

Metodología integral para la digitalización de muestras de roca mediante fotogrametría con algoritmo Structure from Motion (SfM), orientada para su visualización en entornos de realidad aumentada y virtual

Comprehensive methodology for the digitalization of rock samples using photogrammetry with the Structure from Motion (SfM) algorithm, oriented for visualization in augmented and virtual reality environments

Brayan Javier Orozco Rodriguez¹, Wilder Ocampo Ochoa², Dino Carmelo Manco-Jaraba³

¹Ingeniero geólogo, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Email: brayan.orozco.j@gmail.com,

 <https://orcid.org/0009-0007-5813-7236>

²M. Sc. En Geotecnia, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Email: Wilder.ocampo@uptc.edu.co,

 <https://orcid.org/0009-0001-9085-6712>

³M. Sc. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Universidad de La Guajira. Email: dinomancojaraba@gmail.com,

 <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>.

Email: dinomancojaraba@gmail.com o dcmancoj@uniguajira.edu.co

Cite this article as: B. J. Orozco-Rodriguez, W. Ocampo-Ochoa, D. C. Manco-Jaraba, "Metodología integral para la digitalización de muestras mediante fotogrametría con algoritmo Structure from Motion (SfM), orientada para su visualización en entornos de realidad aumentada y virtual", *Prospectiva*, Vol 24, N° 2, 2026.

Recibido: 16/07/2025 / Aceptado: 09/04/2026

RESUMEN

La fotogrametría es una técnica utilizada para obtener información métrica y geométrica sobre objetos y entornos a partir de fotografías. Esta investigación tiene como objetivo proponer metodológica e integralmente la digitalización de muestras mediante fotogrametría con algoritmo Structure from Motion (SfM), orientada para su visualización en entornos de realidad aumentada y virtual. Metodológicamente se realizó revisión del estado del arte en las diferentes bases de datos académicas y científicas con el fin de conocer las tendencias referentes a los diferentes métodos integrales para la digitalización y visualización de muestras en entornos de realidad aumentada y virtual; posteriormente, se seleccionaron muestras y se acondicionó el entorno para la captura fotográfica y para el procesamiento fotogramétrico y modelado 3D se utilizó el software Agisoft Metashape Professional. La metodología integral propuesta para la digitalización de muestras geológicas mediante fotogrametría con algoritmo Structure from Motion (SfM) ha demostrado ser una herramienta eficaz y replicable para la generación de modelos tridimensionales de alta calidad. El uso de software especializado como Agisoft Metashape permitió obtener representaciones digitales precisas en términos geométricos y texturales, a partir de imágenes fotográficas capturadas bajo condiciones controladas.

Palabras clave: Digitalización, fotogrametría, realidad aumentada, realidad virtual, Structure from Motion.

ABSTRACT

Photogrammetry is a technique used to obtain metric and geometric information about objects and environments from photographs. This research aims to propose a methodological and comprehensive approach to sample digitization using photogrammetry with the Structure from Motion (SfM) algorithm, oriented toward visualization in augmented and virtual reality environments. A methodological review of the state of the art in different academic and scientific databases was conducted to identify trends regarding the different comprehensive methods for the digitization and visualization of samples in augmented and virtual reality environments. Subsequently, samples were selected and the environment was conditioned for photographic capture, and Agisoft Metashape Professional software was used for photogrammetric processing and 3D modeling. The comprehensive methodology proposed for the digitization of geological samples using photogrammetry with the Structure from Motion (SfM) algorithm has proven to be an effective and replicable tool for the generation of high-quality three-dimensional models. The use of specialized software such as Agisoft Metashape enabled the creation of geometrically and texturally accurate digital representations from photographic images captured under controlled conditions.

Keywords: Digitalization, photogrammetry, augmented reality, virtual reality, Structure from Motion.

1. INTRODUCCIÓN

La digitalización tridimensional de muestras de roca y entornos ambientales a través de fotogrametría, realidad aumentada (RA) y realidad virtual (RV), ha sido reconocida como una herramienta transformadora en el siglo XXI [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Investigadores como [7], [8], [9], [10] coinciden en que estas tecnologías permiten capturar, representar y manipular objetos del mundo real en entornos digitales interactivos, facilitando su estudio sin comprometer la integridad física de los materiales originales. En el campo de la geología, estas aplicaciones potencian tanto la precisión científica como el aprendizaje experiencial. Según [11], [12], la RA y RV permiten añadir capas de información visual sobre el entorno real, mejorando la comprensión espacial y conceptual de estructuras geológicas complejas. Así, la combinación de fotogrametría digital con el algoritmo Structure from Motion (SfM), software de modelado como Agisoft Metashape y herramientas de RA como Merge EDU, constituye una estrategia pedagógica y didáctica eficiente. Esta propuesta no solo responde a las tendencias actuales de digitalización académica, sino que también promueve el desarrollo de competencias tecnológicas en estudiantes y profesionales del área justificando su pertinencia en el contexto formativo e investigativo.

Históricamente, la representación gráfica de muestras geológicas se limitaba a dibujos técnicos y fotografías planas. Sin embargo, desde mediados del siglo XX con la introducción de la fotogrametría analítica y digital, y especialmente desde los avances en procesamiento de imágenes tridimensionales en la última década, el modelado 3D ha revolucionado la forma de estudiar materiales geológicos [13], [14]. En la actualidad, estas tecnologías permiten crear réplicas físicas a través de impresión 3D o visualizar los modelos en RA y RV, expandiendo su uso a museos, aulas interactivas y entornos de investigación. Esta evolución histórica justifica una propuesta metodológica que integre estas herramientas de manera sistemática, aplicable y reproducible en diferentes contextos educativos y científicos. A pesar del avance de la tecnología 3D, muchas instituciones educativas aún carecen de una metodología clara, estandarizada y replicable para digitalizar sus colecciones y trasladarlas a entornos virtuales. Esto impide el aprovechamiento pleno de las tecnologías emergentes en la enseñanza especialmente en regiones donde el acceso a laboratorios físicos es restringido. El problema no solo radica en la falta de herramientas sino en la ausencia de una guía técnica y pedagógica que integre de forma coherente la captura, modelado, visualización inmersiva y aplicación

académica-científica. Esta investigación tiene como objetivo proponer metodológica e integralmente la digitalización de muestras mediante fotogrametría con algoritmo Structure from Motion (SfM), orientada para su visualización en entornos de realidad aumentada y virtual.

2. METODOLOGÍA

Inicialmente se realizó revisión del estado del arte en las diferentes bases de datos académicas y científicas tales como: Scopus, sciencedirect, Springer, WOS, Google académico, researchgate, repositorios institucionales: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Industrial de Santander, Fundación Universitaria del Área Andina y Universidad Francisco de Paula Santander a través de palabras claves (modelación 3d, fotogrametría, structure from motion (sfm), realidad aumentada, impresión 3d, agisoft metashape, educación en geociencias, muestras geológicas, visualización interactiva y réplicas físicas), con el fin de conocer las tendencias referentes a los diferentes métodos integrales para la digitalización y visualización de muestras en entornos de realidad aumentada y virtual. Posteriormente, se seleccionaron muestras y se acondicionó el entorno para la captura fotográfica. Se empleó fotogrametría de corto alcance utilizando cámaras digitales de alta resolución, ubicadas en posiciones fijas respecto a una base giratoria con marcadores angulares cada 30°. La muestra se fotografía desde múltiples alturas y ángulos para asegurar una cobertura total, garantizando la superposición entre imágenes requerida por el algoritmo SfM.

Para el procesamiento fotogramétrico y modelado 3D se utilizó el software Agisoft Metashape Professional. Una vez obtenidos los modelos se exportan en formatos estándar (.OBJ, .MTL y .JPG), se integran a plataformas educativas y de visualización inmersiva. Para la realidad virtual se emplean herramientas como Merge EDU y MetaClass.

STRUCTURE FROM MOTION

Es una técnica o conocido también como un algoritmo, que permite construir una escena tridimensional a partir de una serie de imágenes o fotografías bidimensionales, es uno de los métodos fotogramétricos más utilizados en la fotogrametría digital, 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” al movimiento de la cámara. Este método se basa en los principios básicos de fotogrametría tradicional como paralaje y estereoscopia, ésta última busca un efecto de relieve, apreciación de distancias y forma que a partir de dos fotografías sea posible reconstruir un modelo donde se puedan realizar mediciones en altimetría y planimetría (Figura 1) [15].

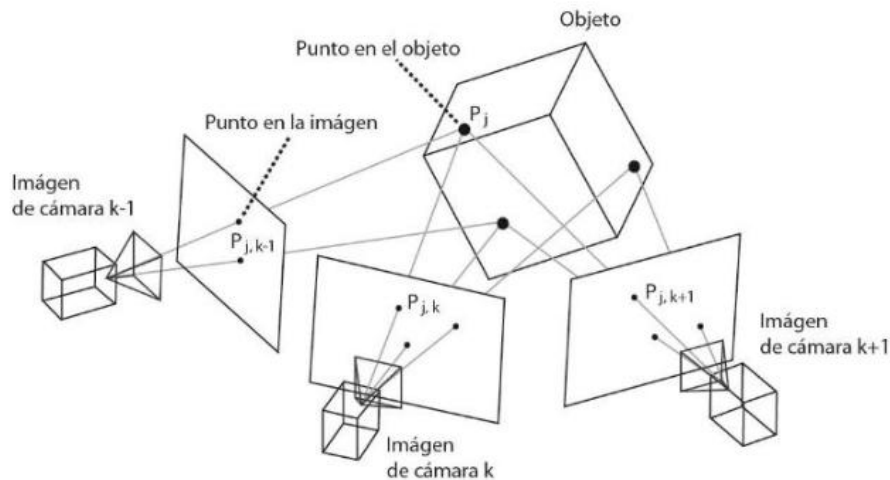


Figura 1. Structure from motion.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

FOTOGRAMETRIA Y MODELACIÓN 3D APLICANDO EL ALGORITMO STRUCTURE FROM

Inicialmente se utilizaron plantillas que contienen marcadores de grados de 10° en 10° hasta cubrir 360° con el fin de tener una posición más exacta de los ángulos para la toma fotográfica de las muestras (Figura 1A y 1B). La plantilla se sitúa debajo de una base giratoria facilitando el movimiento de la muestra, permitiendo mover la base en lugar de la muestra, evitando pérdida de perspectiva generada por la muestra en los ángulos que se posiciona (Figura 2A y 2B). A continuación, se describe la toma de fotografía:

- 1) La cámara debe ser acomodada a la misma altura que la base giratoria y girar la base hasta que la marca circular negra de 0° se encuentre enfrente de la cámara para tomar la primera fotografía. Las fotografías deben abarcar siempre la totalidad de la muestra de roca (Figura 2C).
- 2) La base giratoria se gira hasta que la marca negra de 30° quede adelante de la cámara. Para agilizar el proceso y darle mayor precisión se colocan flechas en la base que indiquen la posición exacta del giro, y estando en esa posición se toma la segunda fotografía, se debe ir girando la base y tomar una fotografía cada 30° utilizando como referencia cada marca circular en color negro hasta completar una rotación completa (es decir, a 60° , 90° , 120° , 150° , 180° , 210° , 240° , 270° , 300° y 330°).
- 3) La cámara se coloca aproximadamente 5 a 10 centímetros más arriba de la base giratoria para obtener otra perspectiva manteniendo la distancia inicial entre la muestra de roca y la cámara. La siguiente fotografía se toma cuando la cámara se encuentra frente a la marca circular verde de 10° . Se rota la base hasta la marca de 40° y se toma la segunda fotografía, repitiendo este procedimiento en las marcas verdes de 70° , 100° , 130° , 160° , 190° , 220° , 250° , 280° , 310° y 340° (Figura 2D).
- 4) La cámara se posiciona entre 15 o 20 centímetros más arriba que la base giratoria, para así alcanzar otra perspectiva. La siguiente fotografía se toma cuando la flecha de la base indique la marca circular roja 20° y la cámara se encuentre frente a esta. Se gira la base hasta que la marca de 50° esté frente a la cámara y se toma la fotografía, de manera sucesiva se capturan las siguientes fotografías en las marcas de 80° , 110° , 140° , 170° , 200° , 230° , 260° , 290° , 320° y 350° (Figura 2D).
- 5) Se recomienda tomar 4 fotografías adicionales en las marcas de 0° , 90° , 180° y 270° para tener mayor precisión. En estas fotografías la cámara debe enfocar la parte superior y estar casi perpendicular a la muestra.

Es fundamental evitar girar la cámara durante la adquisición de las fotografías debido a que el software Agisoft Metashape encargado del procesamiento de las imágenes no podrá reconocerlas ni calibrarlas de manera eficaz y precisa [15].

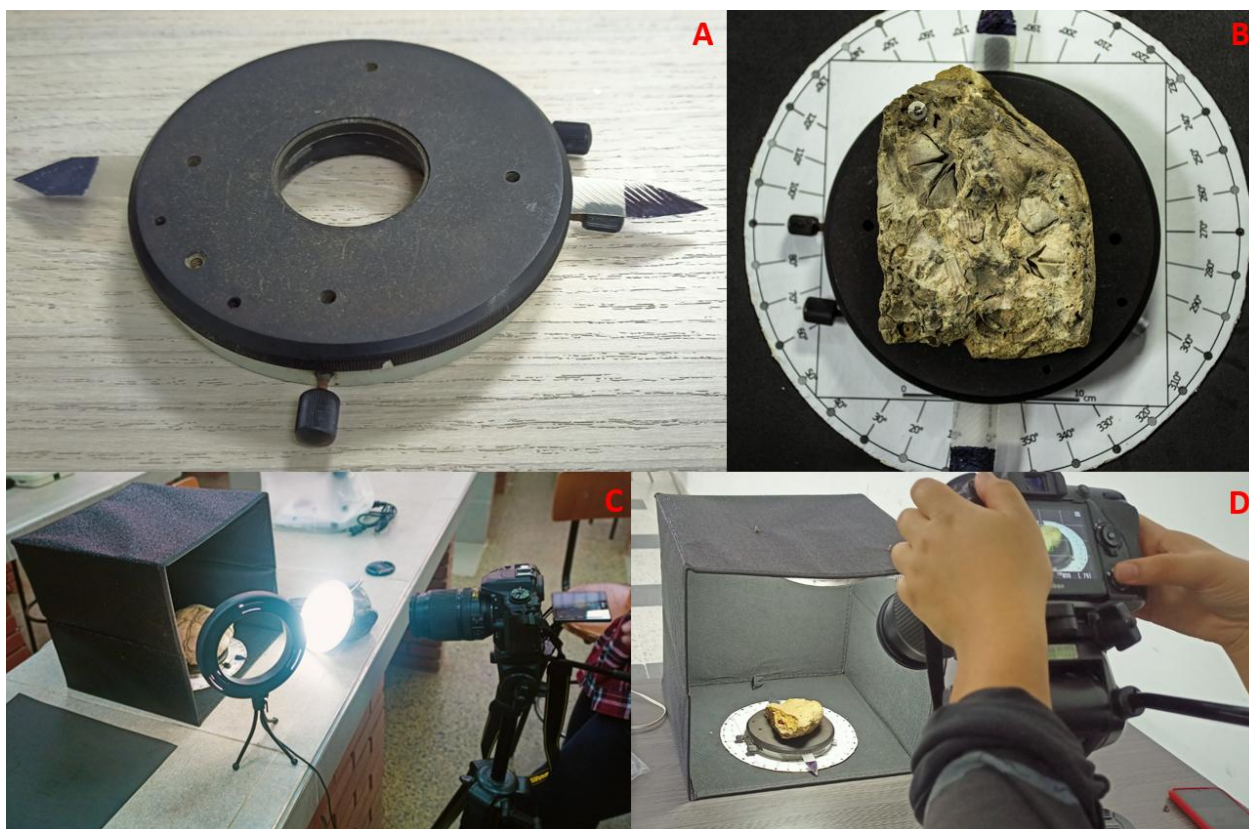


Figura 2. A. Base giratoria. B. Plantillas. C. Toma de muestra a la altura de base giratoria. D. Toma de muestra por encima de la altura de base giratoria.

Calibración de cámara

El proceso de calibración de la cámara en el software Agisoft Metashape comienza con la captura de múltiples fotografías de un patrón de cuadros blancos y negros, similar a un tablero de ajedrez, el cual se muestra en la pantalla del computador. La cámara se posiciona frente a esta imagen y se toman fotos desde distintos ángulos y distancias. Luego, estas imágenes se importan al software y se accede a la opción “Lens” en la barra de herramientas, donde se configuran las variables ópticas que se desean evaluar, como la distorsión radial o tangencial. Una vez iniciado el análisis, Metashape calcula automáticamente los parámetros de calibración. Al finalizar, se accede a la herramienta “Camera Calibration” desde el menú Tools para revisar los resultados y guardar un archivo .txt con la calibración obtenida. Este archivo puede ser utilizado posteriormente en otros proyectos, permitiendo aplicar la misma calibración a distintos conjuntos de imágenes y asegurando así la coherencia en los modelos generados.

Importación de máscaras

Las “máscaras” son elementos que permiten excluir objetos innecesarios en las fotografías durante el proceso de reconstrucción estereoscópica. En este caso, dado que lo relevante es la muestra, es necesario eliminar el fondo negro para evitar la generación de ruido. En el espacio de trabajo seleccionar el Chunk 1, dar clic derecho para visualizar las herramientas disponibles e importar máscaras.

Alineación de fotografías

El software Agisoft Metashape identifica puntos comunes en las fotografías para establecer sus relaciones espaciales y ubicar las imágenes en sistemas de coordenadas arbitrarios, organizando los puntos en una nube de puntos dispersa o no densa.

Las fotografías se alinean utilizando la herramienta “Batch Process” o proceso por lotes, ubicada en la barra de herramientas que se encuentra en la parte superior de la interfaz principal. Dentro del proceso por lotes, se agregará una nueva operación para la alineación del bloque o “Chunk” (Figura 3).

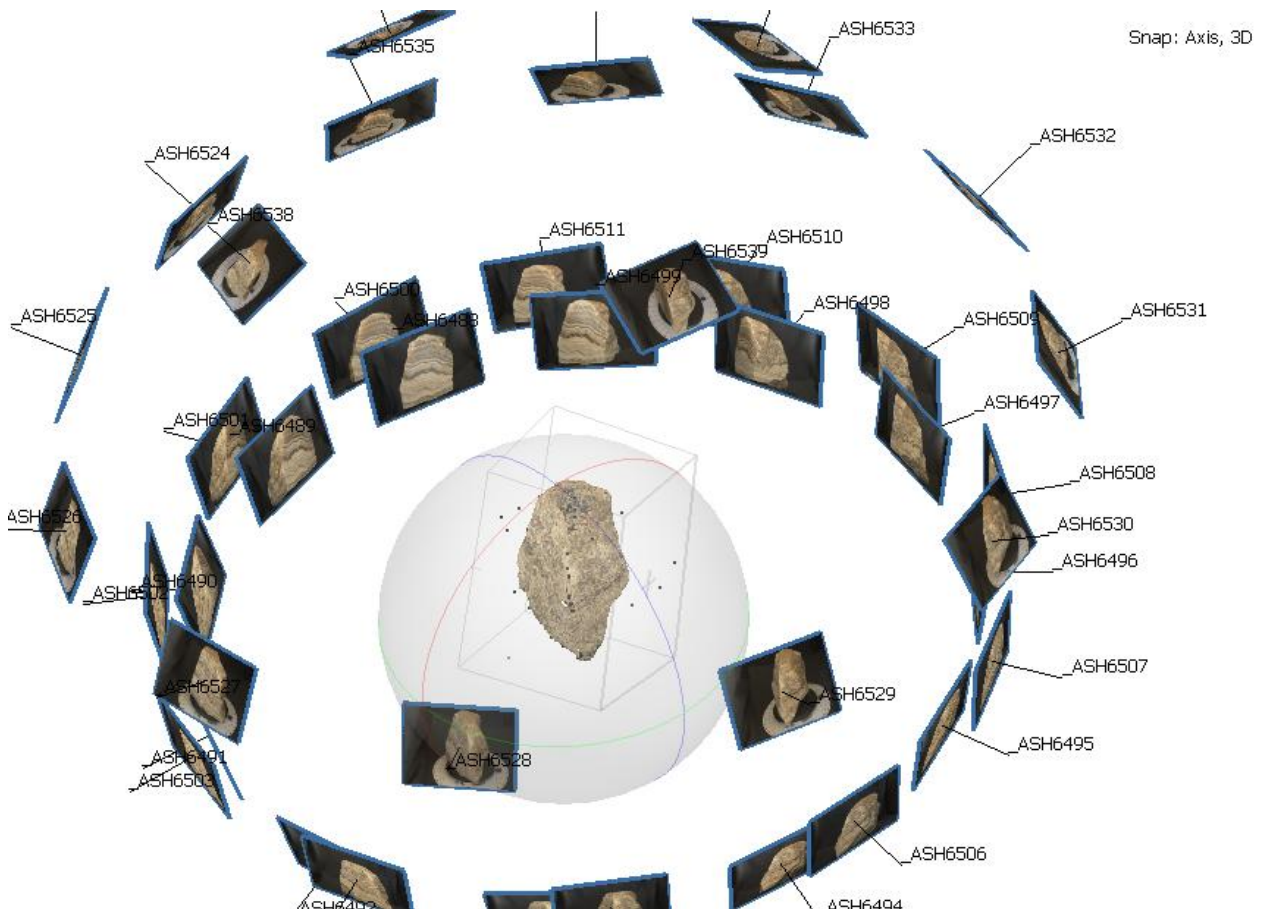


Figura 3. Alineación de fotografía.

Generación de nube de puntos densa

Para la creación de la nube de puntos densa, el software Agisoft Metashape basándose en la nube de puntos dispersa generada durante la alineación, calcula la profundidad y la intensifica. Se emplea la misma herramienta de procesos por lotes (Batch Process) utilizada durante la alineación. Los parámetros que se utilizaron son los siguientes: propiedades generales: calidad media; propiedades avanzadas: filtrado de profundidad agresivo y cálculo de los colores de los puntos (Figura 4).

tive 30°

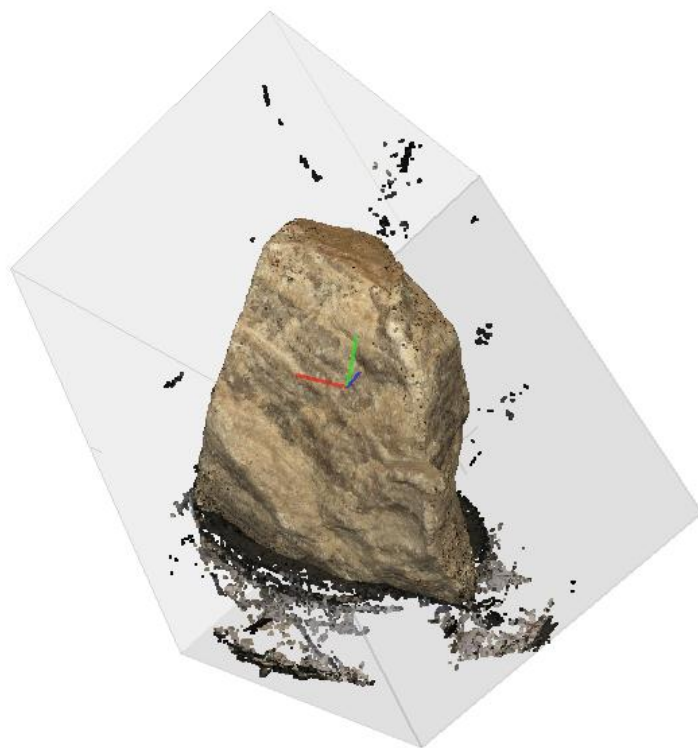


Figura 4. Nube de puntos.

Triangulación

Basándose en la nube de puntos densa del archivo generado el software Agisoft Metashape realiza triangulación para construir una malla o modelo poligonal. La herramienta se encuentra en el menú de flujo de trabajo y se emplearán los siguientes parámetros (Figura 5):

- 1) Propiedades generales
 - Datos fuente: Nube de puntos densa
 - Tipo de superficie: Arbitraria (3D)
 - Número de caras: Alta
- 2) Propiedades avanzadas
 - Interpolación: por defecto
 - Calcular colores de los vértices

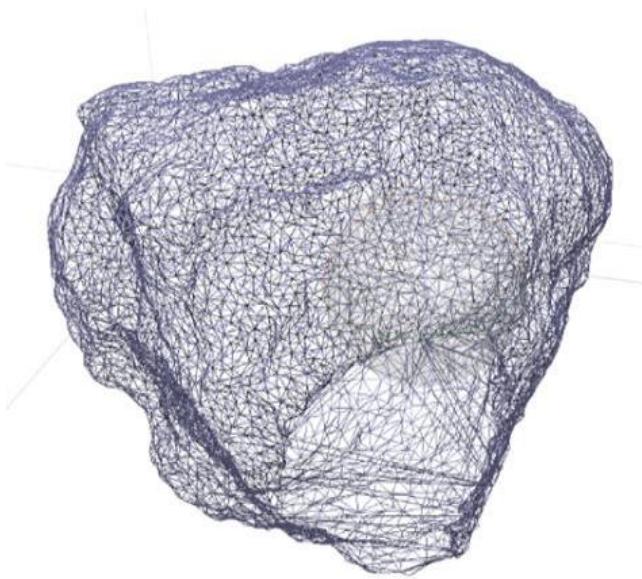


Figura 5. Triangulación de la muestra.

Generación de textura

En la fase final del modelado se procede a generar la textura del modelo utilizando las fotografías tomadas previamente. Este proceso es esencial para aportar al modelo un aspecto realista y detallado. Los parámetros específicos a utilizar son los siguientes (Figura 6):

- 1) Modo de mapeo genérico: este modo se emplea para aplicar de manera eficiente las texturas capturadas sobre la superficie del modelo asegurando una cobertura completa y uniforme.
- 2) Modo de fusión mosaico: permite combinar múltiples imágenes de manera cohesiva, integrando las texturas sin generar artefactos visibles o inconsistencias en las uniones.

Estos parámetros permiten que el modelo final tenga una textura detallada y realista basada en las fotografías originales, lo cual es importante para mejorar la precisión y apariencia en aplicaciones científicas (Figura 6).



Figura 6. Textura del modelado.

Limpieza y adecuación del modelo

La limpieza y adecuación del modelo se realiza para eliminar las partes que no pertenecen a la muestra como base giratoria, generación de nube densa, triangulación y textura el Metashape. Para este proceso se utiliza la herramienta “seleccionar de forma libre” que permite encerrar los puntos o partes que son excesos (suciedad) y las selecciona para poder eliminarlas y de esta manera tener un modelo limpio y listo para ser exportado (Figura 7).



Figura 7. limpieza y adecuación del modelo.

Alistar y exportar modelo

Para exportar el modelo, se utiliza la herramienta “Close Holes” para cerrar los agujeros que posiblemente quedaron abiertos. Esta herramienta triangula los espacios que quedan y les coloca una “tapa” para cerrar totalmente el modelado y exportar. El software guarda tres (3) archivos, uno en extensión .OBJ (es el objeto), JPG (lee el visor 3D de Windows) y .MTL (textura del modelo).

INTEGRACIÓN DEL MODELO 3D AL CAMPO DE LA REALIDAD AUMENTADA

Herramientas y plataformas para la integración de la realidad aumentada (RA)

La integración de los modelos 3D en aplicaciones de realidad aumentada (RA) permiten a los estudiantes y comunidad en general interactuar con objetos virtuales en un entorno reales facilitando la comprensión y aprendizaje en las ciencias de la tierra y ambientales. Para lograr la interacción efectiva de los modelos 3D en RA es crucial seleccionar herramientas y plataformas (MergeEDU, Metaclass) adecuadas que permita visualizar, crear y explorar modelos 3D de manera más optima los modelos generados a partir de fotogrametría.

Modo inventor proyecto sin marcadores

Para el acceso y la carga de modelos 3D es necesario adjuntar los archivos a Google drive en formato ZIP para posteriormente cargarlos en la plataforma. En la interfaz se podrán adjuntar imágenes, textos y videos que al ser visualizados por medio del visor podrán enriquecer el modelo con información adicional. El

usuario tiene la facultad para guardar el proyecto y dirigirse a la opción visor, donde el modelo quedará almacenado para ser visualizado (Figura 8).

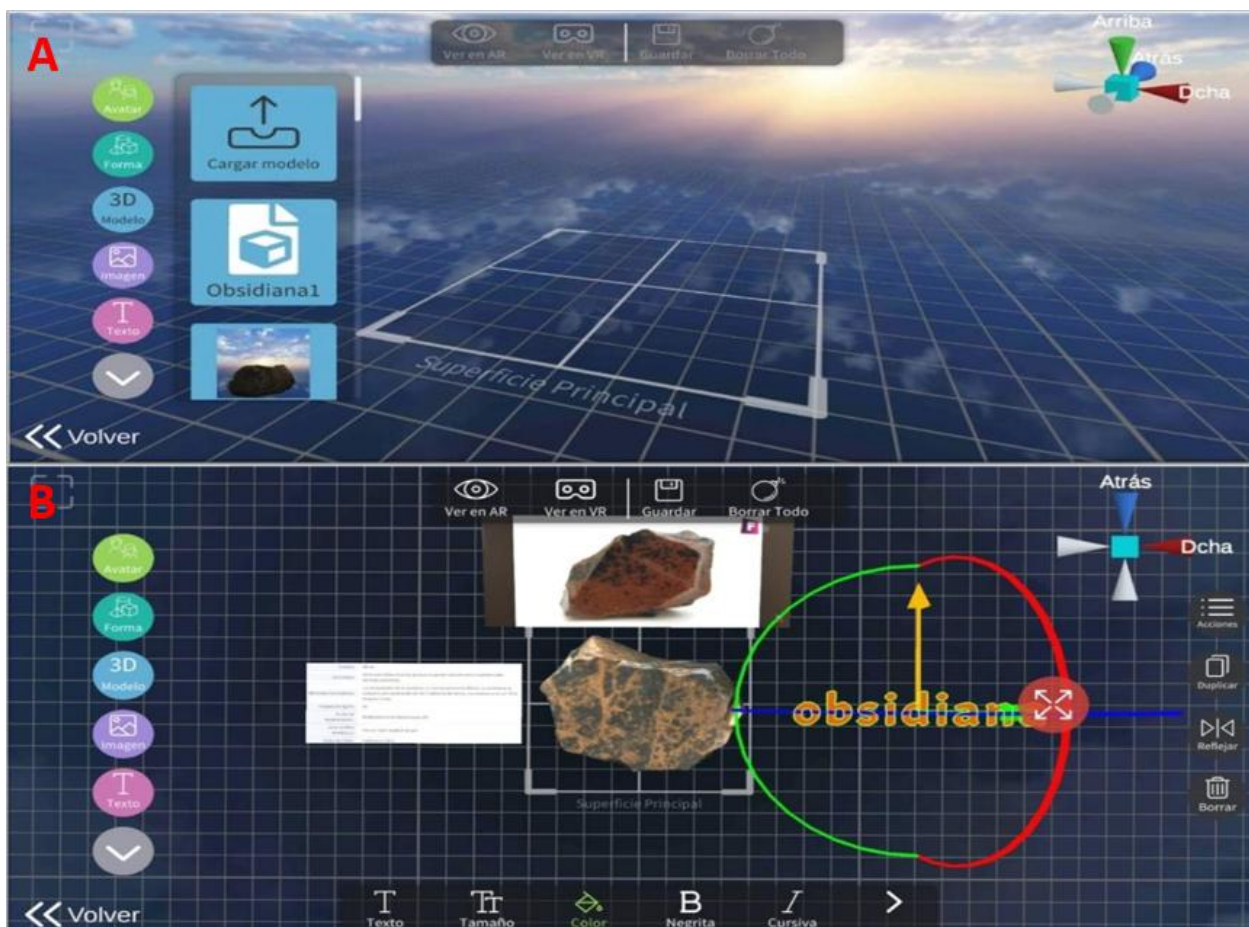


Figura 8. A. Interfaz interactiva modo inventor-proyecto sin Marcados, MetaClass Estudio. B. Proyecto sin marcados, información adicional MetaClass Estudio.

Modo inventor proyecto con marcadores

Este método ayuda a mantener la muestra estática en un solo lugar permitiendo que al girar el marcador el modelo también gire. Es posible utilizar diferentes tipos de marcadores, como códigos QR, fotografías y cualquier otro elemento que se desee utilizar como marcador. Los marcadores se cargan del mismo modo como se cargan los modelos. Luego en el visor el usuario escaneará el marcador y el objeto tridimensional se mostrará en el entorno físico (Figura 9).

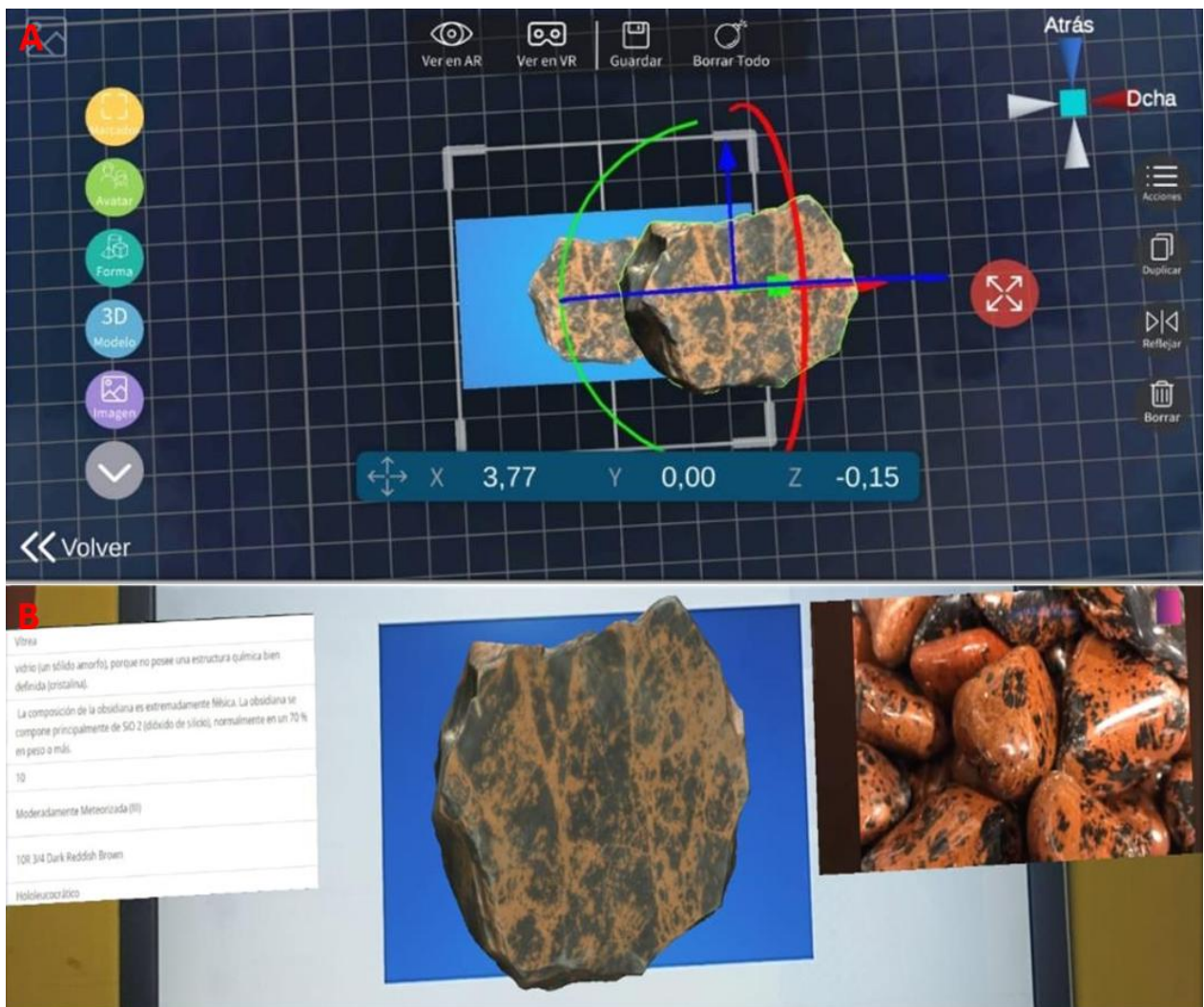


Figura 9. A. Proyecto con Marcados, Inventor MetaClass Estudio. B. Proyecto con Marcados, Realidad Aumentada MetaClass Estudio.

APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA REALIDAD AUMENTADA EN EL ÁREA DE LAS CIENCIAS DE LA TIERRA

Visualización de modelos geológicos en 3d

La realidad aumentada permite superponer modelos geológicos en 3D sobre mapas topográficos, facilitando simulaciones de procesos naturales como terremotos, erupciones volcánicas, cambios climáticos, entre otros, que atribuyen a comprender de manera más detallada el entorno y tomar medidas de mitigación y control oportuna. Además, es fundamental en el desarrollo académico y científico como herramienta digital para colegios, universidades y centros de investigación (Figura 10).



Figura 10. Modelación de procesos naturales.

Realidad virtual

La realidad virtual (VR) es una tecnología que permite a los usuarios sumergirse en un entorno simulado tridimensionalmente que puede llegar a ser similar o completamente diferente al mundo real. Esta inmersión se logra por medio del uso de dispositivos especializados como gafas de VR, sensores y otros dispositivos que pueden rastrear los movimientos del usuario y proporcionar una retroalimentación del entorno creado, la VR funciona con la ayuda de combinación de software (Software UNITY y BLENDER) y hardware (Gafas de realidad virtual), donde el primero ajusta las imágenes y sonidos en tiempo real y el segundo rastrea los movimientos del usuario, las gafas Oculus Quest muestran imágenes estereoscópicas para crear la ilusión y profundidad que permiten al usuario interactuar con el entorno virtual.

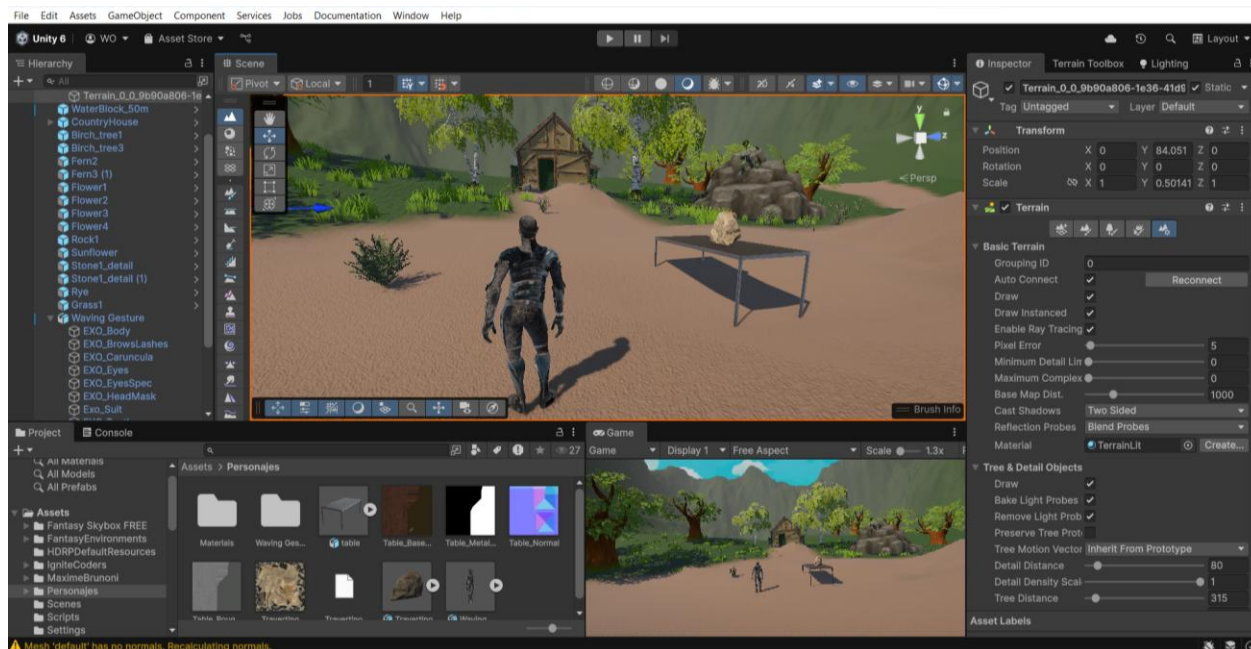


Figura 11. Entorno de realidad virtual en UNITY.

4. CONCLUSIONES

La metodología integral propuesta para la digitalización de muestras geológicas mediante fotogrametría con algoritmo Structure from Motion (SfM) demostró ser una herramienta eficaz y replicable para la generación de modelos tridimensionales de alta fidelidad geométrica y textural, a partir de imágenes capturadas con equipos accesibles y bajo condiciones controladas. El uso de software especializado como Agisoft Metashape permitió procesar de manera eficiente estas imágenes, logrando reconstrucciones digitales que conservan los detalles esenciales de las muestras sin comprometer su integridad física. Esta solución no solo aporta beneficios en términos de conservación y documentación del patrimonio geológico, sino que también ofrece nuevas posibilidades para el análisis estructural, morfológico y educativo de materiales geocientíficos.

La integración de modelos tridimensionales en entornos de realidad aumentada (RA) y realidad virtual (RV), a través de plataformas especializadas como Merge EDU y MetaClass Estudio, permitió configurar experiencias inmersivas de alta calidad que superan las limitaciones de la enseñanza tradicional. Estas herramientas tecnológicas facilitaron la interacción directa con representaciones digitales de muestras geológicas, promoviendo una comprensión espacial más profunda y un aprendizaje multisensorial activo, incluso en contextos educativos con restricciones de infraestructura o recursos materiales. En este marco, la propuesta metodológica presentada no solo constituye una solución técnica eficiente para la digitalización y visualización de materiales geológicos, sino que además se erige como una estrategia pedagógica de vanguardia, con alto potencial de impacto en la formación académica. Su aplicación contribuye a democratizar el acceso al conocimiento especializado, desarrollar competencias digitales y espaciales en estudiantes y docentes, y establecer un modelo sostenible y reproducible para la innovación en la enseñanza, la investigación aplicada y la divulgación científica en el campo de las ciencias de la Tierra.

Se recomienda su implementación en programas de formación académica, museos y centros de investigación, así como su adaptación a otras ciencias y disciplinas que requieran digitalización de objetos para su estudio y visualización inmersiva. Futuros trabajos pueden explorar su aplicación en campo, su integración con sistemas de información geográfica (SIG) y su vinculación con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial para clasificación y análisis automatizado de muestras.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] L. He, M. Eyre, J. Coggan, S. Holley, and D. Watkins, "Investigating hydraulic anisotropy of fractured rock mass using three-dimensional numerical modelling and laser scanning: a case study at South Crofty mine in Cornwall, UK," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 60, p. 102541, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102541>.
- [2] H. Wu, X. Kong, X. Chen, and D. Guan, "3-D fracture network reconstruction and quantitative fractal analysis of subsurface rock fractures via integrated CT scanning and box-counting dimension methodology," *Results Eng.*, vol. 26, p. 105614, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105614>.
- [3] Y. Zhang, H. Zheng, and S. Lin, "Random structure modeling of soil and rock mixture and evaluation of its permeability using three-dimensional numerical manifold method," *Comput. Geotech.*, vol. 180, p. 107089, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107089>.
- [4] Q. Zhang, Y. Pei, H. Zhu, X. Li, F. Guo, and Y. Shen, "Predicting three-dimensional roughness of rock discontinuity based on limited outcrop information during tunnel construction," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 187, p. 106040, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106040>.
- [5] A. Yasin Yiğit and M. Uysal, "Virtual reality visualisation of automatic crack detection for bridge inspection from 3D digital twin generated by UAV photogrammetry," *Measurement*, vol. 242, p. 115931, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115931>.
- [6] S. Le Mouélic *et al.*, "3D imaging of the Bayeux Tapestry using photogrammetry and integration into virtual reality: Results of a feasibility test," *J. Cult. Herit.*, vol. 71, pp. 211–216, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.11.018>.
- [7] P. Wolf, B. Dewitt, and B. Wilkinson, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th Editio. 2014.
- [8] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, *Close Range Photogrammetry and 3D Imaging*, 2 edition. 2018.
- [9] J. Grisel, L. A. Halim, and S. Katja, "Subsurface Geosciences Learning in Virtual Reality: A Case Study in Central Luconia Province, Malaysia," *Earth Sci. Syst. Soc.*, vol. 4, no. 1, p. 10118, Dec. 2024, doi: 10.3389/esss.2024.10118.
- [10] A. Gonzalez-gutierrez, B. Orozco-Rodriguez, W. Ocampo-Ochoa, and D. Manco-Jaraba, "Modelación tridimensional y realidad virtual: una propuesta tecnológica para la educación ambiental y geocientífica," *Prospectiva*, vol. 24, no. 1, pp. 1–10, 2026, doi: <http://doi.org/10.15665/rp.v24i1.3781>.

- [11] R. Kaźmierczak, G. Grunwald, R. Skowroński, L. Kaźmierczak, and C. Kowalczyk, “Augmented reality tools for mathematics and geoscience education,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 17129, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-02090-z.
- [12] S. Heredero, V. J. Gómez, and A. Sanjuan-Sanjuan, “The Role of Virtual Reality, Augmented Reality and Mixed Reality in Modernizing Free Flap Reconstruction Techniques,” *Oral Maxillofac. Surg. Clin. North Am.*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coms.2025.04.004>.
- [13] W. Linder, *Digital Photogrammetry*, 4 edition. 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50463-5>.
- [14] O. Zapata-Ocampo, *Fundamentos de fotogrametría para imágenes de contacto y digitales*, Universida. Medellín, Colombia, 2004.
- [15] M. Montoya-Ramírez, “Generación de modelos 3D de muestras de roca con Structure from Motion,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2021.