



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Generación de modelos 3D  
de muestras de roca con  
*Structure from Motion***

**MATERIAL DIDÁCTICO**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

Mario Michel Montoya Ramírez

**ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO**

Lic. Sergio Enrique Macías Medrano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021



## **MATERIAL DIDÁCTICO PARTE DEL PROYECTO**

**DGAPA/UNAM/PAPIME: “Geología desde los ojos de un Dron: una poderosa herramienta educativa para los actuales ingenieros de la Tierra”**

Este documento que forma parte de las Guías de Aprendizaje Autónoma, Videotutoriales y Modelos 3D de muestras de roca del proyecto DGAPA/UNAM/PAPIME: PE101020 “Geología desde los ojos de un Dron: una poderosa herramienta educativa para los actuales ingenieros de la Tierra” a cargo del Dr. José Antonio Hernández Espriú.

## AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (PAPIME) de la UNAM PE101020, “Geología desde los ojos de un Dron: una poderosa herramienta educativa para los actuales ingenieros de la Tierra” a cargo del Dr. José Antonio Hernández Espriú. Particularmente agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida que me permitió culminar la realización de este material didáctico.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente al Lic. Sergio Macías Medrano por compartir su conocimiento, su confianza y por la oportunidad de ser parte del proyecto.

Al Dr. José Antonio Hernández Espriú encargado del proyecto por aceptar mi participación en el.

Al grupo de trabajo del proyecto, al Dr. José Antonio Hernández Espriú, Ing. Javier Mancera Alejándrez, Lic. Sergio Macías Medrano, Eduardo, Dr. Darío Emmanuel Solano Rojas y al Dr. Enrique Alejandro González Torres.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme la mejor educación y la oportunidad de desarrollarme como persona.

Agradezco al Lic. Sergio Macías Medrano por estar siempre pendiente de que aprendiera, contagiarme su gusto por la fotogrametría y por todo su apoyo desde el servicio social.

Agradezco a mi familia y a mis padres por creer en mí y brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera. Gracias por haberme dado las fuerzas, así como los medios suficientes para poder desarrollarme intelectual y moralmente.

A mis compañeros y amigos, Brenda, Nancy, Bianca, Isa, Alana, Gigi, Adri, etc por tantas experiencias y prácticas juntos.

## ÍNDICE

Lista de figuras y tablas .....	6
<b>1. Introducción.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Marco teórico .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Fotogrametría.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1 Fundamentos básicos de la fotogrametría tradicional .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.2 Fotogrametría digital: Structure from Motion .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Agisoft Metashape Professional (Aspectos generales y ventajas).....</b>	<b>14</b>
<b>3. Aplicación en las geociencias .....</b>	<b>16</b>
<b>4. Ejemplo de aplicación.....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 Resultados y posible aplicación.....</b>	<b>22</b>
<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>25</b>
<b>6. Referencias citadas .....</b>	<b>27</b>

## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Clasificación de la fotogrametría digital. ....	9
Figura 2. Visión estereoscópica natural. Tomado de (Rosas et. al., 2007). ....	10
Figura 3. Visión estereoscópica artificial. Tomado de (Rosas et. al., 2007). ....	10
Figura 4. Representación del paralaje. Tomado de (Quirós Rosado, 2014). ....	11
Figura 5. Geometría epipolar.....	12
Figura 6. Reconstrucción de una nube de puntos a partir de la superposición de varias fotografías. ....	13
Figura 7. A. "Cubo" de Peña de Bernal. B. Núcleo.....	17
Figura 8. Pasos durante la adquisición de fotografías. ....	18
Figura 9. Resultado del primer bloque de pasos para el procesamiento de imágenes en Agisoft Metashape Proffessional. ....	19
Figura 10. Pasos para la generación de dos perspectivas.....	20
Figura 11. Alineación y combinación de dos modelos 3D. ....	21
Figura 12. Pasos para la generación de un solo modelo.....	21
Figura 13. Colocación de puntos de control para escalar modelo 3D. ....	22
Figura 14. Pasos para escalar y exportar productos.....	22
Figura 15. A. Modelo 3D de muestra de Peña de Bernal. B. Modelo 3D de un núcleo.....	23
Figura 16. Medición en nube de puntos densa de muestra de roca de Peña de Bernal.....	24
Tabla 1. Comparación de diferentes softwares fotogramétrico con precios del 2020.....	15

# 1. INTRODUCCIÓN

En Ingeniería Geológica, la observación, descripción y clasificación de muestras de roca es de suma importancia para poder determinar los procesos que les dieron origen, e interpretar los ambientes geológicos y su historia geológica. Sin embargo, debido a la reciente pandemia del COVID-19 se le imposibilita al docente proporcionar dichas muestras de roca a sus alumnos de manera física; por lo que se presenta el siguiente documento que describe los pasos a seguir para la realización de modelos 3D de muestras de roca con dispositivos móviles, incluso fotográficos, al alcance de los alumnos.

En la actualidad existen varios investigadores que han desarrollado varios materiales digitales para la creación y visualización de modelos, uno de ellos es Adrián Riquelme que cuenta con una colección de modelos 3D de muestras de roca para impartir asignaturas como Petrología (Riquelme et. al., 2016), además ha desarrollado las herramientas Structure from Motion para la caracterización de macizos rocosos (Riquelme et. al., 2016). Por otro lado, Ryan Hollister presenta visitas geológicas virtuales con diversas actividades y recursos, modelos 3D de muestras de roca y minerales, para que el alumno pueda complementar su trabajo de campo con material virtual. Una investigadora fundamental es Samantha Thi Porter debido a que en su artículo Porter et. al. (2016) propuso una metodología para realización de modelos 3D de artefactos con interés arqueológico, este artículo se tomó como base para la creación de los materiales didácticos generados en esta investigación. Sin embargo, aunque estos autores cuentan con modelos con excelente calidad y escritos con parte de su metodología no existe algún documento(s) que explique(n) de manera detallada los pasos a seguir para generar modelos 3D de muestras de roca.

Esta problemática se resuelve con el material generado como parte del proyecto DGAPA/UNAM/PAPIME: PE101020 “Geología desde los ojos de un Dron: una poderosa herramienta educativa para los actuales ingenieros de la Tierra”, que son los siguientes:

1. Guía de Aprendizaje Autónoma: “*Generación de modelos 3D de muestras de roca con SfM*” (<https://drones.unam.mx/guias-aprendizaje> ). Esta describe los pasos a seguir para generar su propio modelo desde la adquisición de fotografías hasta el procesamiento de ellas.
2. Plantillas fotogramétricas (3) a diferentes escalas.
3. Serie de 4 videotutoriales ([https://www.youtube.com/playlist?list=PL4b-3GKJaF7wmW7tKAEb0Bo10Iducycj\\_](https://www.youtube.com/playlist?list=PL4b-3GKJaF7wmW7tKAEb0Bo10Iducycj_) ). 1 videotutorial por cada etapa de la metodología planteada en la Guía de Aprendizaje Autónoma.
4. Modelos 3D de muestras de rocas en Sketchfab (<https://sketchfab.com/IngenieriaGeologicaAsistida> ).

5. Este documento. Como parte de la opción X. de Titulación por actividad de apoyo a la docencia se presenta este documento el cual presenta los fundamentos para la realización del material didáctico generado en el proyecto DGAPA/UNAM/PAPIME: PE101020 “Geología desde los ojos de un Dron: una poderosa herramienta educativa para los actuales ingenieros de la Tierra”, así como los resultados, conclusiones y recomendaciones.

Por último, estos materiales tienen como finalidad proporcionar a los docentes y alumnos una herramienta adicional que complementa al trabajo de campo y laboratorio al considerar la situación actual que se está viviendo en el mundo.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 FOTOGRAMETRÍA**

La fotogrametría, según la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS, 2014), es el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos. La fotogrametría es, en esencia la ciencia que utiliza fotografías para hacer medidas, generar planos y mapas de gran exactitud. Aunado a esto, permite conocer las características geométricas (formas y dimensiones) y su posición en el espacio.

La evolución de la fotogrametría se da principalmente en cuatro etapas:

1. Inicios de la fotogrametría o fotogrametría plana (1839-1870).  
Empieza en 1839 con la invención de la fotografía en Francia por Joseph Nicéphore Niepce y Daguerre. Más adelante, el coronel Aimé Laussedat, considerado el padre de la fotogrametría en 1851, comienza la fotogrametría terrestre al obtener planos exactos de edificios y pequeñas extensiones a partir de una fotografía. Albrecht Meydenbauer se conoce como el autor del término “fotogrametría” utilizándolo por primera vez en un artículo de una revista de arquitectura publicada en 1867. (Cheli, 2012).
2. Fotogrametría analógica (1900-1970).  
Invención del aeroplano y de la estereoscopia dando origen a la estereofotogrametría. Se considera al padre de la estereofotogrametría analítica al Dr. Carl Pulfrich (1901) al realizar medidas estereoscópicas con un estereocomparador a partir del cual todos los instrumentos se basaron. La medición dentro de la fotogrametría analógica se realiza con fotografías analógicas de restitución óptica o mecánica, donde el operador realiza la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico debidamente nivelado y escalado. (Cheli, 2012).
3. Fotogrametría analítica (1970-1990).

Inicia con la invención de las computadoras. Se crea el restituidor analítico por Uki Helava, agilizando tiempos y mejorando los niveles de detalle a diferentes escalas mediante técnicas computacionales. Se posibilita el vuelco de la información a programas de tipo CAD. (Lerma García, 2002).

4. Fotogrametría digital (1990-Actualidad).

Iniciado con el lanzamiento del primer satélite artificial y el uso del satélite Landsat. Los restituidores analíticos son reemplazados por computadoras personales repotencializadas, las que resuelven la relación entre las coordenadas de puntos medidas sobre la imagen digital y sus correspondientes en el terreno (mediante la ecuación de colinealidad), proyectando el uso de la fotogrametría en el campo satelital (Linder, 2006). A través de diversos artículos (Fawcett et al., 2019; Jaud et al., 2019; y Pearse et al., 2018) se ha observado que la fotogrametría es una disciplina flexible al converger en ella diversas herramientas para la adquisición de imágenes como son satélites, celulares, cámaras convencionales o drone, que cuenten con la capacidad de reconstruir de modo tridimensional prácticamente cualquier objeto a través de los algoritmos SfM. De esta manera, propongo la siguiente figura (FIGURA 1) en donde se organizan las herramientas de acuerdo al tipo de fotogrametría.

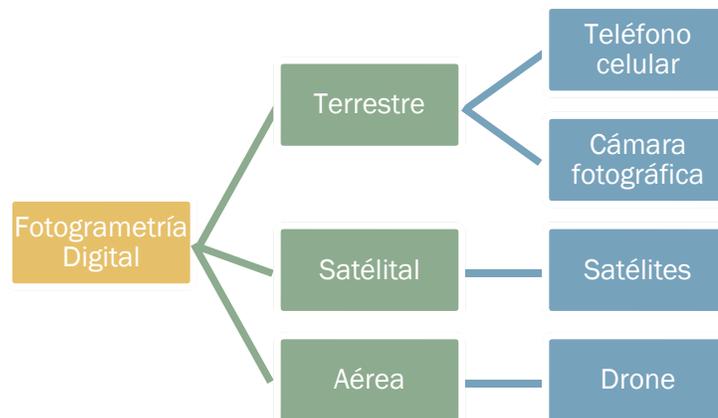


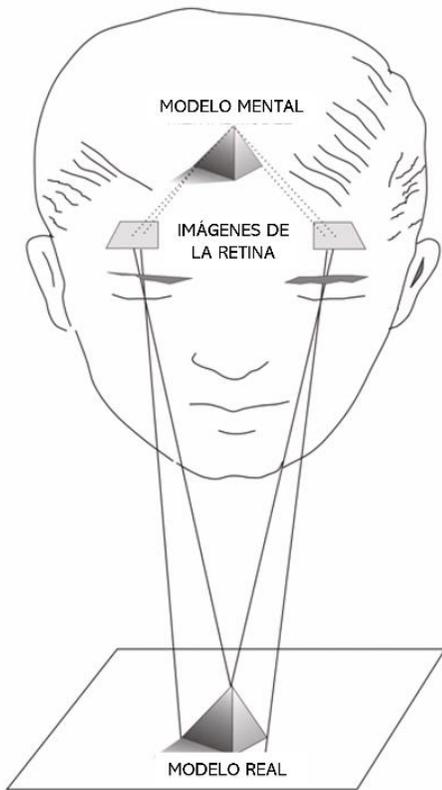
FIGURA 1. Clasificación de la fotogrametría digital. (Elaboración propia con información de Fawcett et al. (2019), Jaud et al. (2019) y Pearse et al. (2018))

### 2.1.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA FOTOGAMETRÍA TRADICIONAL

La fotogrametría tradicional se apoya fundamentalmente en las relaciones matemáticas de la geometría proyectiva y de visión estereoscópica.

La visión estereoscópica se puede dar principalmente de dos maneras:

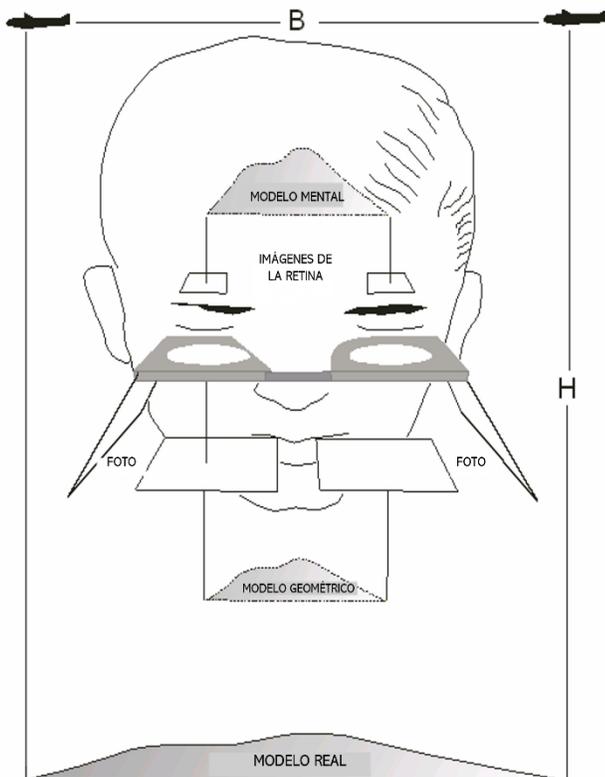
- Visión estereoscópica natural.



La visión estereoscópica natural (FIGURA 2) es la capacidad que tiene el ser humano de integrar una sola imagen tridimensional, en relieve y con suficiente profundidad. Es decir, cada ojo captura imagen de un mismo objeto y en el cerebro, se unen por un proceso mental generando una única imagen en tres dimensiones.

FIGURA 2. Visión estereoscópica natural. Tomado de (Rosas et. al., 2007).

- Visión estereoscópica artificial



En la visión estereoscópica artificial (FIGURA 3) se utilizan un par de imágenes estéreo de una misma escena donde las cámaras están situadas en diferentes posiciones y se encuentran separadas, pero cuentan con una superposición determinada. Se puede hacer uso de un estereoscopio (FIGURA 3).

FIGURA 3. Visión estereoscópica artificial. Tomado de (Rosas et. al., 2007).

Otro concepto importante dentro de fotogrametría es el paralaje (FIGURA 4) que se define como el desplazamiento de la posición de un objeto en dos fotografías consecutivas causado por un cambio en la posición de la cámara al realizar los disparos. Esos desplazamientos permiten calcular las distancias entre los objetos del terreno.

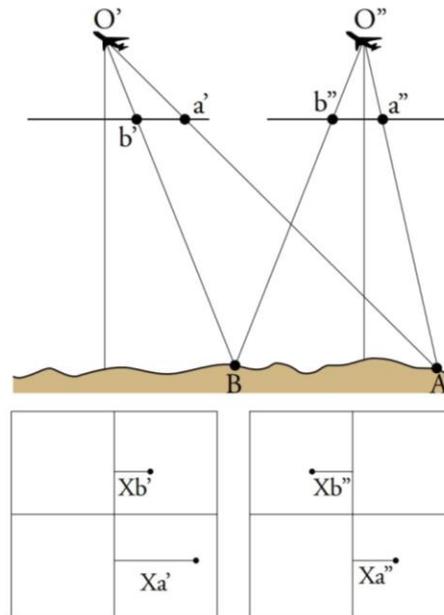


FIGURA 4. Representación del paralaje. Tomado de (Quirós Rosado, 2014).

En la FIGURA 4 se representa el paralaje estereoscópico donde \$O'\$ y \$O''\$ son las diferentes posiciones de la cámara y \$A\$ y \$B\$ son los puntos del terreno que se van a fotografiar, se le va a llamar paralaje a la siguiente cantidad:

$$Pa = xa' - xa'' \quad Pb = xb' - xb''$$

### 2.1.2 Fotogrametría digital: Structure from Motion

Un método fotogramétrico muy utilizado dentro de la fotogrametría digital es *Structure from Motion (SfM)* el cual es considerado de bajo costo y de alta resolución. El término “*Structure*” se refiere a todos los parámetros de la escena como la posición de cámara, orientaciones, longitudes focales y posiciones relativas; y “*Motion*” se refiere al movimiento de la cámara.

Tiene sus orígenes en el campo de la visión artificial y el desarrollo de los algoritmos automáticos de correlación automática de imágenes (CAI) (Riquelme et. al., 2016; Westoby et. al., 2012). Sin embargo, este método se basa en los principios básicos de fotogrametría tradicional como lo es el paralaje y la estereoscopia, ésta última busca un efecto de relieve y otro

de apreciación de distancias, de forma que a partir de dos fotografías sea posible reconstruir un modelo donde se puedan realizar mediciones en altimetría y planimetría.

SfM implica la determinación de la geometría epipolar (FIGURA 5) entre dos cámaras, esta condición se cumple cuando los dos ejes de la cámara de un sistema estereoscópico son paralelos entre sí y perpendiculares a la base (caso ideal).

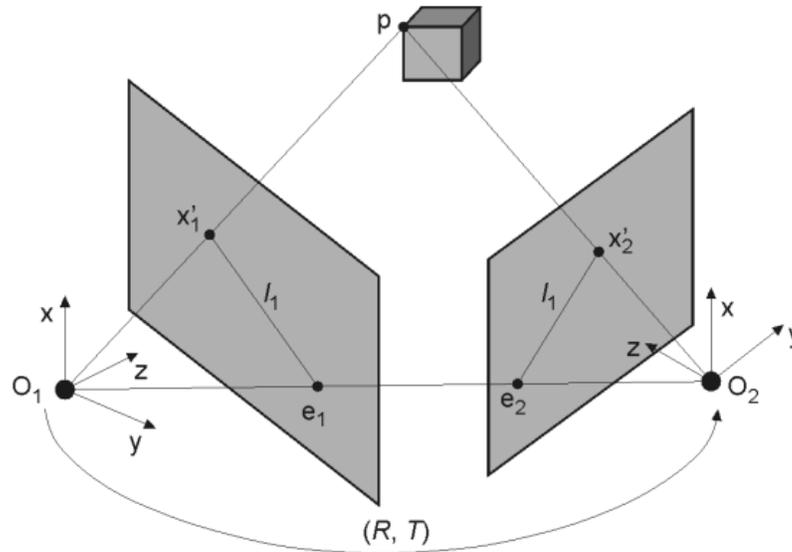


FIGURA 5. Geometría epipolar.

La Geometría Proyectiva es la que se encarga de estudiar la geometría epipolar, se toman dos fotografías de un objeto, conociendo la matriz del movimiento  $(R, T)$  rotación y traslación que lleva una cámara en la otra podríamos determinar las verdaderas proporciones del objeto.

La Figura 5 muestra la geometría epipolar donde los puntos  $O_1$  y  $O_2$  son los centros de las cámaras,  $X'_1$  y  $X'_2$  son las proyecciones del punto  $p$  (se trata de un punto del objeto a restituir) sobre los planos imágenes,  $e_1$  y  $e_2$  son los epipolos (intersecciones de los planos imagen con la línea base), el plano conformado por  $O_1$ ,  $O_2$  y  $p$  se llama plano epipolar y por último las rectas  $l_1$  y  $l_2$  son las rectas epipolares que se definen como la intersección del plano epipolar con los planos imágenes que pasan por los epipolos.

Para ubicar la posición 3D de un punto a partir de un conjunto de ubicaciones de imágenes y las posiciones de la cámara se utiliza la triangulación, este proceso SfM lo resuelve utilizando sus algoritmos.

Por lo tanto, SfM identifica de manera automática la posición de cámara, la orientación y la geometría de la escena incluso si no se cuenta con coordenadas 3D conocidas basándose en la correlación de un conjunto de imágenes no necesariamente estructuradas para así generar una

nube de puntos 3D en un sistema coordenado arbitrario (FIGURA 6). Para poder otorgarle un sistema de coordenadas a la nube de puntos es necesario hacer uso de la Georectificación.

La Georectificación significa convertir la nube de puntos de un sistema de coordenadas arbitrario interno en un sistema de coordenadas. Esto se puede lograr de dos formas:

- Directo. Se realiza cuando se conocen las coordenadas de la posición de la cámara, en conjunto con la distancia focal, por lo que el sistema de referencia del modelo resultante adopta el mismo en el que se encuentran las coordenadas de la cámara.
- Indirecto. Para que el método cuente con un sistema coordenado definido es necesario hacer uso de los marcadores o puntos de control terrestre (GCP por sus siglas en inglés) con coordenadas conocidas, estos puntos permiten escalar y georreferenciar la nube de puntos 3D. Si lo que se pretende es referir el modelo a un sistema coordenado proyectado como puede ser UTM, entonces se deberá emplear un receptor GPS. En contraste, si lo que se pretende es colocar puntos de control sobre un modelo como las muestras de roca, entonces basta con colocar marcadores.

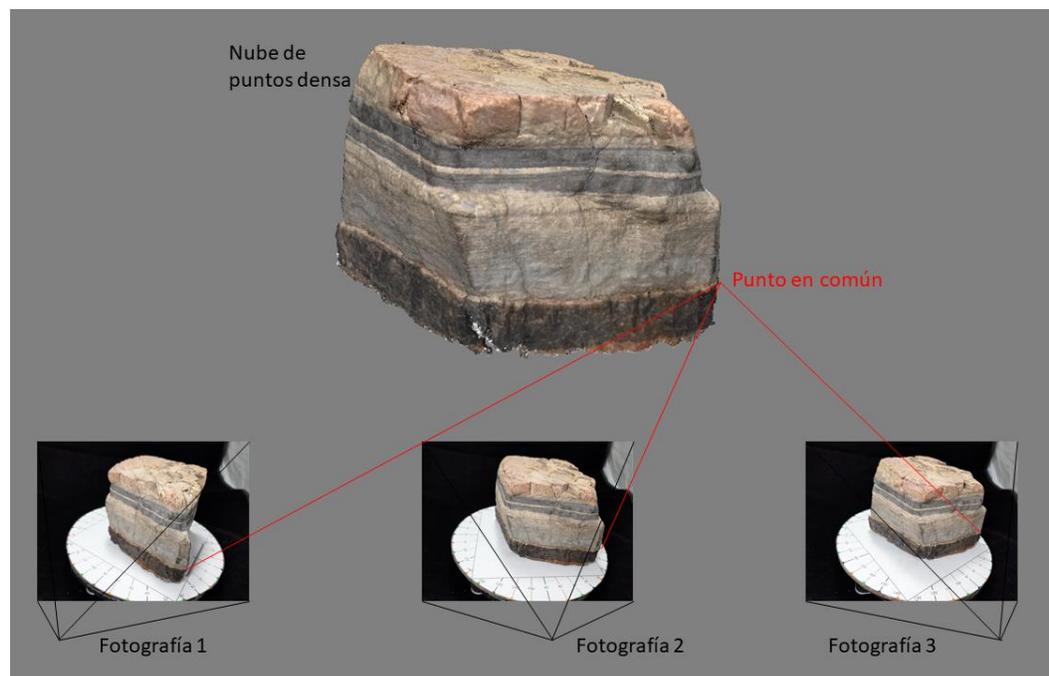


FIGURA 6. Reconstrucción de una nube de puntos a partir de la superposición de varias fotografías.

Si nos remitimos a la documentación que proporciona Agisoft LLC (2020), el concepto GCP está referido principalmente a los datos que se recaban a partir de un receptor GPS en los puntos de control definidos previamente sobre el área de estudio, por lo que es posible referenciar el modelo a la ubicación correcta en el espacio geográfico. Sin embargo, existen aplicaciones dentro de la fotogrametría a corto alcance como es la reconstrucción de muestras de roca, entre otras, en donde estrictamente no se realizan mediciones de este tipo y, por el contrario, como se muestra

en este trabajo, las coordenadas que se emplean como puntos de control se definen mejor como marcadores.

En el caso de los marcadores, son de suma de importancia a escala de muestras de roca debido a que estos permiten georreferenciar y mejoran la precisión relativa y absoluta del proyecto.

Los softwares que utilizan este método para la reconstrucción fotogramétrica se dividen en dos categorías:

1. Software comercial o de paga. Este tipo de software normalmente tiene un flujo de trabajo más ágil e intuitivo. Sin embargo, se tiene que pagar una cuota mensual o anual para hacer uso de este. Los más utilizados en la fotogrametría son Pix4D (2021) y Agisoft Metashape Professional (2020).
2. Software open-source. Son software de código abierto donde el flujo de trabajo es más complejo donde puede ser necesario utilizar varios programas en secuencia para obtener los resultados deseados. Algunos de estos softwares son COLMAP (2018) y OpenDroneMap (2018).

## **2.2 AGISOFT METASHAPE PROFESSIONAL (ASPECTOS GENERALES Y VENTAJAS)**

Agisoft Metashape Professional es un software fotogramétrico de licencia de paga que procesa de manera automática imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D para su uso en Sistemas de Información Geográfica, documentación de patrimonio cultural y para realizar mediciones indirectas de objetos a diferentes escalas.

En la actualidad, Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, 2020) es uno de los softwares más utilizados en el campo de la fotogrametría porque puede ser utilizado dentro de muchas ramas de las geociencias. Sin embargo, existen otros softwares fotogramétricos como lo son Pix4D (2021), COLMAP (2018), OpenDroneMap (2018), DroneDeploy (2021), entre otros que son de gran utilidad para el procesamiento de imágenes digitales y generación de productos a partir de estas. En la TABLA 1 se presenta una comparación de los diferentes softwares fotogramétricos.

<i><b>Software</b></i>	<b>Licencia (USD)</b>	<b>Sistema operativo</b>
<i>Agisoft Metashape</i>	Prueba de 30 días, después \$3 499	Windows, Mac OS, Linux
<i>Pix4D</i>	Prueba de 15 días, después desde \$291.67 al mes	Windows, Mac OS, Online

<i>COLMAP</i>	Libre	Windows, Mac OS, Linux/Unix/BSD
<i>OpenDroneMap</i>	Libre	Windows, Mac OS, Linux, Ubuntu/Debian, Fedora, CentOS/RHEL, Arch
<i>DroneDeploy</i>	\$99 al mes	Online

TABLA 1. Comparación de diferentes softwares fotogramétrico con precios del 2020.

Agisoft Metashape Professional permite procesar imágenes digitales provenientes de cámaras RGB o multispectrales, incluidos los sistemas multicámara, estas imágenes pueden ser corregidas de manera automática, permite calcular nubes de puntos densas, modelos texturizados, ortomosaicos georreferenciados de alta resolución, Modelos Digitales de Elevación/Superficie con alto nivel de detalle, curvas de nivel y modelos 3D texturizados. Asimismo, es posible eliminar sombras y objetos con textura de los modelos mediante la herramienta de máscaras, así como también permite clasificar de manera automática nubes de puntos densas dependiendo del color y forma, entre otras herramientas útiles e importantes para los estudiosos de las Ciencias de la Tierra. Agisoft Metashape Professional puede ser utilidad de la siguiente manera:

- Minas y canteras – DEM precisas para el cálculo del volumen de material. (Benevenuti & De Lemos Peroni, 2021)
- Agricultura de precisión – Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada, soporte de imágenes pancromáticas, multispectrales y térmicas. (González et al., 2017).
- Topografía y cartografía – Triangulación aérea, nube de puntos densa y generación de ortomosaicos u ortofotos. Mediciones indirectas dentro de estos productos. (James & Robson, 2012; Verma & Bourke, 2019)
- Arqueología y documentación – Soporte para cámaras profesionales y de consumo para la generación de modelos 3D de objetos históricos. (Porter et. al., 2016)
- Preservación del patrimonio cultural – Soporte de imágenes aéreas y oblicuas. (Jaladoni et. al., 2018; Porter et. al., 2016)

Una de las ventajas de este software es que cuenta con un flujo de trabajo lineal (*Workflow*) muy intuitivo y automatizado que incluso puede ser utilizado por alguien que no cuente con conocimientos amplios en fotogrametría.

Se eligió este software para el procesamiento de estas imágenes ya que cuenta con una herramienta fundamental (puntos de control o marcadores) para realizar la reconstrucción fotogramétrica de los modelos 3D de muestras de rocas. Los puntos de control son de gran importancia debido a que disminuyen el error cuadrático, permite escalar el modelo y

georreferenciarlo, pero mucho más importante se utiliza para la unión de dos modelos con diferentes perspectivas de las muestras de roca.

### **3. APLICACIÓN EN LAS GEOCIENCIAS**

La fotogrametría ha sido utilizada en varios ámbitos de las geociencias (Westoby et. al., 2012) como lo son en la arqueología (Jaladoni et. al., 2018; Porter et. al., 2016)) y en la paleontología para la preservación de fósiles. Dentro de la geología ha sido aplicado en 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), caracterización geotécnica y evaluación de estabilidad en taludes (Tannant, 2015), mapas de erosión y movimiento de las masas rocosas en la geomorfología (James & Robson, 2012; Verma & Bourke, 2019).

En las geociencias no solo se han utilizado modelos 3D digitales sino también estos han sido impresos. Hasiuk (2014) indica la importancia de la impresión 3D debido a que se pueden hacer pruebas destructivas, exageración de la escala en modelos digitales de elevación para conceptos como la morfología, modelos cristalográficos y modelos de fósiles. Un claro ejemplo de esto es como Ishutov (2017) imprimió medios porosos para identificar el comportamiento del flujo en estos medios en hidrogeología y geología del petróleo.

De manera más específica, Harvey et. al. (2017) menciona la importancia de la generación de modelos 3D de muestras de rocas georreferenciadas que sean representativas de una unidad estratigráfica o región para crear una colección digital de acceso mundial. Esta aplicación puede ser de gran ayuda para el geólogo debido a que puede contar con un contexto más regional y puede realizar correlaciones estratigráficas y así proporcionar una mejor interpretación geológica.

En la actualidad, a causa de la pandemia del COVID-19 Andrews et. al. (2020) menciona que debido a la dificultad de hacer accesibles minerales y muestras de rocas a los estudiantes de las geociencias se ha tenido que recurrir a realizar una colección de muestras de roca y minerales en 3D de manera digital para que puedan acceder a estos materiales de manera rápida y sin necesidad de salir de sus hogares.

Todas estas aplicaciones dentro de las geociencias han sido bien documentadas como ya se mencionó, no sólo para la visualización en 3D de objetos importantes dentro de esta rama sino para la impresión. Estos recursos pueden ser una herramienta fundamental para hacer más rápida y eficiente ciertas interpretaciones para los estudiosos de las geociencias.

## 4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para poder verificar la efectividad del método planteado para la generación de modelos 3D de muestras de rocas se realizaron dos modelos 3D de muestras ideales: un “cubo” y un núcleo (FIGURA 7). Se les llama “ideales” porque su forma permite un mejor manejo de ellas.

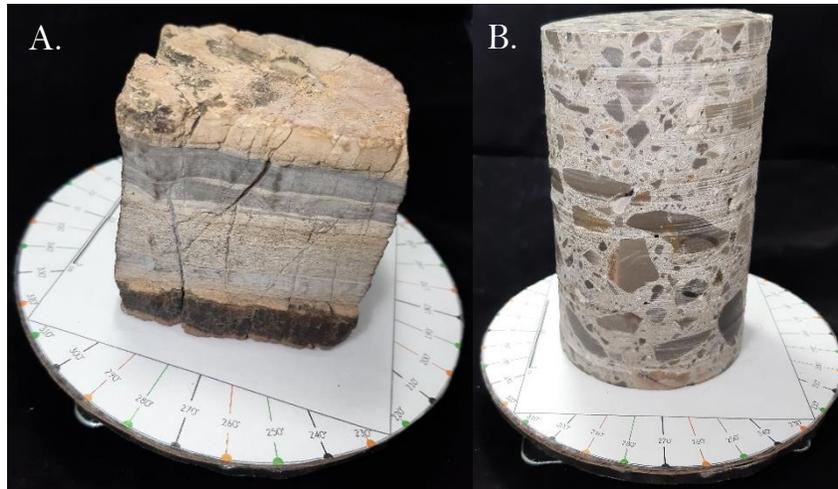


FIGURA 7. A. "Cubo" de Peña de Bernal. B. Núcleo.

Las dos muestras pasaron por los mismos pasos para generar sus propios modelos 3D texturizados, estos pasos se dividieron en las siguientes 4 etapas:



- **Etapa 1: Adquisición de fotografías**

Antes de empezar con la adquisición de fotografías se sugiere realizar una caracterización detallada de la muestra de roca para identificar sus principales características y sobretodo definir si es necesario generar el modelo 3D de la muestra completa o simplemente será necesario hacerlo de una parte de la muestra.

Con la ayuda de una caja de luz fotográfica, luces LED, una base giratoria y una plantilla fotogramétrica que cuenta con marcas cada 10° se van a adquirir de manera sistemática

las fotografías, es decir, se tomará una fotografía en cada marca de la plantilla fotogramétrica para obtener la sobreposición debida para su reconstrucción fotogramétrica (ver FIGURA 7). Para lograr un mayor detalle en el modelo el ángulo de la cámara va a ser cambiado durante la adquisición de las fotografías.

Como en este caso se va a requerir generar el modelo 3D de la muestra de roca completa se tomaron 80 fotografías, dividido en dos bloques o “*Chunks*” de 40 fotografías con dos perspectivas diferentes que pueden ser unidas posteriormente utilizando un software fotogramétrico.

Para terminar este primer bloque de pasos para crear un modelo 3D las fotografías adquiridas tienen que ser transferidas al equipo de cómputo con el que van a ser procesadas.

El proceso para esta primera etapa se muestra en el videotutorial de nombre: “Modelos 3D de Roca SfM Parte 1 | Adquisición de fotografías” subido a la plataforma de Youtube con el siguiente link: <https://www.youtube.com/watch?v=5ZjFgF6RNHM>

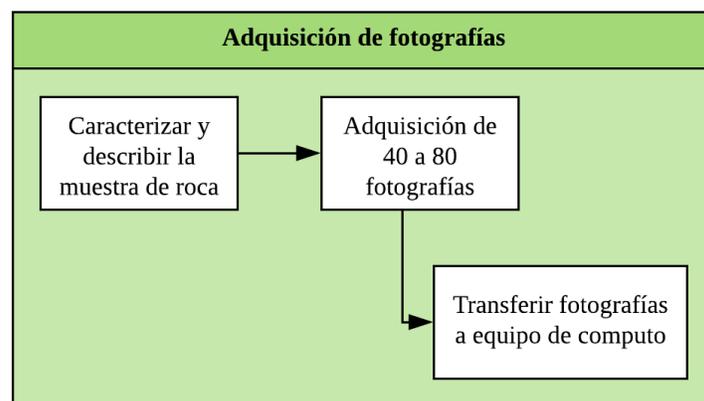


FIGURA 8. Pasos durante la adquisición de fotografías.

- **Etapa 2: Generación de dos perspectivas**

El primer bloque para el procesamiento de las fotografías consiste en generar dos perspectivas de manera separada utilizando el software fotogramétrico Agisoft Metashape Professional versión 1.5.1. Este software cuenta con un Flujo de trabajo ya establecido para realizar reconstrucciones fotogramétricas exitosas.

Inicialmente se tienen que agregar las fotografías. Se sugiere calibrarlas para tener datos más confiables, el software permite calibrar las fotografías de manera automática para eliminar y/o reducir la distorsión radial y tangencial provocada por la cámara.

Con el fin de excluir elementos no necesarios como el fondo se recurre a la importación de máscaras de todas las fotografías del espacio para que el programa únicamente reconstruya la muestra de roca. Luego, estas fotografías ya con el fondo excluido tienen que ser separadas en dos bloques o “Chunks” que van a ser definidos por las diferentes perspectivas de la muestra de roca.

El segundo paso dentro del Flujo de trabajo es la alineación de fotografías la cual identifica puntos en común en diferentes fotografías para establecer sus relaciones espaciales y ubicaciones en un sistema de coordenadas arbitrario (en caso de no contar con coordenadas específicas), ordenando los puntos en forma de una nube de puntos dispersa. Posteriormente, el software basándose en la nube de puntos dispersa generada durante la alineación calcula la profundidad y la intensifica creando una nube de puntos densa. Por último, para tener una mayor precisión en nuestro modelo se realizó una limpieza de la nube de puntos densa eliminando todos esos puntos que no son parte de la muestra de roca.

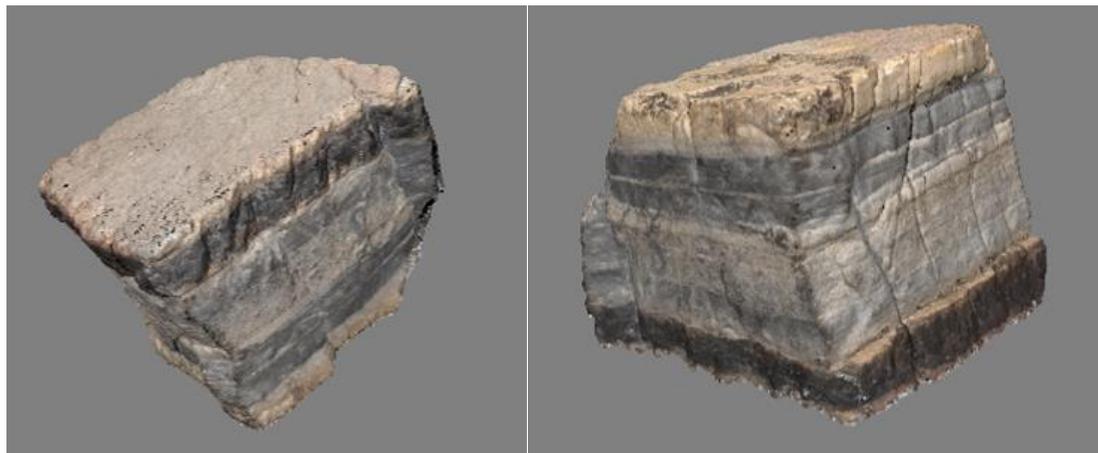


FIGURA 9. Resultado del primer bloque de pasos para el procesamiento de imágenes en Agisoft Metashape Professional.

El proceso para esta etapa se muestra en el videotutorial de nombre: “Modelos 3D de Roca SfM Parte 2 | Generación de nubes de puntos de perspectivas diferentes” subido a la plataforma de Youtube con el link: <https://www.youtube.com/watch?v=V1D-Gy3DUkw>

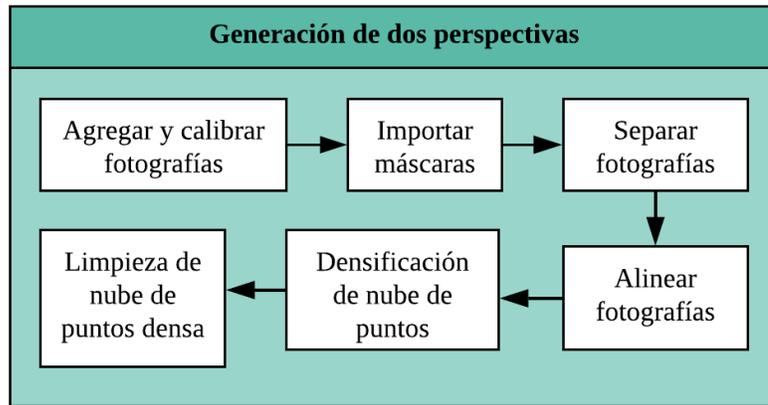


FIGURA 10. Pasos para la generación de dos perspectivas.

- **Etapa 3: Generación de un solo modelo**

El segundo bloque de pasos para el procesamiento de las fotografías tiene como objetivo generar un solo modelo 3D mediante la unión de los dos modelos generados en la etapa anterior.

Agisoft Metashape Professional permite la unión de dos o más “*Chunks*” o bloques utilizando los siguientes métodos:

- ❖ Puntos de control o marcadores
- ❖ Nube de puntos
- ❖ Posición de las cámaras

En este caso se colocaron 3 puntos de control o marcadores sin embargo es posible agregar más para tener una mayor precisión. Estos puntos de control tienen que ser encontrados fácilmente en los dos “*Chunks*” y a su vez, pueden ser colocados en características muy particulares de la muestra de roca. Después de colocar los marcadores pertinentes se van a alinear y combinar los dos modelos 3D para generar un modelo completo de la muestra de roca (FIGURA 11). Metashape basándose en la nube de puntos densa del modelo completo de la roca hace una triangulación para la construcción de una malla o un modelo poligonal. Para terminar, se va a generar un modelo texturizado de la muestra de roca basándose en las fotografías.

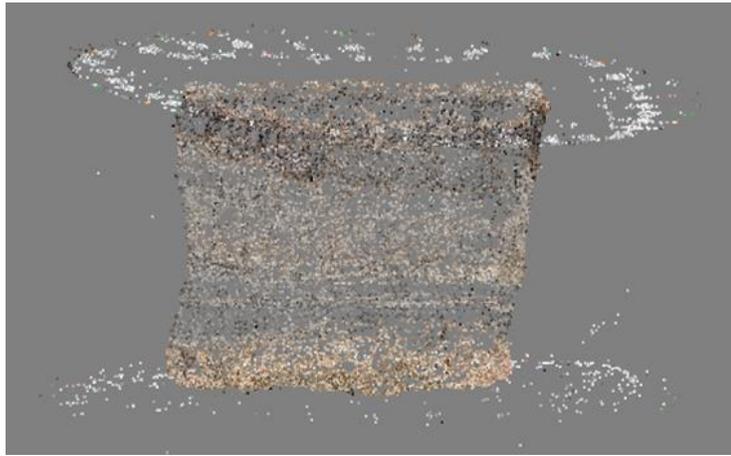


FIGURA 11. Alineación y combinación de dos modelos 3D.

En el modelo resultante se observa la plantilla (puntos en color blanco) en las dos bases de la muestra, misma que se puede eliminar.

El proceso para esta etapa se muestra en el videotutorial de nombre: “Modelos 3D de Roca SfM Parte 3 | Alineación de dos chunks para generar un modelo de nube de puntos” subido a la plataforma de Youtube con el link: <https://www.youtube.com/watch?v=g2D0kq1y704>

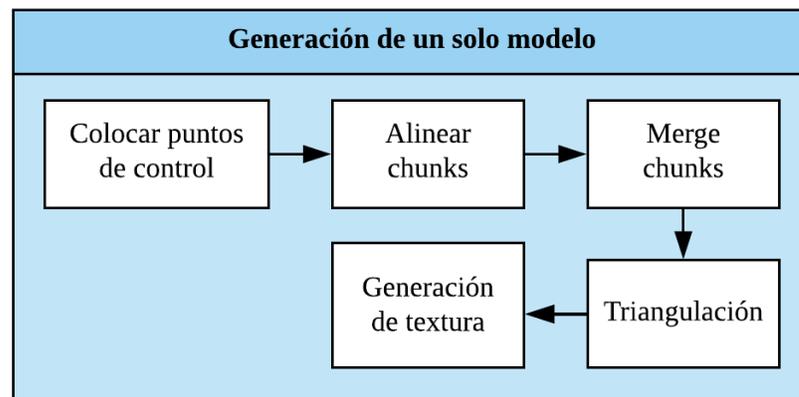


FIGURA 12. Pasos para la generación de un solo modelo.

- **Etapa 4: Escalado y exportación de productos**

Finalmente, para obtener un modelo 3D de una muestra de roca útil es necesario escalarlo y exportar los principales productos como lo son la nube de puntos densa y el modelo texturizado. Cada plantilla fotogramétrica cuenta con medidas conocidas para realizar este bloque de pasos. Se colocan dos puntos de control dentro de la plantilla fotogramétrica (FIGURA 13) para crear una barra de escala con las medidas conocidas y así corregir el modelo 3D de la muestra de roca.

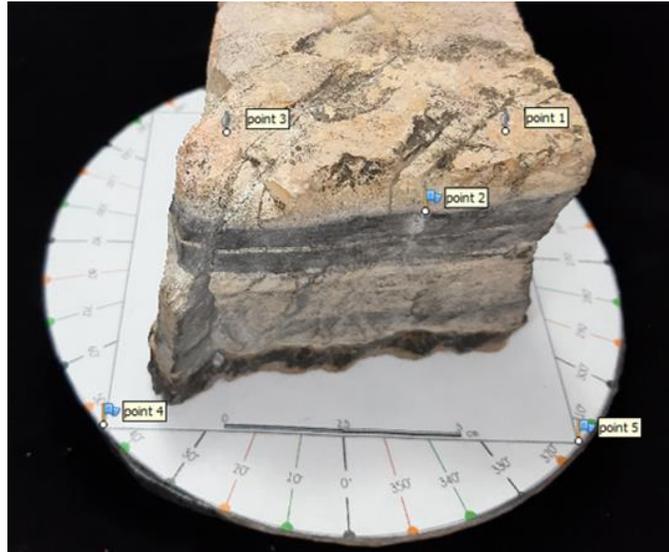


FIGURA 13. Colocación de puntos de control para escalar modelo 3D.

El proceso para esta etapa se muestra en el videotutorial de nombre: “Modelos 3D de Roca SfM Parte 3 | Escalado de la muestra de roca” subido a la plataforma de Youtube con el link: <https://www.youtube.com/watch?v=rZcvruWAlZQ>

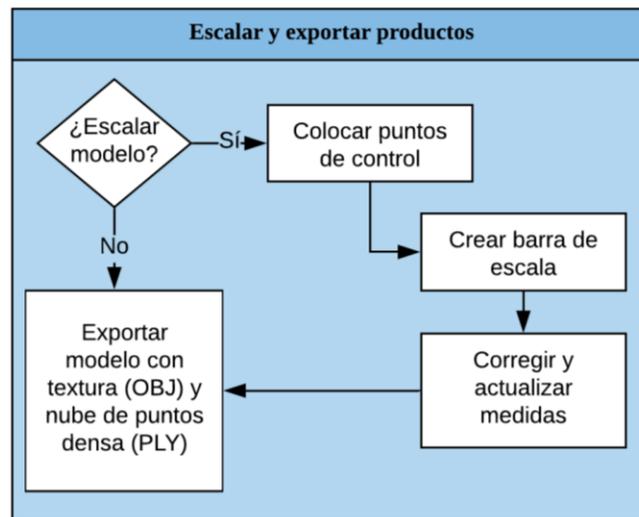


FIGURA 14. Pasos para escalar y exportar productos.

#### 4.1 RESULTADOS Y POSIBLE APLICACIÓN

Al finalizar las 4 etapas se obtuvieron dos principales productos que pueden ser utilizados y analizados con otro tipo de software como:

- ❖ Visor 3D (corporación Microsoft) – Permite la visualización de modelos 3D en el formato OBJ.

- ❖ MeshLab (software libre) – Permite el procesamiento y edición de mallas triangulares no estructuradas en 3D. También permite la medición de los modelos 3D. Admite nube de puntos densa y modelos texturizados.
- ❖ CloudCompare (software libre) – Permite comparar y realizar estudios sobre nubes de puntos en varios formatos.

En la FIGURA 15 se pueden observar los modelos texturizados obtenidos:

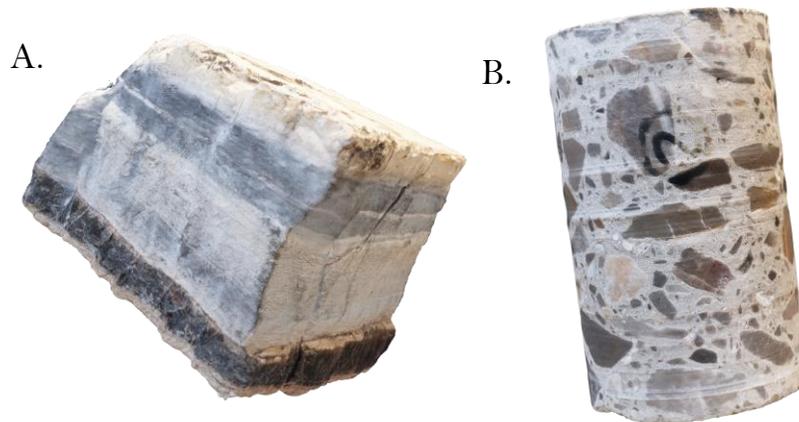


FIGURA 15. A. Modelo 3D de muestra recolectada a 6 km de la Peña de Bernal. B. Modelo 3D de un núcleo.

Estos modelos 3D texturizados fueron subidos a Sketchfab para su visualización. Sketchfab es un sitio web utilizado para visualizar y compartir contenido 3D en línea. Los links de las muestras de rocas son los siguientes:

- Núcleo <https://sketchfab.com/3d-models/nucleo-con-geometria-ideal-para-sfm-fc82f3e24321451d94b65e1e8fae6eb3>
- Muestra de Peña de Bernal <https://sketchfab.com/3d-models/roca-con-geometria-ideal-para-sfm-e0436b009cbd439db659a1def4f959ba>

Adicionalmente se realizaron los modelos 3D de dos muestras de roca volcánica de la Primera Visita Geológica de la estación La Cima, los links son los siguientes:

- Muestra <https://sketchfab.com/3d-models/modelo-2-cima-ii-05e1bb5d80ff47299fae72400cd997ea>
- Bomba <https://sketchfab.com/3d-models/bomba-cima-ii-470e924af9e44f54a1f0dafb14a7ca91>

También fue posible exportar la nube de puntos densa para realizar mediciones en Meshlab (FIGURA 16) y así comprobar que el modelo se encontrara debidamente escalado.

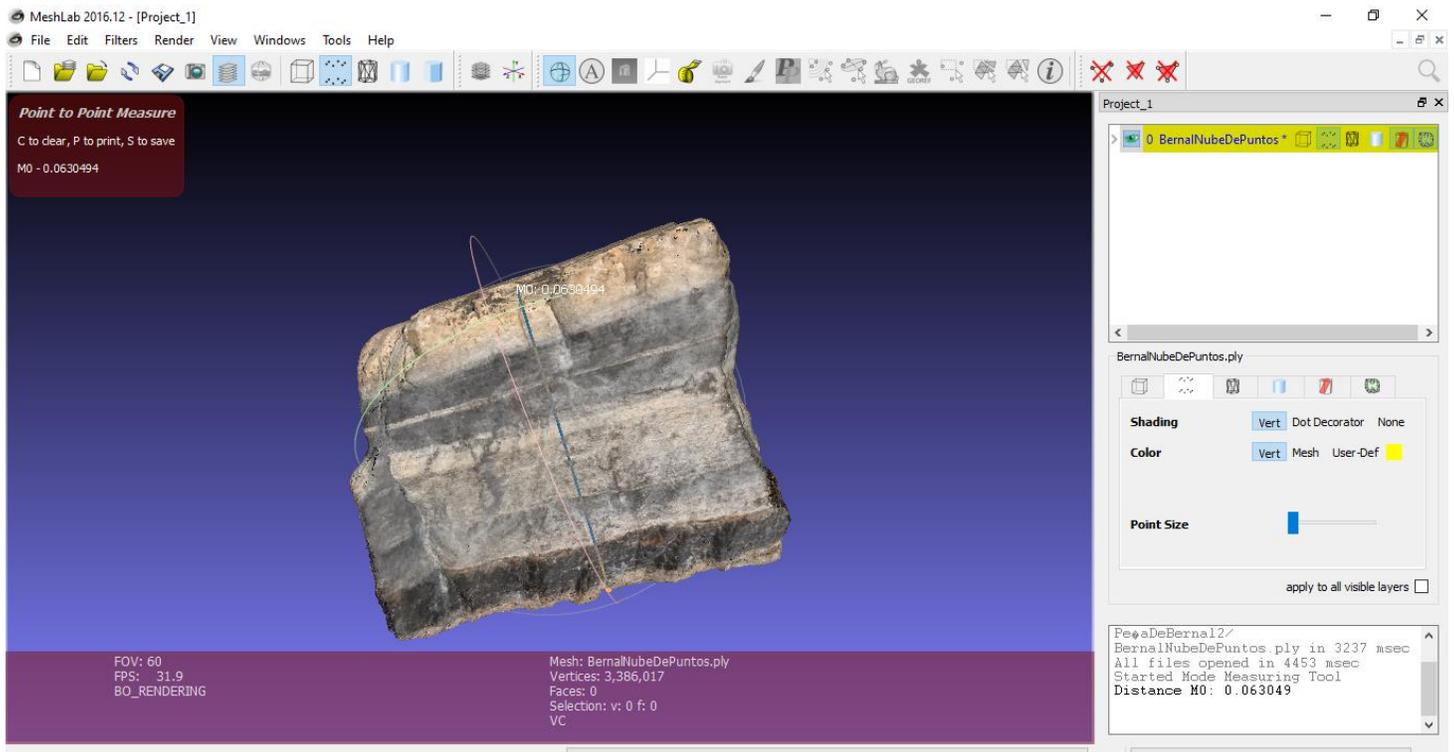


FIGURA 16. Medición en nube de puntos densa de muestra de roca de Peña de Bernal.

De manera más específica estos dos productos pueden ser utilizados de la siguiente forma:

❖ Nube de puntos densa:

- Definir, clasificar y delimitar diferentes clases de nubes puntos de acuerdo con su color para identificar cierta litología.
- Con base en el punto anterior, entrenar un programa para que de manera automática realice la clasificación de futuras litologías.
- Identificación de rugosidad.
- Definir dirección de planos de discontinuidad a escala de muestras de roca.

❖ Modelo 3D texturizado:

- Realizar mediciones indirectas sin necesidad de contar con la muestra de roca física como el tamaño de los estratos y el tamaño de los clastos.
- Visualizar con mayor detalle las características más importantes de las muestras de roca.
- Identificación de texturas.
- Fácil visualización del modelo en diferentes softwares de libre acceso.
- También los modelos 3D pueden ser georreferenciados dentro de un mapa digital con datos geológicos, sísmicos, estratigráficos, entre otros para realizar interpretaciones geológicas más precisas.

- Sumado a esto, contar con un modelo digital 3D de una muestra de roca resulta ser de importancia cuando dicha muestra fue sometida a pruebas físicas destructivas para conocer sus propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, resistencia al esfuerzo cortante, entre otros.
- Debido a la pandemia de COVID-19 un modelo de este tipo puede ayudar al estudiante a visualizar diferentes tipos de rocas sin necesidad de tenerlas de manera física para entrenar el ojo y realizar clasificaciones preliminares.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Un modelo en 3D de una muestra de roca se realiza utilizando fotogrametría digital, se pueden adquirir las fotografías con un dispositivo móvil o una cámara profesional y se utiliza un software que hace de manera automática la reconstrucción fotogramétrica utilizando algoritmos de SfM.

Con base en la investigación realizada se concluyó:

1. Se generó material escrito (Guía de Aprendizaje Autónomo) y audiovisual (Videotutoriales y modelos 3D en Sketchfab) que contienen la información necesaria conjunta y puntual para que el alumnado pueda elaborar su propio modelo 3D sin la necesidad de contar con equipo especializado.
2. Alumnos que formaron parte del proyecto PAPIME fueron capaces de replicar de manera exitosa el material realizado.
3. Se tiene que tomar en cuenta que, para hacer uso de cierto tipo de softwares fotogramétricos, en este caso Agisoft Metashape Professional, se requiere un equipo de cómputo con características mínimas para que este pueda funcionar de manera óptima como lo es el sistema operativo (Windows XP o posterior), la memoria RAM (4 GB o mayor) y el procesador (Intel Core 2 Duo o equivalente).
4. Una de las ventajas de Agisoft Metashape Professional es que permite procesar las imágenes en diferentes “Calidades” las cuales pueden estar en función de lo que se quiere obtener.

Algunas de las recomendaciones son:

1. Utilizar el software Agisoft Metashape Professional para realizar reconstrucciones fotogramétricas.
2. Crear una colección digital de modelos 3D de muestras de roca representativas de unidades estratigráficas vistas en las prácticas de campo de las asignaturas.
3. Crear un mapa digital de los principales estados de la República Mexicana que los alumnos visitan durante sus prácticas campo y georreferenciar la colección de muestras de roca.

4. Conjuntar el modelo 3D de muestras de roca con mapas geológicos, modelos digitales de elevación, secciones geológicas, información sísmica, columnas estratigráficas hasta secciones delgadas para una mejor interpretación.
5. Con base en los puntos anteriores, se recomienda a los profesores de materias con prácticas de campo mostrarle al estudiante en una sola plataforma una visualización desde lo más general (geología regional) hasta lo más particular (muestras de roca) de una zona geológicamente importante. Estos materiales ayudarán al alumno a realizar una interpretación más completa y contar con una relación espacial de todos los recursos.

Es importante recalcar que un modelo 3D de una muestra de roca no pretende sustituir el trabajo de campo, sino puede complementarlo. Principalmente cuando la reciente pandemia del COVID-19 y el distanciamiento social ha provocado la digitalización de los recursos para la educación.

## 6. REFERENCIAS CITADAS

- Agisoft LLC. (2020). Agisoft Metashape. St. Petersburg. Retrieved from <https://www.agisoft.com/>
- Andrews, G. D., Labishak, G., Brown, S., Isom, S., Pettus, H., & Byers, T. (2020). Teaching with Digital 3D Models of Minerals and Rocks. *The Geological Society of America. Groundwork. Volume 30 Issue 9. Pp. 42-43.* <https://doi.org/10.1130/GSATG464GW.1>
- ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (2014)
- 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>
- Benevenuti, F., & De Lemos Peroni, R. (2021). *Detección de problemas de drenaje en minas a cielo abierto y caminos de acarreo utilizando fotogrametría UAV.* Revista DYNA, 88 (216), pp 190-195 Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín Facultad de Minas. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.90801>.
- Caire Lomeli, J. (1977). *Fotogrametría-I, Fotogrametría terrestres.* México, D.F: Editorial Rodriguez.
- Cheli, A. (2012). *Introducción a la Fotogrametría y su evolución.* Argentina: Ediciones Hespérides.
- DroneDeploy, I. (2021). DroneDeploy. San Francisco. Retrieved from <https://www.dronedeploy.com/>
- ETH Zurich, & UNC Chapel Hill. (2018). Colmap. Retrieved from <https://colmap.github.io/>
- 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" - synthesis.* UK: Progress in Physical Geography 43(2). <https://doi.org/10.1177/0309133319832863>.
- González, A., Amarillo, G., Amarillo, M., & Sarmiento, F. (2017). *Drones Applied to Precision Agriculture.* Bogotá, Colombia: Publicaciones e Investigación ISSN: 1900-6608 Volumen 10-2017. <https://doi.org/10.22490/25394088.1585>
- Harvey, A., Fotopoulos, G., Hall, B., & Amolins, K. (2017). Augmenting comprehension of geological relationships by integrating 3D laser scanned hand samples within a GIS environment. *Computers & Geosciences. Volume 103,* 152-153. <https://dx.doi.org/10.1002/2016GL069334>

- Hasiuk, F. (2014). Making things geological: 3-D printing in the geosciences. *GSA Today*, v.24, no.8, 28-29. <https://doi.org/10.1130/GSATG211GW.1>
- Ishutov, S. (2017). 3D printing porous proxies as a new tool for laboratory and numerical analyses of sedimentary rocks. *Iowa State University Capstones, Theses and Dissertations*, 224.
- 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>
- Jaud, M., Kervot, M., Delacourt, C., & Bertin, S. (2019). *Potential of Smartphone SfM Photogrammetry to Measure Coastal Morphodynamics*. Journal MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs11192242>
- Lerma García, J. (2002). *Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Linder, W. (2006). *Digital Photogrammetry. A practical Course*. Germany: Springer. ISBN -10 3-540-29152-0.
- OpenDroneMap contributors. (2018). OpenDroneMap. Retrieved from <https://www.opendronemap.org/>
- Pearse, G., Dash, J., Persson, H., & Watt, M. (2018). *Comparison of high-density LiDAR and satellite photogrammetry for forest inventory*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 142. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.06.006>
- Pix4D SA. (2021). Pix4D. Retrieved from <https://www.pix4d.com/>
- 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. <https://doi.org/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 .

- Riquelme, A., Cano González, M., Tomás Jover, R., Jordá Bordehore, L., & Santamarta Cerezal, J. (2016). *Petrología 3D*. Alicante, España: Confenecia: XIV Jornadas de Redes de Investigación en Docencia Universitaria.
- 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, 10 Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica, At A Coruña, Spain, Volume: 1*, 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>
- Rosas, H., Vargas, W., Cerón, A., & Dominguez, D. (2007). Psychophysical approach to the measurement of depth perception in stereo vision. *Conference Paper*. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73335-5\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73335-5_39)
- Tannant, D. (2015). Review of Photogrammetry-Based Techniques for Characterization and Hazard Assessment of Rock Faces . *International Journal of Geohazards and Enviroment. Vol.1. No.2*, 76-87. <https://doi.org/10.15273/ijge.2015.02.009>
- Verma, A. K., & Bourke, M. C. (2019). A method based on structure-from-motion photogrammetry to generate sub-millimetre-resolution digital elevation model for investigating rock breckdown features. *Earth Surface Dynamics; Gottingen Tomo 7, N°1*, 45-66. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-45-2019>
- 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>