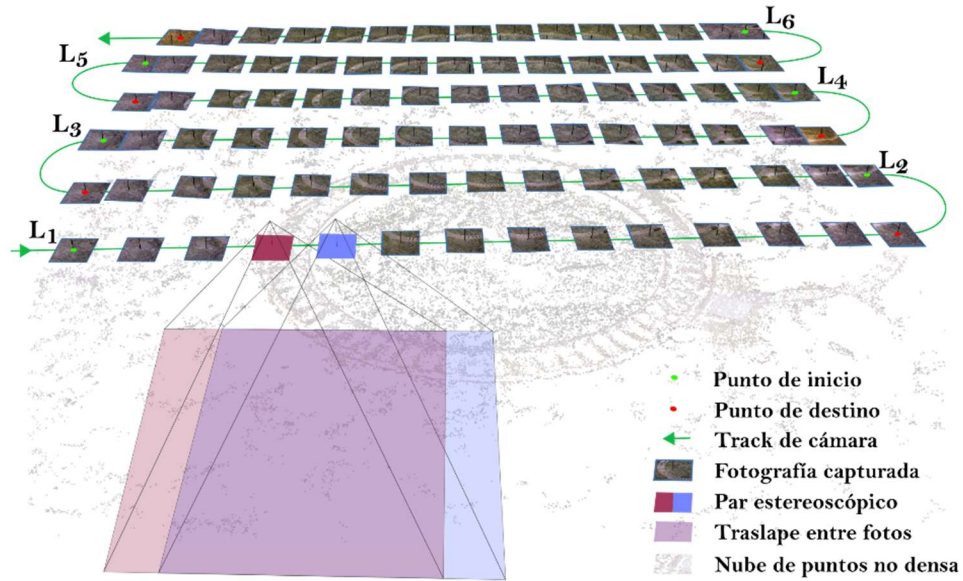


Figura 2. Resultado de la alineación entre fotografías con traslape. Elaboración propia.

Sin embargo, hay que decir que dicha lógica solo aplica para ciertos proyectos fotogramétricos en donde la adquisición de las fotografías es de manera estructurada. Aprovechando este punto, es conveniente hablar del potencial con que cuentan los algoritmos SfM en el sentido de que son capaces de reconstruir fotografías a pesar de que sea más errática la estructura de adquisición, solo basta con que exista cierto traslape.

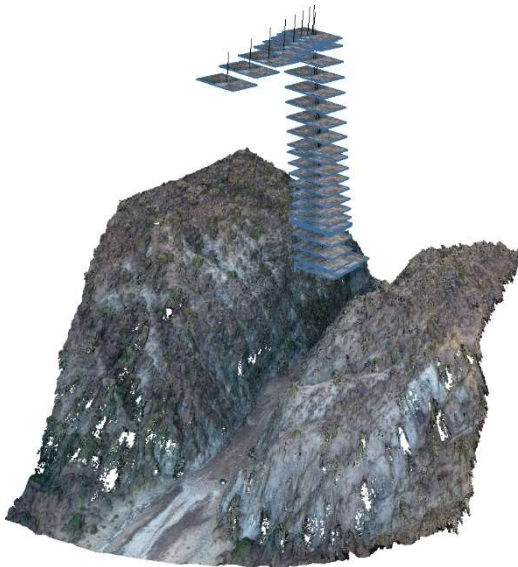


Figura 3. Reconstrucción de la nube de puntos densa de un cañón a partir de la adquisición de fotografías con un vuelo manual. Elaboración propia.

Evidentemente, trabajar con este tipo de métodos puede acarrear algunos problemas como redundancia en el análisis de coincidencias entre imágenes o una extensión de trabajo limitada con mayor cantidad de oclusión (ver Figura 3).

A pesar de ello, no deja de ser funcional y abre un abanico de posibilidades relacionadas con la propuesta de diferentes métodos de adquisición de fotografías, tal y como lo muestra la práctica de [Generación de modelos 3D de muestras de roca con SfM](#).

Es aquí cuando cobra sentido lo dicho por [Szeliski \(2011\)](#), quien especifica que los

metadatos correspondientes a las especificaciones internas del sensor de la cámara juegan un papel relevante.

Esto se refiere a la distancia focal y al campo de visión, este último se reduce a las dimensiones del sensor, conceptos que ya se han abordado en la unidad anterior. En segunda instancia, se incorporan los datos externos de las imágenes como la localización GPS y la propia del sensor de orientación IMU.

Y finalmente, de acuerdo con las necesidades del proyecto, el usuario decidirá si se emplearán puntos de referencia o control terrestre, para mejorar la calidad de la información. En este sentido, [Chandler \(1999\)](#) aporta información relevante para ser integrada en la adquisición de MDE con fines geomorfológicos.

Ahora bien, esto no es lo único que interviene en el proceso, ya que para llegar a una alineación existe un trasfondo matemático detrás de todo ello con el cual se busca encontrar el recorrido hecho por la cámara para capturar las escenas. De ahí viene el nombre SfM que se puede considerar como la estructura del movimiento de la cámara, obtenido a través de la correspondencia de formas ([Jiang et al., 2020](#)) que existen entre las dos fotografías iniciales, replicando este proceso en pares de imágenes hasta cubrir todo el conjunto de datos.

2.1.2 Generación de *key-points*

Para encontrar dicha coincidencia a través del programa, es necesario definir un valor relacionado con la cantidad de puntos que se van a buscar entre fotografías analizadas para identificar si existen o no áreas de interés con un alto contraste o texturas características de la propia imagen.

Dichos puntos son denominados como *key-points* y el usuario de los algoritmos, por lo general tiene que definir su cantidad. Si bien, en el caso de Metashape se definen 40,000 de manera automática (ver Figura 1.b en *Key Point Limit*), este valor puede llegar a cambiar de acuerdo con el tamaño o contenido visual de la imagen.

Sin embargo, no se recomienda incrementar sustancialmente el valor, ya que más allá de mejorar la calidad de alineación de imágenes, se forzará al programa para hacer coincidir puntos en aquellas áreas de las imágenes en estudio en donde por lo regular no hay motivo de comparación, significando un detrimento en el resultado ya que se agregarían *key-points* representados como falsos positivos.

En este sentido, [Szeliski \(2011\)](#) señala que si el área de estudio contempla una superficie cubierta por nieve, caracterizada por la disminución de la variación espectral, habrá una menor coincidencia entre *key-points*.

2.1.3 Generación automática de *tie-points*

Producto de la búsqueda de coincidencias entre pares de fotografías, la suma de todo ello con un conjunto *key-points* seleccionados para dar paso a un modelo 3D en donde se etiquetarán de manera automática como *tie-points*, mejor conocidos como nube de puntos no densa, tal y como se muestra en la Figura 4.

Adicional a los *tie-points* automáticos, se pueden agregar manualmente aquellos que permitan mejorar la exactitud de la reconstrucción 3D.

2.2. Densificación de nube de puntos

Hay que recordar que para generar los *tie-points* se buscó la coincidencia entre *key-point* de un par de imágenes, limitados ya sea por el usuario o de manera predeterminada por el programa, esto con la finalidad de no generar falsos positivos. Sin embargo, una vez concluido el proceso de alineación, es momento de continuar con el análisis para generar automáticamente una mayor cantidad de *tie-points* en contraste con los generados en el paso previo, pero en esta ocasión analizando las coincidencias entre todas las fotografías que tengan un traslape significativo en lugar de analizar en pares de fotografías, hasta alcanzar el límite definido por la resolución deseada.



Figura 4. Nube de puntos densa. Elaboración propia.

2.3. Malla texturizada 3D

En este momento ya se está en condiciones de generar una estructura sólida del modelo 3D, ya sea a partir de la nube de puntos no densa o la más densa. Evidentemente, el resultado de emplear la segunda opción va a representar más detalles de la superficie en cuestión (Figura 5).

Este tipo de reconstrucción se hace a partir de una malla texturizada en 3D que como consecuencia funcionará para generar Modelos Digitales de Superficie (MDS).

El proceso consiste en una reconstrucción poligonal de un modelo de malla a partir de una nube de puntos con el empleo de diversos métodos que deberán ser seleccionados según sea el caso de la superficie a reconstruir. Sin embargo, nuevamente la resolución del resultado dependerá ahora del número de caras de la estructura sólida (Agisoft LLC, 2020).

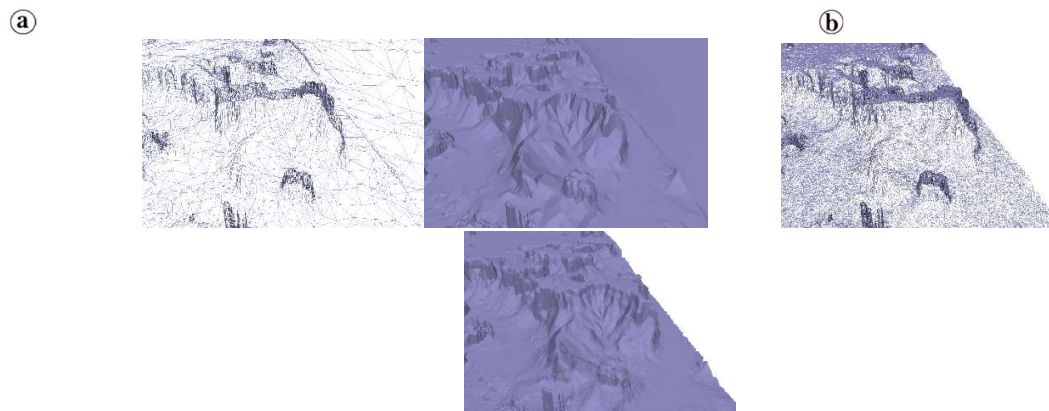


Figura 5. Triangulación 3D no sólida a la izquierda y sólida a la derecha. a) Baja resolución. b) Muy alta resolución. Elaboración propia.

Adicional a lo anterior, se pueden traducir las fotografías en imágenes geométricas, cortadas por cada triángulo que compone la malla y así cubrirlos para obtener un producto realista y en donde se resalte más la textura de la superficie, tal y como se observa en la Figura 6 (Szeliski, 2011).



Figura 6. Malla texturizada 3D. Elaboración propia.

2.4. Generación de Ortomosaico

El paso final dentro del flujo de trabajo básico de la fotogrametría digital, consta del ortomosaico, ráster compuesto por el conjunto de fotografías que representa la imagen en planta de la superficie sin distorsiones. Para ello es necesario contar con un MDS que previamente se ha obtenido con la malla texturizada (Figura 7).



Figura 7. Ortomosaico. Elaboración propia.

3. Aplicaciones en las geociencias

El resultado de conjuntar la práctica fotogramétrica con el procesamiento de imágenes a través de SfM, apunta a obtener modelos de representación cartográfica tanto en 2D (ortomosaico), 2.5D (MDE) y 3D (nube de puntos), útiles para las geociencias.

En su momento, se ha señalado la relevancia de dicha asociación en las aplicaciones de las Ciencias de la Tierra ([Westoby et. al., 2012](#)), ya que representa un bajo costo para la obtención de datos que hasta antes de ello se encontraba conglomerada en plataformas de medición como los escáneres de laser terrestre (*TLS* por sus siglas en inglés) y receptores GPS inaccesibles para muchas investigaciones, a pesar de su gran potencial hasta hoy en día.

Dado que la evolución tecnológica en la que se encuentra inmersa la fotogrametría digital es exponencial, se pueden identificar diversas fases. Una de las principales es la relacionada con el trabajo de [Chandler \(1999\)](#) y el señalamiento que hizo referente al área de oportunidad dentro de la geomorfología, al tener en la fotogrametría un marco metodológico que pudiera obtener MDE a gran resolución espacial y temporal con la finalidad de estudiar procesos de deslizamiento de laderas. Una de sus grandes contribuciones fue sentar ciertas bases para la obtención de un MDE de calidad, dentro de los que destacan el uso de puntos de control terrestre y su relación con respecto al nivel de escala, aunque hay que decir que aún no figuraban los algoritmos SfM dentro de la disciplina.

En segunda instancia, se encuentra lo señalado dentro del trabajo de [Westoby et al. \(2012\)](#), en donde ya se emplea SfM como parte del flujo de trabajo fotogramétrico digital aplicado al estudio de diversas formas del relieve desde el ámbito de la geomorfología como son los acantilados costeros o la influencia de los glaciares en el modelado del relieve. Sin embargo, hay que señalar que como insumo se utilizaron fotografías de diversos tipos desde tierra y aire, ejecutando fotogrametría terrestre y aérea, pero en ningún caso con el uso de drones, que para el momento aún no se introducían de manera extendida en las geociencias.

En tercera instancia, hay que mencionar el análisis hecho por [Fawcett et al. \(2019\)](#) relacionado con el análisis del trabajo anteriormente citado de [Chandler \(1999\)](#) a modo de actualización a 20 años de distancia dentro del manejo de MDE para fines geomorfológicos e hidrológicos en donde a diferencia de la etapa anterior, ya se analiza la introducción de los drones como una herramienta de bajo costo para la adquisición de fotografías aéreas, la incorporación de los programas de cómputo más usados hoy en día para tales fines como son Agisoft Photoscan (con las actualizaciones ahora se conoce como Agisoft Metashape) y Pix4D, el análisis de los puntos de control y la calibración de las cámaras para evitar distorsión.

Aunado a ello, se suman propuestas metodológicas para extraer datos geocientíficos a través de la manipulación de nubes de puntos como es el caso del trabajo de [Riquelme \(2015\)](#), relacionado con la identificación y caracterización de familias de discontinuidades en afloramientos rocosos. Esta es una muestra de que, si bien domina el estado del arte fotogramétrico dentro de la geomorfología, existen otras propuestas que apuntan hacia otras aplicaciones. Si bien la metodología ha sido diseñada para procesar nubes de puntos derivadas de TLS, los productos derivados de la fotogrametría digital con dron cumplen cabalmente como datos de análisis aceptados bajo este contexto ([Mancera-Alejandre et al., 2021](#)), lo cual permite potencializar dichas metodologías.

En este sentido, surgen otras aplicaciones referentes a la detección de capas litológicas y su caracterización a través del análisis de nube de puntos derivadas de fotogrametría terrestre y levantamiento con un TLS utilizando como insumo la firma de intensidad de la roca ([Humair et al., 2015](#)). Lo cual da paso a motivar el uso de la fotogrametría para comparar sus resultados con herramientas potentes, pero de difícil acceso.

Existen otras formas de emplear productos fotogramétricos como es el caso de los ortomosaicos y la interpretación del color para delimitar litologías y detectar ciertos

datos estructurales a través del análisis de detección de bordes ([Vasuki et al., 2017](#)). En este caso, se emplean algoritmos de segmentación semiautomática asistidos por el usuario a nivel de interpretación geológica para el entrenamiento del algoritmo empleado y así llegar al resultado deseado.

Ahora bien, es evidente el beneficio de SfM a diferentes resoluciones y escalas, a nivel macro (escala regional), meso (afloramientos, paredes de macizos rocosos) y micro (muestras de roca, fósiles, minerales). Lo cual abre un área de interés dentro de la educación virtual conformando repositorios de rocas virtuales que permiten ahondar en el análisis geológico, sin importar que las rocas deban ser sometidas a procesos destructivos para extraer otro tipo de datos ([Sketchfab](#)).

4. Síntesis y conclusiones

Los algoritmos SfM conforman en la actualidad una metodología robusta para el procesamiento de conjuntos de imágenes de grandes dimensiones con el propósito de reconstruir objetos o superficies en 3D.

La flexibilidad en el manejo de imágenes por parte de los métodos de alineación de fotografías permite procesar conjuntos de datos con estructuras diferentes en la adquisición de fotografías.

Para ello existe una basta cantidad de programas, paquetes y códigos computacionales, ya sea de licencias de paga, libres o libres y de código abierto ([Jiang et al., 2020](#)), capaces para emplear cada uno de los algoritmos, con lo que da paso al usuario a poder manipular los parámetros de acuerdo a las características del proyecto.

A partir de la revisión bibliográfica, se evidencia la incorporación del conjunto de algoritmos SfM dentro del flujo de trabajo relacionado con la fotogrametría digital con dron. De esta manera, se abre un área de oportunidad para obtener modelos de representación cartográfica con una alta resolución espacial y temporal a bajo costo.

Con el paso del tiempo surgen cada vez más aplicaciones fotogramétricas dentro de las geociencias, ya que con ayuda de nuevos algoritmos y la propia evolución tecnológica, es posible extraer una mayor cantidad de características particulares de la superficie terrestre a gran escala.

Finalmente, en la mayor parte de las investigaciones referentes a aplicaciones geocientíficas consultadas en esta unidad, se pone de manifiesto la necesidad de contar con nuevos algoritmos para sacar mayor provecho en la interpretación de los diferentes

productos fotogramétricos. Esto habla de una disciplina en continuo crecimiento que hasta ahora parece ser que tiene como límite la capacidad de las personas usuarias de la fotogrametría dentro de las Ciencias de la Tierra.

5. Referencias citadas

- Agisoft LLC. (2020). Agisoft Metashape. St. Petersburg. Retrieved from <https://www.agisoft.com/>
- Carrera-Hernández, J. J., Levresse, G., Aranda-Gomez, J. J., & Lacan, P. (2021). Quantifying active deformation on a dry maar's bottom through a light unmanned aerial vehicle and Structure-from-Motion. *International Journal of Remote Sensing*, 42(1). <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1792574>
- Chandler, J. (1999). Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199901\)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199901)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H)
- Fawcett, D., Blanco-Sacristán, J., & Benaud, P. (2019). Two decades of digital photogrammetry: Revisiting Chandler's 1999 paper on "Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research" – a synthesis. *Progress in Physical Geography*. <https://doi.org/10.1177/0309133319832863>
- Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., & White, J. C. (2019). Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports*. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>
- Humair, F., Abellan, A., Carrea, D., Matasci, B., Epard, J. L., & Jaboyedoff, M. (2015). Geological layers detection and characterisation using high resolution 3D point clouds: Example of a box-fold in the Swiss Jura Mountains. *European Journal of Remote Sensing*, 48, 541–568. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20154831>
- Jiang, S., Jiang, C., & Jiang, W. (2020). Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016>
- Leberl, F., Irschara, A., Pock, T., Meixner, P., Gruber, M., Scholz, S., & Wiechert, A. (2010). Point clouds: Lidar versus 3D vision. *Photogrammetric Engineering and*

Remote Sensing. <https://doi.org/10.14358/PERS.76.10.1123>

- Mancera-Alejandrez, J., Macías-Medrano, S., Villarreal-Rubio, E., & Solano-Rojas, D. (2021). Spherical data validation of rock discontinuities orientation from Drone-derived 3D Point Clouds. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *38*(3), 152–163. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.3.1641>
- Riquelme, A. (2015). Uso de nubes de puntos 3D para identificación y caracterización de familias de discontinuidades planas en afloramientos rocosos y evaluación de la calidad geomecánica. *Departamento de Ingeniería Civil, Doctor*.
- Szeliski, R. (2011). *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media (Vol. 48). <https://doi.org/10.5860/choice.48-5140>
- Vasuki, Y., Holden, E.-J., Kovesi, P., & Micklethwaite, S. (2014). A Geological Structure Mapping Tool using Photogrammetric Data. *ASEG Extended Abstracts*, *2013*(1), 1–4. <https://doi.org/10.1071/aseg2013ab144>
- Vasuki, Y., Holden, E. J., Kovesi, P., & Micklethwaite, S. (2017). An interactive image segmentation method for lithological boundary detection: A rapid mapping tool for geologists. *Computers and Geosciences*, *100*, 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.12.001>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, *179*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>