



Geología desde los ojos de un dron

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

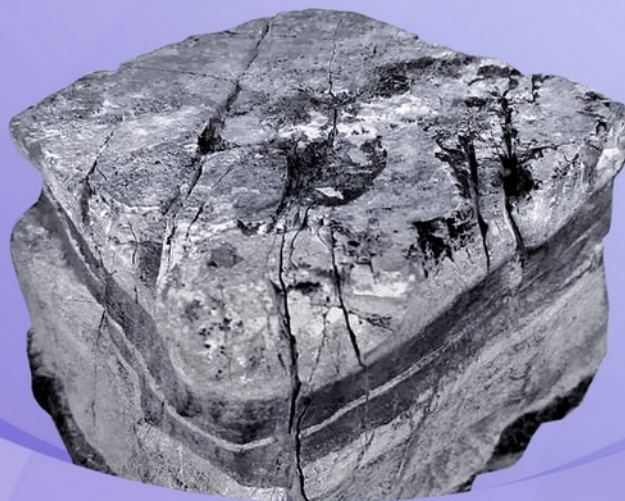
Proyecto DGAPA/UNAM/PAPIME: PE101020

Guías de aprendizaje autónomo

GAA-02

Generación de modelos 3D de muestras de roca con SfM

Macías-Medrano Sergio Enrique
Montoya-Ramírez Mario Michel



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 PAPIME 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, Montoya-Ramírez M. (2020). “Generación de modelos 3D de muestras de roca con SfM”. Guía de Aprendizaje Autónomo GAA -02, proyecto PAPIME 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

En la actualidad, la fotogrametría digital cuenta con una gama de aplicaciones que permea varias disciplinas y que incluso no solo se reduce a la fotogrametría aérea o al empleo de drones. La clave está en entender la teoría fotogramétrica y proponer nuevos marcos metodológicos.

A pesar de que también en este segmento el modelado ha crecido a través de plataformas en donde existe una comunidad robusta que comparte contenido 3D en la web y dispositivos móviles, a través de la realidad aumentada y realidad virtual como son Sketchfab, 4DMapper, Mapbox, Melown Cloud, Picterra, PointBox, Pointscene o Sputnik, por mencionar algunos; en la actualidad nos encontramos con un recorrido prematuro y un crecimiento tecnológico exponencial, en donde convergen especialistas relacionados con la arqueología, paleontología o geología, que tienen como cualidad ser emprendedores, ya que se valen de los algoritmos Structure from Motion para resolver de principio temas de visualización de información.

En este sentido, el trabajo de Riquelme et al. (2016) es uno de los primeros en utilizar la fotogrametría para la caracterización de los macizos rocosos y que de alguna manera llevó a proponer un repositorio virtual de muestras de roca en 3D con fines académicos (Riquelme et al., 2019). También cabe mencionar el trabajo destacado con un excelente estándar de calidad de Ryan Hollister que apunta al mismo objetivo de representar rocas y en este caso adiciona la generación de minerales de modo tridimensional. Al ser dos referencias clásicas dentro de las geociencias, en esta guía se recomienda visitar sus cuentas de Sketchfab ([Adrián Riquelme](#) y [phaneritic](#)).

Sin tipo de trabajo con lo desarrollado por Porter et al. (2016) desde la arqueología, que a base embargo, los autores anteriormente citados no proponen un método sistemático o la documentación de esta llega a ser escasa para la adquisición de fotografías. Es por lo que se complementa este de una plantilla fotogramétrica y el empleo eficiente de los algoritmos SfM, logran reconstruir en su plenitud piezas monolíticas de obsidiana talladas.

Lo anterior llevó al grupo a ampliar el horizonte de la fotogrametría digital para atender nuevas necesidades que apuntan a la adquisición de modelos 3D a gran escala, que de principio permiten generar repositorios virtuales de muestras de roca que pueden ser útiles en la docencia ya sea en modalidad presencial o a distancia.

Con este material, se pretende contribuir en el cambio de paradigma desde las geociencias de la mano con la fotogrametría digital, para proporcionar al estudiante una guía que le permita generar modelos 3D de muestras de roca a través de una serie de pasos y recomendaciones.

Es importante crear modelos en 3D de muestras de roca para que el alumno pueda relacionarlas de manera espacial y así interpretar el ambiente en el que se depositó e incluso pueda hacer alguna correlación.

Objetivos docentes

- El estudiante aprenderá a realizar un modelo en 3D de manera automática y sin necesidad de un equipo profesional para obtener resultados de excelente calidad.
- El estudiante podrá procesar fotografías de manera exitosa en el software Agisoft Metashape.
- El estudiante podrá realizar un modelo en 3D basado en un método fotogramétrico utilizando Structure from Motion.
- Con base en los productos finales es posible extraer información útil para hacer su posterior análisis dentro de otros software open-source.

2. Marco teórico de referencia

Durante los últimos 5 años se va visto un incremento en el uso de la técnica Structure from Motion para la reconstrucción fotogramétrica en el ámbito de las ciencias de la tierra. Como ya se mencionó, Adrián Riquelme y Ryan Hollister han sido los que han utilizado la fotogrametría para la reconstrucción de un modelo en 3D de una muestra de roca apoyándose de una plantilla para escalar dicho modelo.

Con base en los documentos de Porter et al. (2016) y Adrián Riquelme en esta guía se propone un método sistemático para la adquisición de fotografías apoyándose de una plantilla fotogramétrica escalada (Figura 1), la cual consta de las siguientes características:

- Plantilla fotogramétrica compuesta de un círculo con marcas de color negro, naranja y verde cada 10° indicando la posición en que se van a tomar las fotografías.
- Dentro del círculo se encuentra un cuadrado que va a funcionar como medida conocida para escalar el modelo. La medida del cuadrado va a estar en función del tamaño de la muestra de roca.
- Se encuentra una barra de escala en la parte inferior del cuadrado.

- Los marcadores para escalar el modelo se van a colocar en las esquinas del cuadrado, por lo que es importante que el estudiante cuente con las medidas de este.

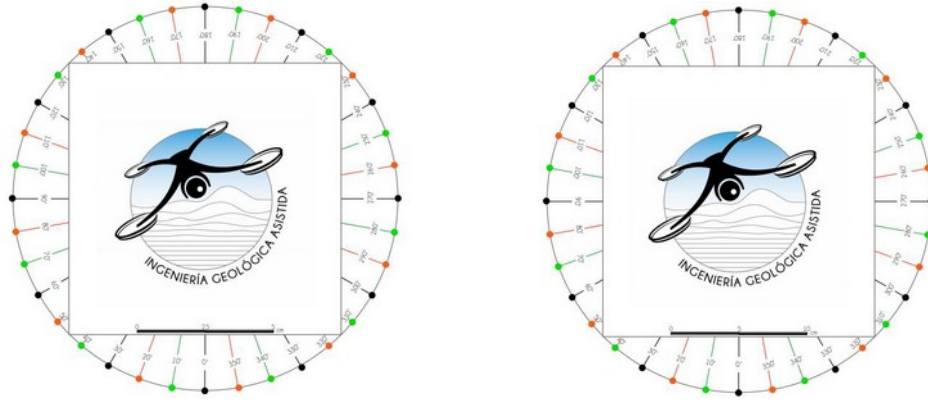


Figura 1. Plantilla para muestras de roca que miden menos de 12 cm (izquierda), plantilla para muestras de roca que miden entre 12 cm y 22 cm (imagen derecha).

Se recomienda al estudiante hacer una caracterización detallada de la muestra de roca antes de iniciar la adquisición de fotografías para conocer sus medidas, características principales y definir el número de Chunks o bloques. Un Chunk es un bloque de fotografías y va a estar en función de las características a resaltar de la muestra de roca y los objetivos del proyecto, por ejemplo, en esta guía el estudiante va a generar un modelo de una muestra de roca completa de Peña de Bernal así que se van a tomar dos bloques o Chunks de fotografías.

El avance de la tecnología ha permitido que la fotogrametría a esta escala se pueda realizar incluso tomando fotografías con un teléfono celular. Sin embargo, hay que configurar algunos parámetros de la cámara para realizar la adquisición fotografías de calidad y tener cierto control de ellas. Para ello se recomienda:

- Quitar el ISO automático. En la fotografía digital el ISO marca la cantidad de luz que necesita la cámara para hacer una fotografía. Al incrementar el ISO para ganar más luz puede generar ruido en las fotografías, es por lo que se recomienda fijar los valores de ISO más bajos.
- Quitar WB automático. El balance de blancos (White Balance, WB) es un control de la cámara que sirve para equilibrar los niveles de los colores básicos RGB. Se sugiere que los valores sean iguales a los de la luz solar directa (~5500K).
- Quitar el flash para evitar la generación de sombras.
- El tamaño y resolución de las fotografías va a estar en función del equipo (cámara o teléfono celular) con el que se cuente. Sin embargo, se recomienda tomar imágenes a la mejor resolución posible.

- Es importante que el estudiante no gire la cámara durante la adquisición de las fotografías debido a que el software con el que se van a procesar las imágenes no las va a reconocer y tampoco las va a calibrar de manera correcta.

El estudiante va a generar un modelo 3D con textura de una muestra de roca que tomó en campo a partir de fotografías que pueden ser adquiridas con su propio celular de manera fácil utilizando uno de los softwares más completos y empleado en la rama de la fotogrametría digital, Agisoft Metashape. El software cuenta con una versión de prueba de 30 días y hereda todas las características del kit fotogramétrico profesional de Agisoft PhotoScan, también agrega otras funciones importantes como la generación de malla detallada basada en mapas de profundidad y la clasificación automática de nubes de puntos densas multiclase.

Una de las herramientas más importantes son los marcadores o puntos de control debido a que pueden ser utilizados para disminuir el error cuadrático, escalar el modelo, georreferenciarlo, unir dos bloques o chunks y permite hacer medidas más precisas. En este caso los marcadores van a ser utilizados para unir dos Chunks y escalar el modelo. El software permite agregar marcadores, moverlos y colocarlos en el lugar correcto (bandera azul) y se pueden fijar (bandera verde) en las fotografías o en la nube de puntos. En el caso de las fotografías al colocar un marcador el software trata de ubicar este mismo punto en todas las fotografías de ese Chunk.

Aplicaciones en geociencias

Este tipo de fotogrametría ha sido utilizado en varios ámbitos de las geociencias ([Westoby, Brasington, Glasse, Hambrey, & Reynolds, 2012](#)) como lo son en la arqueología ([Jalandoni, Domingo, & Taçon, 2018](#); [Porter, Roussel, & Soressi, 2016](#)) y en la paleontología para la preservación de fósiles. De manera más específica, dentro de la geología ha sido aplicado dentro de la mecánica de rocas para la caracterización de macizos rocosos ([Riquelme et al., 2016](#)); ([Riquelme et al., 2019](#)), identificación de texturas y rugosidad ([Baker et al., 2008](#)), mapas de erosión y movimiento de las masas rocosas ([James & Robson, 2012](#)) en la geomorfología y la impresión de medios porosos para identificar el comportamiento del flujo en estos medios en hidrogeología y geología del petróleo.

3. Materiales y equipo

- Equipo de cómputo con las siguientes especificaciones mínimas para descargar Agisoft Metashape Professional (versión 1.5):
 - Windows XP o posterior (32 o 64 bits preferentemente), Mac OS X Mountain Lion o posterior, Debian/Ubuntu with GLIBC 2.13+ (64 bit)
 - RAM de 4 GB
 - Procesador Intel Core 2 Duo o equivalente
- Instalar software: Agisoft Metashape Professional Edition (versión de prueba por 30 días).
- Descargar e imprimir al 100% el archivo PDF de la plantilla fotogramétrica
- Descargar archivos de calibración
- Descargar las 80 fotografías de la muestra de roca
- Muestra de roca
- Base giratoria
- Caja de luz fotográfica (puede ser construida por el estudiante o adquirir en tiendas especializadas de fotografía)
- Dos luces LED
- Trípode para teléfono celular o cámara fotográfica
- Cámara fotográfica o teléfono celular con cámara. La cámara preferentemente debe tener parámetros fijos.

Nota: Para la realización de esta guía de aprendizaje fue utilizada la versión 1.5.1 de Agisoft Metashape Professional Edition. Si el estudiante cuenta con una versión más actualizada se recomienda descargar y leer el manual de usuario para conocer de una manera más detallada los posibles cambios en las herramientas del software.

4. Procedimiento

4.1. Antes de la adquisición de fotografías

- I. Caracterización detallada de la muestra de roca.

Hacer una descripción detallada sobre granulometría, textura, mineralogía, zonas de debilidad, porosidad, etc. Se deben tener ubicadas las características principales de la muestra de roca.

II. Seleccionar una plantilla

Para esta guía se utilizó la plantilla 1 en la que el cuadrado mide 10 cm debido a que la base de la muestra mide aproximadamente 6 cm.

III. La plantilla se coloca en el centro de la base giratoria que a su vez irá en la parte central de la caja de luz fotográfica.

IV. Colocar la muestra en el centro de la plantilla.

V. Las luces se van a colocar preferentemente de frente a la muestra debido a que disminuye la cantidad de sombras.

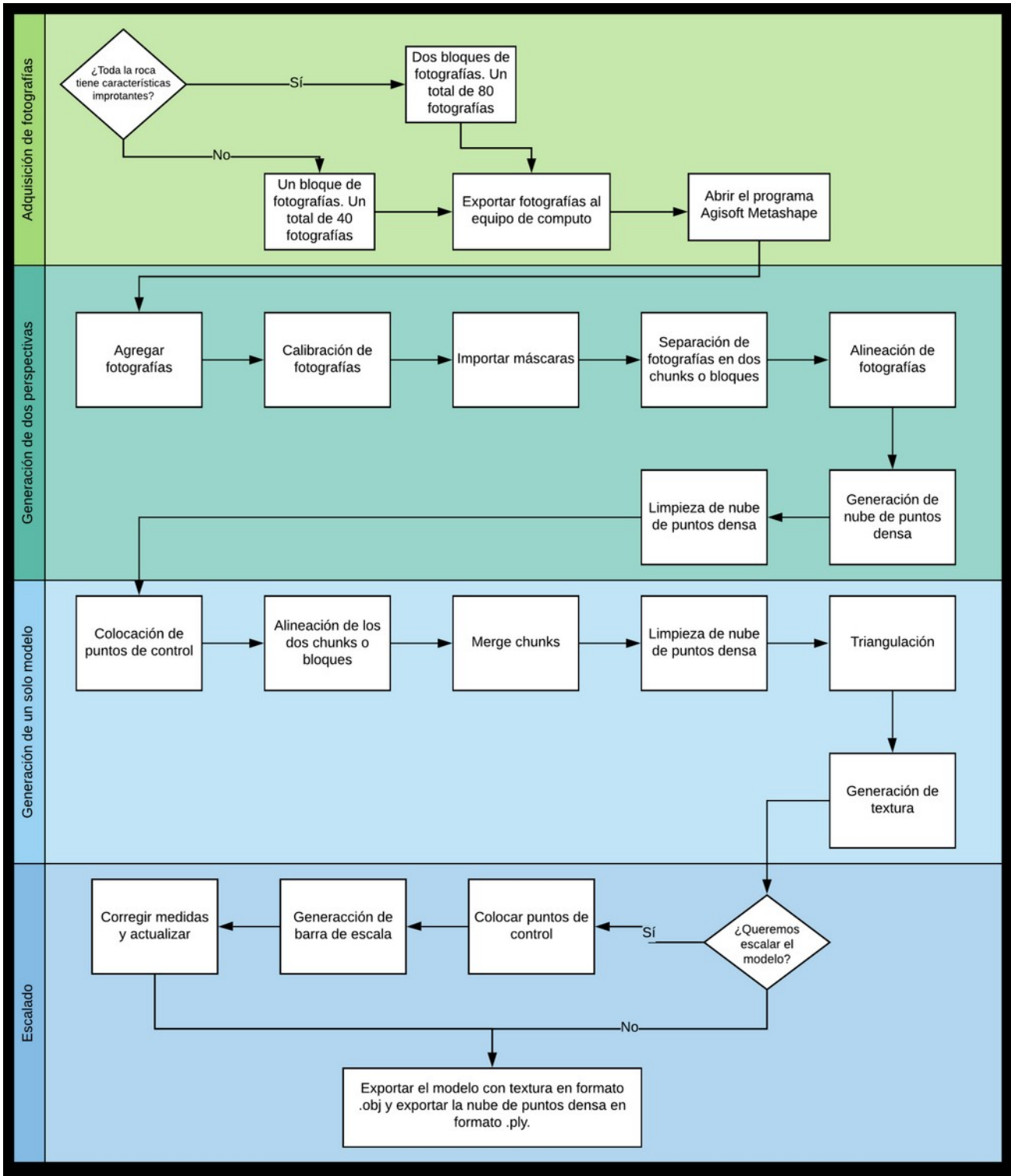
VI. Se coloca el trípode tratando de que la cámara abarque toda la plantilla y la muestra.

VII. Ubicar la cámara aproximadamente a 10 cm de la muestra de roca (se recomienda mantener esta distancia durante la toma de todas las fotografías).



Figura 2. Espacio de trabajo.

Esta guía de aprendizaje se complementa con la serie de videotutoriales de nombre “Modelos 3D de muestras de roca” y se va a estar compuesto de las siguientes secciones:



Adquisición de fotografías

Generación de dos perspectivas

Generación de un solo modelo

Escalado

¿Toda la roca tiene características importantes?

Un bloque de fotografías. Un total de 40 fotografías

Dos bloques de fotografías. Un total de 80 fotografías

Exportar fotografías al equipo de computo

Abrir el programa Agisoft Metashape

Agregar fotografías

Calibración de fotografías

Importar máscaras

Separación de fotografías en dos chunks o bloques

Alineación de fotografías

Generación de nube de puntos densa

Limpieza de nube de puntos densa

Colocación de puntos de control

Alineación de los dos chunks o bloques

Merge chunks

Limpieza de nube de puntos densa

Triangulación

Generación de textura

Corregir medidas y actualizar

Generación de barra de escala

Colocar puntos de control

¿Queremos escalar el modelo?

Exportar el modelo con textura en formato .obj y exportar la nube de puntos densa en formato .ply.

4.2. Adquisición de fotografías

La toma de fotografías se va a realizar de la siguiente forma:

- 1) Acomodar la cámara a la misma altura que la de la base giratoria y girar la base hasta que la marca circular negra de 0° se encuentre enfrente de la cámara para así tomar la primera fotografía. Las fotografías siempre deben abarcar toda la muestra de roca.
- 2) Girar la base giratoria hasta que la marca negra de 30° quede delante de la cámara y tomar la segunda fotografía. Continuar girando la base giratoria y tomar una fotografía cada 30° tomando como referencia cada marca circular en color negro hasta que haya rotado completamente (es decir, a 60° , 90° , 120° , 150° , 180° , 210° , 240° , 270° , 300° , 330°).
- 3) Colocar la cámara aproximadamente 5 centímetros más arriba de la base giratoria de manera que tengamos otra perspectiva de la roca procurando que se respete la distancia inicial entre la muestra de roca y la cámara. La siguiente fotografía se va a tomar cuando la cámara se encuentre frente a la marca circular verde de 10° . Rotar la base hasta la marca de 40° y tomar la fotografía, repetir este procedimiento en 70° , 100° , 130° , 160° , 190° , 220° , 250° , 280° , 310° y 340° .
- 4) Colocar la cámara aproximadamente 10 centímetros más arriba que la mesa giratoria de manera que tengamos otra perspectiva de la roca. La siguiente fotografía se va a tomar cuando la cámara se encuentre frente a la marca circular roja de 20° . Girar la base hasta que frente a la cámara se encuentre la marca de 50° y tomar la fotografía, repetir este procedimiento en 80° , 110° , 140° , 170° , 200° , 230° , 260° , 290° , 320° y 350° .
- 5) Se sugiere tomar 4 fotografías adicionales en las marcas de 0° , 90° , 180° y 270° para tener más precisión. En estas fotografías la cámara debe de enfocar la parte de arriba y estar casi perpendicular a la muestra de roca.
- 6) Repetir este procedimiento en caso de que la muestra presente características importantes en toda la muestra de roca generando dos bloques de fotografías (Figura 3). Para poder separar estos dos bloques de fotografías se recomienda tomar una foto sin muestra entre cada bloque.

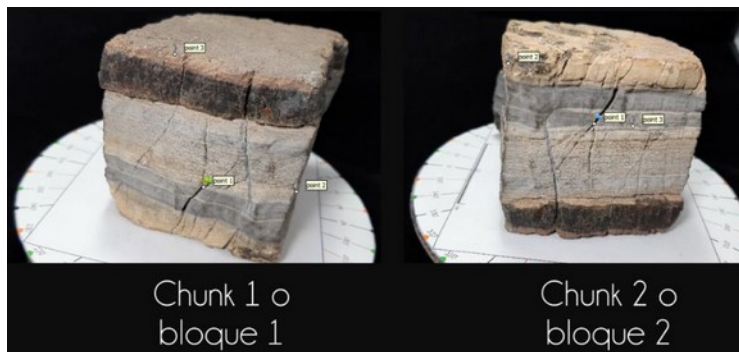


Figura 3. Fotografías de dos perspectivas de la muestra de roca.

4.3. Generación de dos perspectivas

Este es el primer bloque de pasos para el procesamiento de las fotografías en Agisoft Metashape Professional y tiene como objetivo la generación de dos nubes de puntos densa con las diferentes perspectivas de la muestra de roca. Ver videotutorial “Modelos 3D de muestras de roca: Generación de dos perspectivas”.

1) Agregar fotografías

Agisoft Metashape permite agregar las fotografías de la siguiente manera:

- I. En la barra de herramientas se encuentra el menú “Workflow” o Flujo de trabajo donde está la opción de agregar fotos.
- II. En el cuadro de diálogo Agregar fotos, busque la carpeta en la que se encuentran las fotografías (80 o 40) que se quieren procesar y que se tomaron con anterioridad.
- III. Hacer clic en el botón de Abrir.
- IV. Las fotografías van a aparecer en el panel Espacio de trabajo.

2) Calibración de fotografías

Como se sabe el lente es una de las partes de la cámara que puede generar error como distorsiones radiales y tangenciales, por lo que se necesita hacer una corrección en las fotografías que se quieran procesar.

Agisoft Metashape cuenta con una herramienta de calibración automática del lente de la cámara con la que fueron tomadas las fotografías y genera un archivo de calibración con extensión XML mismo que debe ser cargado dentro del menú de herramientas. Para este caso en específico se proporcionó el archivo de calibración. Sin embargo, es posible generar un nuevo archivo de calibración.

3) Importación de máscaras

Las máscaras son elementos que nos permiten excluir objetos no necesarios dentro de las fotografías durante el proceso de reconstrucción estereoscópica. En este caso como lo relevante es la muestra de roca es necesario quitar el fondo negro ya que podría generar ruido.

En el Espacio de trabajo seleccionar el Chunk 1, dar click derecho para visualizar las herramientas disponibles e importar máscaras.

Los parámetros que se van a utilizar son los siguientes:

- Método (especifica la fuente de los datos de máscara): De Alfa, es decir, de las fotos de origen.
- Operación mediante reemplazamiento: una nueva máscara se cargará y se almacena en lugar de la original.
- Aplicando las máscaras a todo el espacio de trabajo.

4) Separación de fotografías en dos Chunks

Debido a que se va a realizar un modelo en 3D de la muestra de roca completa es necesario separar las 80 fotografías cargadas en dos bloques o “Chunks”. Cada bloque tendrá 40 fotografías con una perspectiva diferente de la muestra de roca.

Seleccionar las primeras 40 fotografías y dar click derecho para mover las cámaras o fotografías a un nuevo “Chunk” o bloque.

5) Alineación de fotografías

En esta etapa de alineación, Metashape identifica puntos comunes en las fotografías para establecer sus relaciones espaciales y ubicaciones de las imágenes en un sistema de coordenadas arbitrario (en caso de no contar con coordenadas), ordenando los puntos en forma de una nube de puntos dispersa o no densa.

Se van a alinear las fotografías de ambos “Chunks” o bloques de manera separada utilizando la herramienta de “Batch Process” o proceso por lotes ubicado en menú del Flujo de trabajo. Dentro del proceso por lotes se va a agregar una nueva operación que sería la alineación de los dos “Chunks” por separado.

Los parámetros que se van a utilizar son los siguientes:

- Alineación de fotografías aplicado a todos los Chunks o bloques.
- Propiedades generales: Precisión alta

- Propiedades avanzadas: aplicar máscaras a los puntos de enlace o unión (tie-points) y activar la cámara de ajuste del modelo adaptativo.

6) Generación de nube de puntos densa

Para la creación de la nube de puntos densa, Metashape con base en la nube de puntos dispersa generada durante la alineación calcula la profundidad y la intensifica.

Se va a utilizar la misma herramienta de Procesos por lotes (Batch process) que fue utilizado durante la alineación. Los parámetros que se van a utilizar son los siguientes:

- Creación de la nube de puntos densa aplicado a todos los Chunks.
- Propiedades generales: Calidad media.
- Propiedades avanzadas: filtrado de profundidad agresivo y cálculo de los colores de los puntos.

7) Limpieza de nube de puntos densa

Debido a que el software también generó la nube de puntos densa de la plantilla y parte del fondo es posible eliminar estos puntos que se consideran como ruido para esto, Agisoft Metashape cuenta varias herramientas para eliminar y seleccionar puntos.

Es importante la limpieza de la nube de puntos densa en los dos Chunks porque el software puede tomar en consideración los puntos identificados como ruido para la reconstrucción de muestra de roca, provocando un error al momento de hacer un análisis en la nube de puntos densa.

4.4. Generación de un solo modelo

En el segundo bloque de pasos para el procesamiento de las fotografías tiene como objetivo generar un solo modelo mediante la unión de los dos modelos generados en el primer bloque de pasos.

1) Colocación de puntos de control

Para poder combinar los dos modelos es necesario colocar puntos de control o marcadores en las fotografías de estos dos modelos. Estos puntos de control deben de ser encontrados fácilmente en los dos Chunks y se pueden colocar en características muy particulares y visibles de la muestra de roca. Es muy importante colocar estos marcadores en los mismos lugares en cada fotografía para que el software alinee de manera exitosa los dos modelos.

En Agisoft Metashape los marcadores se ponen de la siguiente manera:

- Doble click en la fotografía deseada.

- Click derecho en el lugar donde se va a poner el punto de control o marcador.
- El marcador debe tener una bandera azul o verde. Si está en gris no lo va a tomar en cuenta.

En nuestro caso se van a colocar 3 puntos de control o marcadores.

2) Alineación de los dos Chunks

La herramienta para alinear los dos modelos se encuentra en el menú del Flujo de trabajo.

Los parámetros que se van a utilizar son los siguientes:

- Seleccionar las casillas del Chunk 1 y 2.
- Método: basado en los marcadores.
- Desactivar la casilla de arreglar escala.

3) Merge chunks

Una vez completada la alineación es posible combinar los dos modelos mediante la función de fusionar bloques o “Merge chunks” ubicada en el flujo de trabajo. Los parámetros que se van a utilizar son los siguientes:

- Activar las casillas del Chunk1 y 2.
- Activar únicamente las casillas de combinar las nubes de puntos densa y los marcadores.
- En automático se generará un nuevo archivo llamado “Merged Chunk” el cual va a tener el modelo resultante de la unión de los dos modelos para así tener un modelo de la muestra de roca completa.

4) Limpieza de nube de puntos densa

En caso de requerir una mayor precisión es posible volver a limpiar la nube de puntos densa del nuevo modelo generado (Merge Chunk) utilizando las herramientas de Agisoft Metashape.

5) Triangulación

Basado en la nube de puntos densa del archivo generado, Metashape hace una triangulación para la construcción de una malla o un modelo poligonal.

La herramienta para crear una malla se encuentra en el menú de Flujo de trabajo, los parámetros que se van a utilizar son los siguientes:

- Propiedades generales

Datos fuente: Nube de puntos densa

Tipo de superficie: Arbitraria (3D)

Número de caras: Alta

- Propiedades avanzadas

Interpolación: por defecto

Calcular colores de los vértices

6) Generación de textura

Por último, se va a generar la textura de nuestro modelo a partir de las fotografías tomadas.

La herramienta para construir textura se encuentra ubicada en el menú de Flujo de trabajo, los parámetros que se van a utilizar son los siguientes:

- Modo de mapeo: Genérico
- Modo de fusión: Mosaico

4.5. Escalado

Es de suma importancia escalar nuestros modelos porque el estudiante puede hacer un análisis de datos más exacto, por lo que vamos a escalarlo de la siguiente manera:

1) Colocación de puntos de control

Para poder escalar un modelo es necesario conocer las medidas exactas de la plantilla que usemos. En nuestro caso vamos a colocar dos marcadores en las esquinas del cuadrado.

2) Generación de una barra de escala

- Seleccionar los últimos dos marcadores (Punto 4 y Punto 5).
- Click derecho y crear barra de escala.

3) Corregir medidas y actualizar

- Pasamos del espacio de trabajo a las referencias donde vamos a colocar las medidas ya conocidas que en nuestro caso el cuadrado mide 10 cm x 10 cm.
- En la distancia se va a escribir la medida correcta, 0.10 (m). Al darle *enter* nos va a arrojar un error.
- Para corregir este error es necesario actualizar la distancia correcta (0.10 m).

- Así podemos estar seguros de que la distancia entre el Punto 4 y el Punto 5 va a ser de 10 cm en nuestro modelo.

5. Resultados y reporte

Por último, se pueden obtener dos diferentes productos:

- 1) Modelo en 3D de la muestra de roca con textura.

Agisoft permite exportar el modelo con textura en el formato OBJ de la siguiente manera:

Seleccionar el archivo “Merged Chunk” hasta que se encuentre en negritas.

- Click derecho y exportar modelo.

NOTA: En caso de contar con Windows 10 se puede abrir y visualizar este archivo en la aplicación Visor 3D de la corporación Microsoft.

- 2) Nube de puntos densa de la muestra de roca.

Es importante exportar la nube de puntos densa de la muestra de roca si queremos hacer un análisis de fracturas, discontinuidades, cambios de color en la roca, entre otras características de la roca en softwares libres como MeshLab (es posible hacer mediciones) y CloudCompare.

Agisoft permite exportar la nube de puntos densa en formato PLY entre otros. Se exporta la nube de puntos densa de la siguiente manera:

- Seleccionar el archivo “Merged Chunk” hasta que se encuentre en negritas
- Click derecho y exportar puntos.

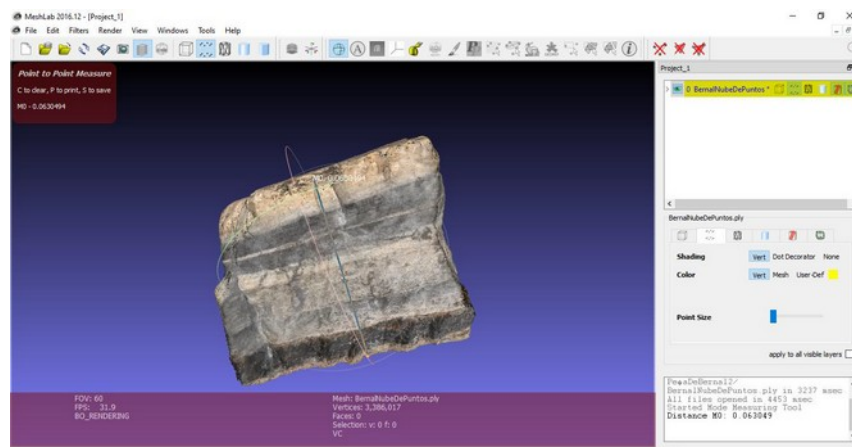


Figura 4. Medición de nube de puntos densa en MeshLab.

6. Referencias citadas

- Baker, B., Gessner, K., Holden, E.-J., & Squelch, A. (2008). Automatic detection of anisotropic features on rock surfaces. *Geosphere*, 418-428. <https://doi.org/10.1130/GES00145.1>
- Caire Lomeli, J. (1977). *Fotogrametría-I, Fotogrametría terrestres*. México, D.F: Editorial Rodriguez.
- Jalandoni, A., Domingo, I., & Taçon, P. (2018). Testing the value of low-cost Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry for metric and visual analysis of rock art. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 605-616. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.12.020>
- James, M., & Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, F03017, 17. <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Linder, W. (2006). *Digital Photogrammetry. A practical course*. Springer. Berlin Heidelberg New York. ISBN-13: 978-3-540-29152-7
- Porter, S. T., Roussel, M., & Soressi, M. (2016). A Simple Photogrammetry Rig for the Reliable Creation of 3D Artifact Models in the Field. *Advances in Archeological Practice* 4(1). *A Journal of the Society for American Archaeology*, 71-86. DOI: 10.7183/2326-3768.4.1.71
- Quirós Rosado, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. Cáceres: Universidad de Extremadura. ISBN: 978-84-697-1317-4
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., & Jordá, L. (2016). Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos. *Conference Paper, Researchgate*, 209-215.
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., & Jorda, L. (2019). Digital 3D Rocks: A Collaborative Benchmark for Learning Rocks Recognition. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01843-3>
- Santamaría Peña, J., & Sanz Méndez, T. (2011). *Fundamentos de Fotogrametría*. Universidad de la Rioja. Material Didáctico n.16. ISBN: 978-84-694-0865-0
- Silva Romo, G., Mendoza Rosales, C. C., & Campos Madrigal, E. (2016). *Elementos de Cartografía Geológica*. México: UNAM, Facultad de Ingeniería.

Westoby, M., Brasington, J., Glasse, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience application. *Geomorphology*. Volumen 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>