

Metodología para identificar discontinuidades en macizos rocosos mediante procesos semiautomáticos con fotogrametría y UAV

Methodology for identification discontinuities in rock masses through semi-automatic processes with photogrammetry and UAV

Marsella Gissel Rodríguez Servín*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

marsella.gissel.rodriguez@umich.mx

 <https://orcid.org/0009-0009-0157-3111>

Recepción: 7 de agosto de 2023

Aprobación: 29 de abril de 2024



Luis Alberto Morales Rosales

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

luis.morales@umich.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-4753-9375>

José Eleazar Arreygue Rocha

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

Eleazar.arreygue@umich.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-5889-7661>

RESUMEN

Es posible obtener información del macizo rocoso a partir de formatos digitales que permiten definir su posición y geometría con tecnologías de adquisición remota como la fotogrametría, las cuales reducen las adversidades del método convencional como la dificultad de acceso al sitio, el tiempo de captura, imprecisión en mediciones o la influencia del criterio del experto al realizar estimaciones. En este contexto, se presenta una metodología que utiliza la técnica de fotogrametría con naves aéreas no tripuladas (UAV) y procesos de toma de decisión semiautomáticos para la identificación de discontinuidades de un macizo rocoso a partir de un caso de estudio de prueba y se valida con la metodología convencional. Además de compararlas con otras, se analizan las ventajas y limitaciones de la propuesta.

PALABRAS CLAVE: discontinuidades, macizo rocoso, fotogrametría, nube de puntos, caracterización geomecánica, UAV.

ABSTRACT

With remote acquisition technologies such as photogrammetry, it is possible to obtain information about the rock mass in digital formats that allow defining its position and geometry, reducing the adversities of the conventional method such as difficulty of access to the site, capture time, inaccuracy in measurements or the influence of expert judgment when making estimates. In this work, a methodology that uses the photogrammetry technique with unmanned aerial craft and semi-automatic decision-making processes for the identification of discontinuities in a rock mass is presented. Based on a test case study of the methodology and validating it with conventional methodology. In addition, it is compared with other methodologies and the advantages and limitations of the proposal are analyzed.

KEYWORDS: discontinuities, rock mass, photogrammetry, cloud points, rock geomechanical characterization, UAV.

INTRODUCCIÓN

El levantamiento en campo convencional para la caracterización de macizos rocosos se refiere a las características físicas y geométricas de las discontinuidades (orientación, buzamiento, persistencia, espaciamiento,

*AUTORA PARA CORRESPONDENCIA

marsella.gissel.rodriguez@umich.mx

rugosidad, abertura, relleno, filtraciones y resistencia de la matriz rocosa mediante pruebas de laboratorio). Sin embargo, dicho estudio está limitado a diversos aspectos, tales como la accesibilidad al sitio de estudio, el uso de herramientas convencionales como brújula de geólogo, cinta métrica, peine de Barton y esclerómetro, la experiencia y criterio del técnico influyen tanto en la toma de datos como en el análisis de resultados. Además, el tiempo requerido y la información obtenida suelen corresponder únicamente a una porción del macizo rocoso. Por estos motivos, los resultados suelen ser ambiguos y subjetivos, lo que conlleva a un análisis incorrecto de estabilidad del medio (Liu *et al.*, 2019). Estudios como el de Liu *et al.* (2019), Pagano *et al.* (2020) y Tomás *et al.* (2020) ofrecen la capacidad de adquirir información 3D georreferenciada de alta resolución del macizo rocoso que evita los problemas del levantamiento geomecánico convencional y se disminuye la subjetividad, ya que al contar con información digital del sitio de estudio se obtienen las características geológicas a partir de algoritmos de aprendizaje profundo (Kong *et al.*, 2021).

En este artículo se emplea la fotogrametría digital mediante naves aéreas no tripuladas (Unman Aerial Vehicle, UAV), comúnmente conocido como *drone*, en español “dron”. La fotogrametría aplica el método Structure from Motion (SfM), desarrollado en el campo de la visión artificial y de los algoritmos de correlación automática de imágenes; su principal diferencia respecto a la fotogrametría convencional es que la geometría de la escena, las posiciones de la cámara, orientación y deformaciones se resuelven mediante cálculos computacionales que permiten obtener un conjunto de coordenadas XYZ, o nube de puntos 3D, del macizo rocoso (Tomás *et al.*, 2020).

La fotogrametría digital requiere de *software* para aplicar la técnica SfM y generar las nubes de puntos 3D. Existen algunos que son comerciales como Pix4D S.A. (2023) o Metashape de Agisoft L.L.C. (2023) o de acceso libre como VisualSfM de Wu (2011). Sin embargo, son limitados en cuanto a la manipulación y edición de nubes de puntos comparados con programas de acceso libre como CloudCompare de Girardeau-Montaut (2016), el cual ofrece eliminación del ruido, clasificar la nube de puntos, hacer mediciones, entre otras funciones. De forma similar, ocurre con la geomecánica donde se ha visto el desarrollo de aplicaciones que funcionan a partir de nubes de puntos 3D con el objetivo de determinar el número de familias, su orientación y buzamiento predominante, por ejemplo Discontinuity Set Extractor (DSE) de Riquelme *et al.* (2014).

En este artículo se presenta una metodología que indica cómo realizar la adquisición de datos en campo con fotogrametría asistida con dron, el procesamiento de imágenes y el uso de procesos semiautomáticos para el tratamiento de nubes de puntos que permitan la caracterización de familias de discontinuidades con las herramientas CloudCompare de Girardeau-Montaut (2016) y DSE de Riquelme *et al.* (2014) enfatizando en las tomas de decisiones, condiciones y parámetros para que la metodología sea replicable a cualquier caso de estudio. Para ejemplificar el uso de la metodología propuesta se presenta un caso experimental de una pared rocosa de un macizo rocoso ubicado en el sureste de la ciudad de Morelia. El sitio es utilizado para la extracción de ignimbrita con fines comerciales.

El trabajo se desarrolla en cinco secciones: en la primera se describe el estado del arte actual en relación con investigaciones recientes, la segunda presenta la metodología propuesta para la identificación de discontinuidades, la tercera describe los resultados y presenta un caso de estudio experimental de un banco de material de ignimbrita, la cuarta establece la discusión de resultados y en la quinta se presentan las conclusiones.

1. ESTADO DEL ARTE

Generalmente las características de las discontinuidades se obtienen en campo a partir de personal calificado mediante herramientas convencionales como brújula y clinómetro. Sin embargo, el proceso puede ser peligroso, lento, propenso a errores y limitado en su cobertura debido a que el especialista enfrenta adversidades, tales como la pendiente del talud, características del sitio de estudio y obstrucción de vegetación (Chen *et al.*, 2016).

A partir del avance científico y tecnológico, instituciones internacionales como la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, en inglés ISRM (International Society of Rock Mechanics) (Feng y Röshoff, 2014), recomiendan el empleo de técnicas de adquisición remota como la fotogrametría, ya que captura información de forma rápida y precisa de las discontinuidades del macizo rocoso. El desarrollo de la fotogrametría ha logrado implementarse en diversas áreas de investigación que van desde la arqueología para la documentación de patrimonio arqueológico (Rafee y Yari, 2023), en la agricultura para el mapeo de composición y distribución de especies de plantas en humedales (Durgan *et al.*, 2020), en minería para evaluar los cambios en la extensión de minas a cielo abierto y la cuantificación de volumen excavado (Esposito *et al.*, 2017) o hasta para el análisis de deformaciones del terreno causadas por la minería subterránea (Ćwiąkała *et al.*, 2020), entre otras áreas de aplicación. Sin embargo, el verdadero reto es la manipulación de la información, así como el refinamiento de la ejecución de la técnica enfocada al área de interés. A pesar del desarrollo de numerosos métodos automáticos y semiautomáticos, no existe uno que sea capaz de caracterizar discontinuidades con precisión en un tiempo mínimo en contraste con la metodología convencional (Battulwar *et al.*, 2021) y, más aún, uno que logre llevar a cabo la caracterización geomecánica de manera integral con propiedades índice y mecánicas de la matriz rocosa.

En términos generales, la mayoría de las investigaciones buscan definir algebraicamente los planos de discontinuidades a partir de diversas técnicas. En la tabla 1 se presentan diversos enfoques dentro de la literatura, entre ellos el análisis de taludes con ciertas particularidades, con métodos, técnicas de adquisición diferentes y también se destaca alguna característica de las discontinuidades en particular.

TABLA 1
Resumen de trabajos para la identificación de discontinuidades

Trabajo	Aplicación	Técnica/tipo de datos	Característica por identificar
Kong <i>et al.</i> (2021)	Talud rocoso con poca vegetación	Fotogrametría/nube de puntos 3D	Identificación de planos de discontinuidades y su persistencia
Tomás <i>et al.</i> (2020)	Taludes rocosos de vías férrea	Fotogrametría/nube de puntos 3D	Análisis de estabilidad cinemático
Riquelme <i>et al.</i> (2020)	Talud rocoso de granito	Fotogrametría o LiDAR/nube de puntos 3D	Persistencia en discontinuidades
Liu <i>et al.</i> (2019)	Talud en bloques	Fotogrametría o LiDAR/malla triangular	Bloques potencialmente inestables

Fuente:elaboración propia.

2. METODOLOGÍA

La figura 1 muestra el esquema general de la metodología propuesta para la identificación de discontinuidades de macizos rocosos mediante procesos semiautomáticos, en la cual se han determinado las condiciones y parámetros que debe considerar el especialista en la toma de decisiones para el uso de las herramientas propuestas. El fundamento matemático del *software* empleado lo han desarrollado Riquelme *et al.* (2014) y Girardeau-Montaut (2016). La primera etapa está centrada en la adquisición de las fotografías mediante el dron para formar la nube de puntos 3D. En la segunda etapa se presentan los pasos a seguir para identificar las discontinuidades del macizo rocoso. En las secciones subsecuentes se describe a detalle cada uno de los módulos que componen cada etapa de la figura 1.

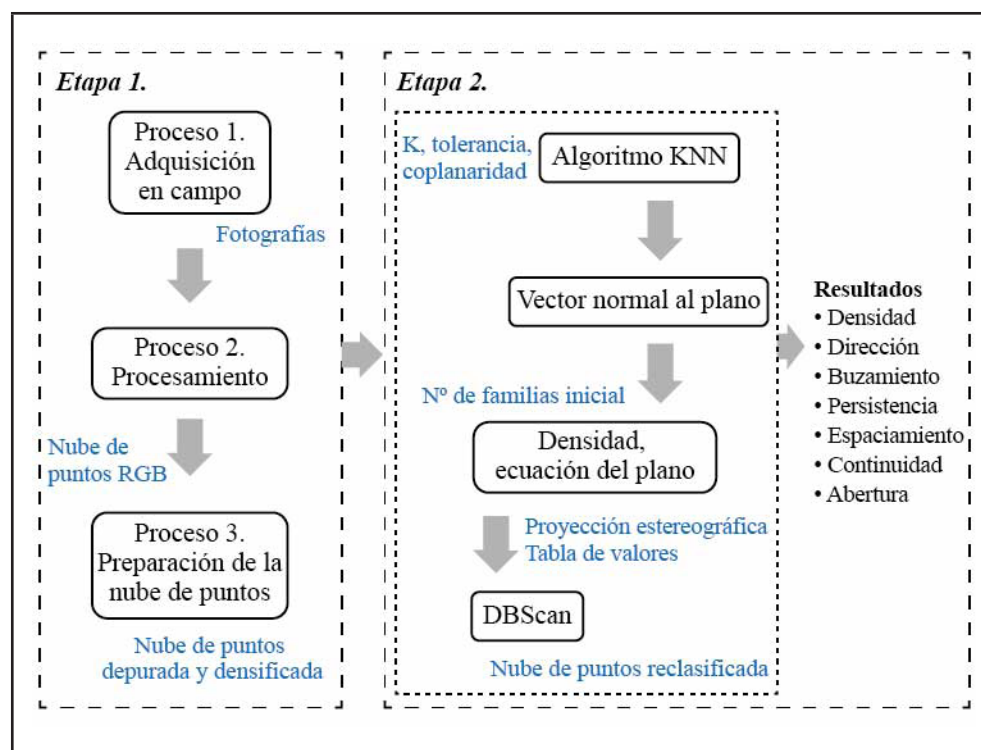


FIGURA 1

Metodología de identificación de discontinuidades basado en procesos semiautomáticos

Fuente: elaboración propia.

2. 1. Etapa 1: adquisición en campo, procesamiento y preparación de la nube de puntos

El desarrollo de la etapa 1 se ha subdividido en tres procesos independientes: 1) adquisición de la información *in situ*, 2) procesamiento de los datos para definir la nube de puntos inicial y 3) depuración de vegetación y otros elementos de obstrucción. Cada uno de ellos se explica a continuación.

2.1.1. Proceso 1. Adquisición en campo

La figura 2 presenta el proceso de adquisición de datos en campo, que contempla desde la llegada al sitio de estudio, ya que es necesario un reconocimiento visual preliminar para determinar el punto de partida del dron y evitar colisiones con árboles, líneas eléctricas, estructuras, entre otras. Además, se consideran las condiciones ambientales como la probabilidad de lluvia, la velocidad del viento, la presencia de neblina, así como la hora del día para la ejecución del vuelo, ya que por lo general debe realizarse cuando el sol se encuentre en su punto más alto para evitar sombras. Posteriormente, se determina si es necesario llevar a cabo más de un vuelo con el dron debido a las condiciones del terreno y colocar puntos de control terrestre (GCP), en inglés Ground Control Point. Los GCP hacen posible unificar las fotografías tomadas de diferentes vuelos o se utilizan cuando la recepción satelital es deficiente; estos se marcan sobre la pared rocosa y se toma su coordenada con una estación apoyada de algún sistema como el Sistema de Posicionamiento Global, conocido como GPS (Global Positioning System), un sistema de navegación cinética satelital en tiempo real conocido como GPS-RTK (Global Positioning System with Real Time Kinematic), o bien puede no utilizarse GCP siempre que se tenga recepción de al menos nueve satélites para ejecutar el vuelo con el UAV.

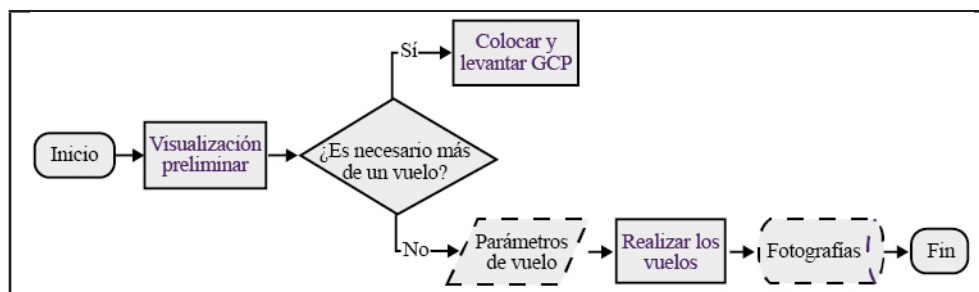


FIGURA 2

Proceso 1: adquisición en campo

Fuente: elaboración propia.

2. 1. 2. Proceso 2. Procesamiento de fotografías

La figura 3 establece los pasos para obtener la nube de puntos 3D, donde las fotografías capturadas pasan por un proceso de orientación basado en el Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator, conocido como Universal Transverse Mercator (UTM), correspondiente del sitio de estudio y con ello se genera una nube de puntos dispersa.

Con la nube de puntos dispersa se visualiza sin demasiado detalle la estructuración de la zona, además de identificar las áreas que no son de interés. Por lo tanto, se delimita únicamente la estructura general del sitio de estudio, en este caso la pared rocosa, para reducir el tiempo de procesamiento de la nube de puntos densa. Previo a esto, se localizan los GCP en las imágenes en caso de haberse considerado en campo para darle una mayor precisión a la nube de puntos densa. Una vez obtenida la nube de puntos densa 3D georreferenciada del sitio de estudio, se debe delimitar con mayor grado de detalle. A partir de la visualización y habilidad del usuario, la nube de puntos densa se depura de forma manual eliminando principalmente la vegetación o cualquier otro tipo de elemento que obstaculice la visualización de la pared rocosa. Al finalizar la depuración manual, la nube de puntos se exporta para ser utilizada en el siguiente proceso en formatos tales como .txt, .las, .laz, .pts o .dxf.

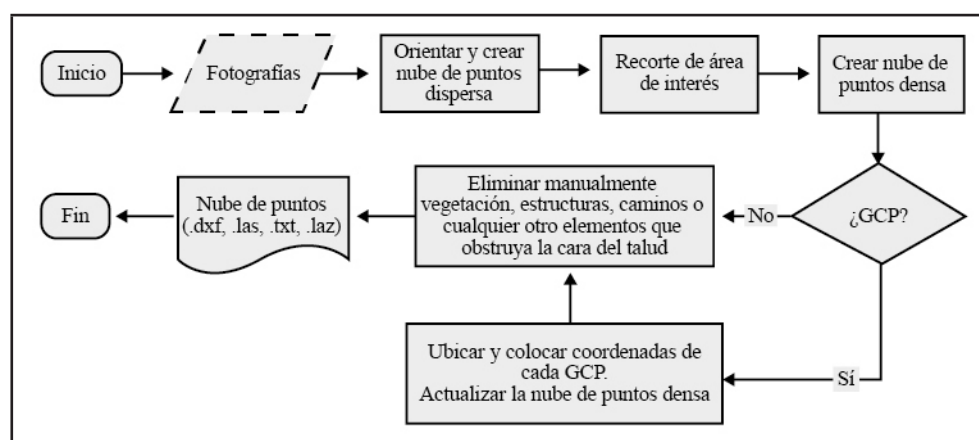


FIGURA 3

Proceso 2: procesamiento de fotografías

Fuente: elaboración propia.

2. 1. 3. Proceso 3. Preparación de la nube de puntos

En este proceso se busca eliminar la vegetación presente en especies de menor dimensión, como musgo o algunos helechos situados dentro de las discontinuidades y que requieren de una depuración más precisa. Sin embargo, el

proceso de manera manual resulta lento y complejo, por lo que en este tercer proceso se utiliza CloudCompare Girardeau-Montaut (2016), el cual favorece hacer un filtrado en función de colorimetría de la nube de puntos de acuerdo con características que se desean destacar o eliminar, así como definir una densificación uniforme de la nube de puntos. En la figura 4 se esquematiza el proceso, donde como dato de entrada se utiliza la nube de puntos obtenida por fotogrametría digital, descrita en el Proceso 2.

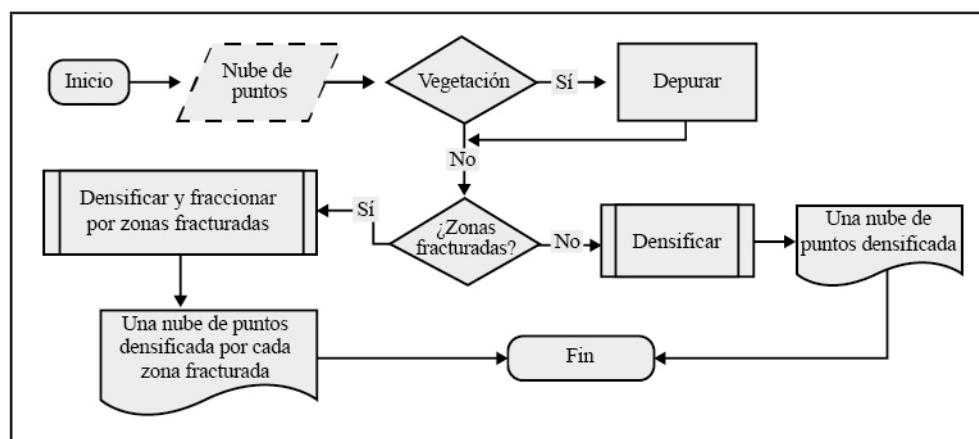


FIGURA 4

Proceso 3: preparación de la nube de puntos

Fuente: elaboración propia.

En caso de que aún presentar vegetación, el usuario deberá seleccionar los colores RGB que la representen. Una vez seleccionados, CloudCompare de Girardeau-Montaut (2016) elimina automáticamente todos los puntos que contengan los colores seleccionados tantas veces se desee hasta que el usuario considere que se ha eliminado la mayor cantidad de vegetación y que no interfiere en la identificación de discontinuidades en el macizo rocoso y se evalúa si existen zonas altamente fracturadas, las cuales requieren un análisis aislado, o la pared rocosa se divide en fracciones en función de la vegetación. Sin importar la cantidad de nubes de puntos generadas, éstas deben ser densificadas de manera uniforme con la finalidad de disminuir la cantidad de puntos, ya que archivos de varios millones de puntos pueden causar un déficit de velocidad de procesamiento.

2. 2. Etapa 2: identificación de discontinuidades

En la figura 5 se muestra el proceso de la etapa de identificación de discontinuidades. En esta etapa se determina la densidad de polos. Esto se refiere a que cada discontinuidad con su respectiva dirección y buzamiento representa un polo en el plano estereográfico; por consiguiente, la densidad de polos representa la acumulación de discontinuidades en una misma zona que forman así los grupos de familias de discontinuidades de la cara del talud de un macizo rocoso. Esto permite visualizar las familias de discontinuidades en una nube de puntos reclasificada y determinar las características principales de las discontinuidades para aplicar los métodos de clasificación geomecánica de Rock Mass Rating (RMR) y Slope Mass Rating (SRM).

Utilizando el programa DSE, el proceso para la identificación de las discontinuidades emplea como datos de entrada la nube de puntos depurada en la etapa 1. Primero se asigna un valor fijo del parámetro K del algoritmo KNN (determina el área de búsqueda de puntos vecinos cercanos), así como un margen de tolerancia permisible. Si el usuario considera que aún existe ruido en la nube de puntos, se llevará a cabo la prueba de coplanaridad (puntos de un grupo que forman parte de un mismo plano), y de manera automática se ejecuta el algoritmo KNN, reflejado en la distribución de los polos. Cuando el parámetro K del algoritmo KNN es muy grande, los polos tienden a ser más pequeños y, en caso contrario, cuando el parámetro K es pequeño el tamaño de los polos

es grande; por ello, se establece como recomendación a partir de análisis de sensibilidad de este parámetro, de acuerdo con las investigaciones de Riquelme *et al.* (2014), que el parámetro K del algoritmo KNN sea igual o mayor a 30. Como siguiente paso se determinan los vectores normales a cada plano con su respectivo ángulo a partir del cálculo de un plano de ajuste para obtener la orientación y buzamiento de cada plano. Posteriormente, el usuario debe definir la cantidad de familias, en este proceso el modelo probabilístico de Kernel estima la densidad de cada familia y a su vez se genera una proyección estereográfica donde se visualiza la concentración de polos. Gracias a esto el usuario define numérica y visualmente cómo llevar a cabo la redistribución de densidades, principalmente en aquellas que presentan una densidad menor a la unidad.

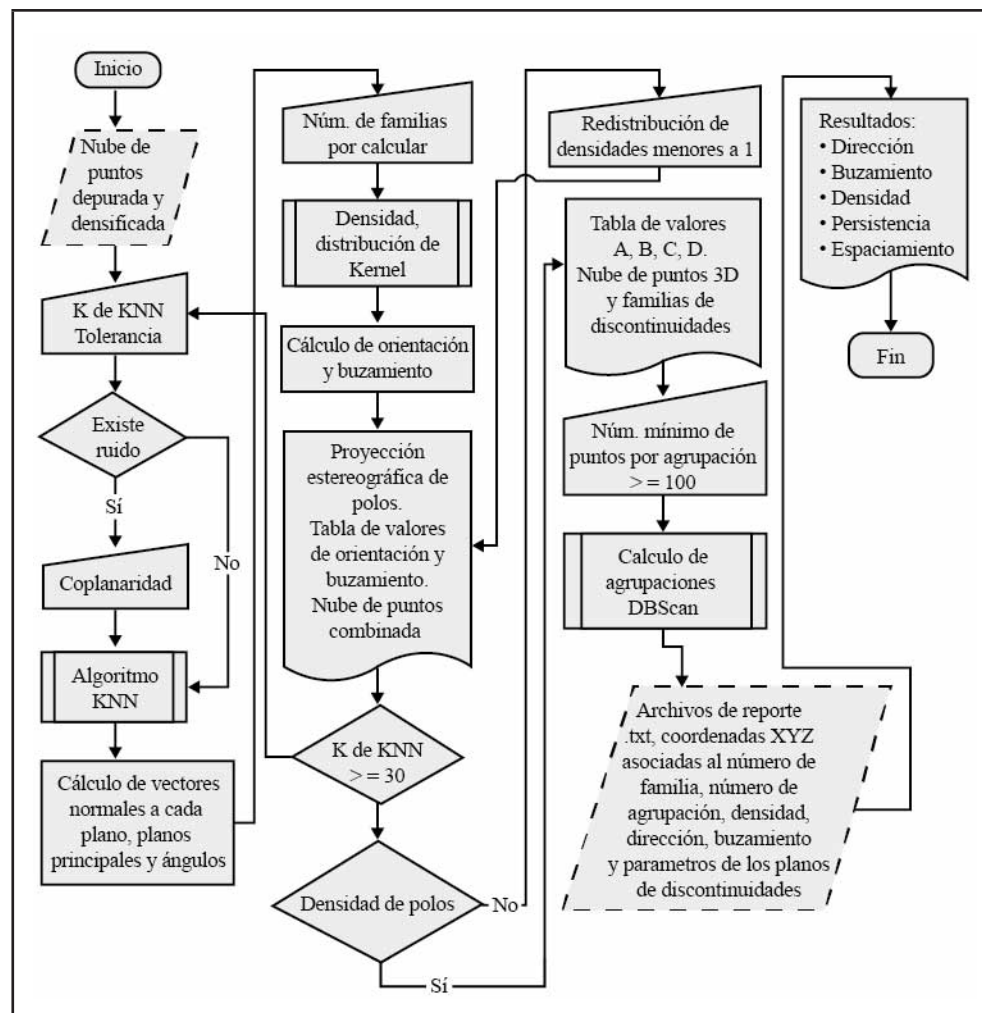


FIGURA 5

Etapa 2: identificación de discontinuidades

Fuente: elaboración propia.

El usuario deberá definir si el valor del parámetro de K del algoritmo KNN es idóneo para su caso de estudio y analizar si el número de familias mostrado en la proyección estereográfica es representativo para el caso de estudio. Analizando si la densidad de una familia es menor a 1, quiere decir que ella pertenece a la familia más cercana, o bien se trata de una familia atípica con poca relevancia en la estabilidad del talud. Al eliminar estas densidades, su peso se redistribuye en las demás familias, lo cual actualiza la proyección estereográfica y la nube de puntos. El proceso se da por terminado hasta que el usuario considere que la dimensión y densidad de polos de cada familia es consistente tanto en la nube de puntos reclasificada como en la proyección estereográfica de manera genérica.

Por último, será necesario definir la cantidad de puntos mínimo para cada agrupación con la finalidad de descartar agrupaciones demasiado pequeñas que no tengan relevancia en la caracterización del talud para lo cual se analizan los resultados de la ecuación del plano de cada familia. Dicha ecuación se estableció en Riquelme *et al.* (2014) y es definida en la ecuación 1, donde A, B y C son las tres componentes del vector normal unitario del plano en los ejes X, Y, Z respectivamente y D es la distancia perpendicular del origen al plano.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

La formación de familias está compuesta por agrupamientos; por tal motivo, es importante definir el tamaño de los clústeres. Por ello, se define un valor mínimo de puntos por clúster, de acuerdo con recomendaciones se ha definido un número mínimo de 100 puntos. Mediante el algoritmo DBSCAN, es posible encontrar clústeres de diferentes formas y tamaños, especialmente cuando tienen densidades variables o cuando hay ruido en los datos. Por otro lado, se genera una nueva nube de puntos, la cual es visualizada en CloudCompare Girardeau-Montaut (2016) con la finalidad de sobreponerla en la nube de puntos original e identificar si la cantidad mínima de puntos por agrupación es consistente o bien regresar a DSE y cambiar el número mínimo de puntos por clúster, siempre y cuando este valor sea mayor o igual que la recomendación de 100 puntos por agrupamiento. Al terminar el proceso, según lo considere el usuario, deberá recopilar, extraer los datos y recopilarlos para terminar el proceso.

3. RESULTADOS

En esta sección se muestra un caso de prueba con la metodología propuesta en la sección 2. El sitio de prueba es un banco de material de ignimbrita utilizado para su comercialización y la restauración de sitios históricos de la ciudad de Morelia o para la elaboración de figuras artesanales. El banco de material está localizado al sureste de la ciudad de Morelia, Michoacán, en la localidad de San José de las Torres (figura 6); de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM) (E14-1, 2005), la zona se clasifica geológicamente como toba riolítica y mediante pruebas de laboratorio el material se clasificó como ignimbrita, ya que su resistencia oscila entre 50 a 100 MPa. La pared rocosa tiene una altura promedio de 14 m con una longitud de aproximadamente 100; existe una gran cantidad de material de residuo producto de la misma extracción del material.



FIGURA 6

Sitio de prueba

Fuente: elaboración propia.

Nota: a) macrolocalización, b) microlocalización. Coordenadas: 19°39'36.01"N; 101° 7'49.15"O/2175258.20N, 276642.9E UTM.

3. 1. Etapa 1: adquisición en campo, procesamiento y preparación de la nube de puntos del sitio de prueba

3. 1. 1. Proceso 1: adquisición en campo del sitio de prueba

A partir de una visualización preliminar, se identificó un pequeño camino de acceso hacia la parte superior de la pared, punto donde se efectuó un primer vuelo para delimitar la zona. El vuelo se hizo con un dron Phantom DJI 4 a una altura de 20 m, con una resolución de terreno de 1.01 cm/pix en grilla sencilla (figura 7). El segundo vuelo fue de forma manual; partiendo de la zona baja a una distancia promedio de 15 m (varía si el sitio lo permite) frente a la pared rocosa donde se elevó el dron progresivamente hasta una altura máxima de 20 m, se capturaron las fotografías rotando hasta los 360° (por la forma del sitio), como se muestra en la figura 8. Dada la dimensión del talud, no se consideró el uso de GCP, ya que el vuelo fue planeado con Pix4Dcapture; se tuvo una conectividad de 12 satélites, 80% de solapamiento entre imágenes y 70° de ángulo de visión de cámara. El vuelo se realizó alrededor de las 12 pm centro de México. Sin embargo, la densa vegetación generó zonas de sombra.

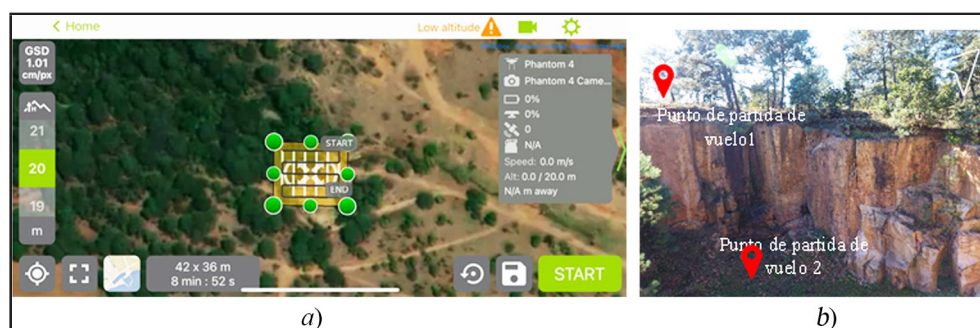


FIGURA 7

Características de vuelo

Fuente: elaboración propia.

Nota: a) planeación del vuelo, b) ubicación de punto de partida del vuelo 1 y 2.



FIGURA 8

Puntos de captura de imágenes del vuelo

Fuente: elaboración propia.

3. 1. 2. Proceso 2: procesamiento de fotografías del sitio de prueba

Las 311 fotografías obtenidas se procesaron con Metashape Agisoft L.L.C (2023) en la zona UTM 14N, correspondiente al sitio de prueba. Se generó la nube de puntos dispersa y se delimitó el área de la pared rocosa. Después se obtuvo la nube de puntos densa y se eliminó la vegetación progresivamente de manera manual. Sin embargo, esto ocasiona huecos de información. La calidad de la nube de puntos densa facilitó que se visualizaran características de la pared rocosa, tales como la fracturación del talud, en este caso en bloques verticales, los planos principales de discontinuidades tanto verticales como algunos horizontales, así como planos de discontinuidades de mecanismos de ruptura tipo cuña y la presencia de escurrimientos superficiales (figura 9).

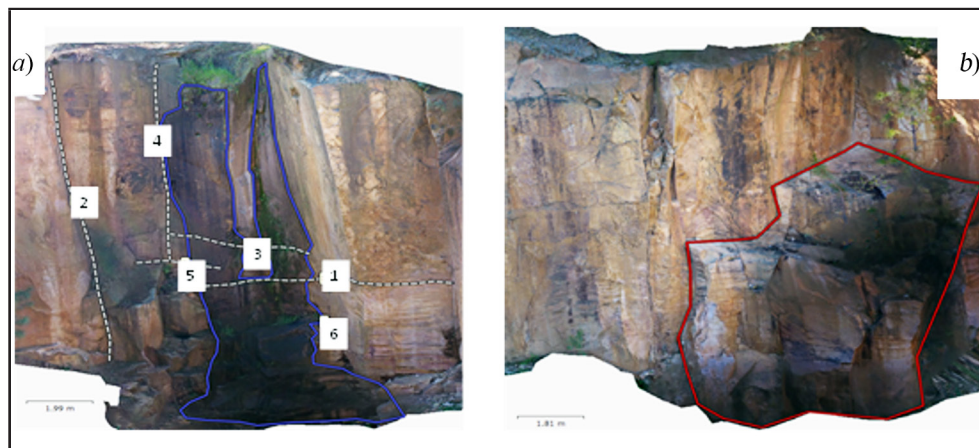


FIGURA 9

Visualización de características

Fuente: elaboración propia.

Nota: a) de discontinuidades verticales (2 y 4), discontinuidades horizontales (1, 3 y 5) y zona de escurrimiento (6), b) formación de cuña.

3. 1. 3. Proceso 3: preparación de la nube de puntos del sitio de prueba

Requiriendo una eliminación más detallada de vegetación incrustada en discontinuidades, con CloudCompare de Girardeau-Montaut (2016) se extrajeron puntos con colores RGB 1:196, 218, 94 y 2:111, 139, 86 (correspondientes a tonos verdes). Después se redujo la densidad de la nube de puntos para evitar el déficit de velocidad en el procesamiento de la siguiente etapa. Mediante CloudCompare de Girardeau-Montaut (2016), se utilizan filtros de decimación, que consisten en la eliminación de puntos redundantes teniendo en cuenta que se ve afectada la precisión y calidad de la nube de puntos, por lo que es importante definir el criterio deseado, ya sea por distancia, densidad, aleatoriamente o mediante cuadrículas, lo cual facilita el procesamiento y análisis de grandes conjuntos de datos de nubes de puntos. Se optó por el espaciamiento entre puntos de 2 cm y 5 cm; sin embargo, se trabajó con la primera debido a la calidad de la nube de puntos.

3. 2. Etapa 2: identificación de discontinuidades del sitio de prueba

La identificación de los planos de discontinuidades se llevó a cabo con las herramientas descritas en la metodología. La nube de puntos depurada y densificada se ingresa en DSE de Riquelme *et al.* (2014); se consideró la prueba de coplanaridad (puntos pertenecientes a un mismo plano), pues la nube de puntos aún mantenía la presencia de ruido, ya que no se logró depurar por completo la vegetación, además de presentarse un área de la pared rocosa sin información. Se utilizó un valor de K vecinos de 30 para el algoritmo KNN y una tolerancia de 0.2 para obtener los planos principales y su respectivo ángulo con base en los vectores normales de cada plano. En seguida, se estableció

una configuración inicial de 10 familias, con el propósito de visualizar un amplio umbral, se calcula la densidad de polos, la orientación y buzamiento de los planos de discontinuidades mostrándose en forma de proyección estereográfica y la nube de puntos se muestra clasificada en rango de colores de cada familia. Sin embargo, algunas familias requieren de redistribución por ser densidades menores de 1, lo cual indica su pertenencia a la familia más cercana y reduce la distribución a solo cuatro familias de discontinuidades (figura 10).

Al tratarse de un sitio de explotación de ignimbrita, el frente de explotación presenta una gran cantidad de material de desecho (familia J3, amarillo), por lo que en realidad son áreas sin relevancia para la estabilidad de la pared rocosa, o bien huecos de información grandes que entorpecen el proceso, por lo cual se opta por recortar dichas zonas de la nube de puntos, que da como resultado la nube de puntos mostrada en la figura 11; otro aspecto que se observa es el manchado de la superficie rocosa, las cuales se refieren a que durante las épocas de lluvias se presentan escurrimientos superficiales. Sin embargo, este efecto no es posible observarlo en la figura 10, ya que esta solo muestra los planos de discontinuidades sin importar si está manchada o no.

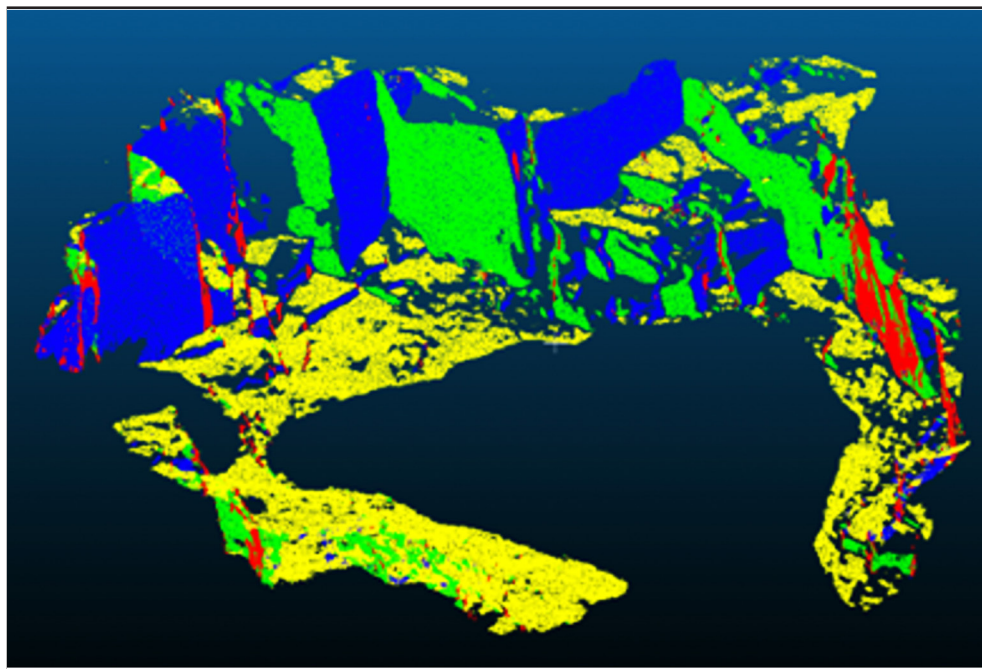


FIGURA 10

Nube de puntos clasificada en rango de colores para cada familia de discontinuidades

Fuente: elaboración propia.

Nota: J1-azul, J2-verde, J3-amarillo, J4-rojo.



FIGURA 11

Nube de puntos modificada*

Fuente: elaboración propia.

Nota: *se depuró la zona baja correspondiente a material de desecho y área con información insuficiente.

La nueva nube de puntos (figura 11) se ingresó a DSE para la identificación de los planos de discontinuidades utilizando un valor de K vecinos igual a 30 del algoritmo KNN, y un número inicial de discontinuidades de 10, redistribuyéndose a cuatro familias. En la figura 12 se muestra una comparativa de los resultados utilizando las dos nubes de puntos con diferentes grados de densificación con la finalidad de visualizar el efecto de la densificación de la nube de puntos en los resultados. Lo anterior deja en claro que, a menor distanciamiento entre puntos, se logra visualizar con mayor detalle los planos de discontinuidades, principalmente en las zonas con mayor fracturación, tal como se observa en la figura 12b.

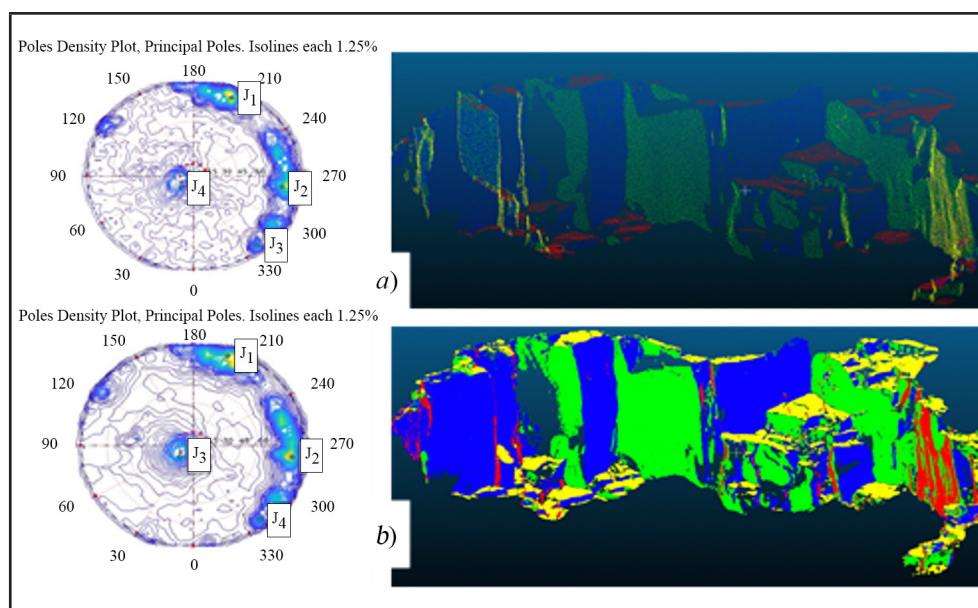


FIGURA 12

Planos de discontinuidades con su proyección estereográfica

Fuente: elaboración propia.

Nota: a) nube de puntos con densificación de 5 cm de distancia entre puntos, b) nube de puntos con densificación de 2 cm de distancia entre puntos.

Al término del proceso el programa de manera automática genera un archivo de reporte donde refleja numéricamente la orientación, buzamiento, densidad, número de familias y los parámetros que definen la ecuación del plano, de acuerdo con la ecuación 1, tal como se muestra en el cuadro 1. Adicionalmente, DSE (Discontinuity Set Extractor) permite obtener el espaciamiento normal (distancia perpendicular entre discontinuidades de un mismo plano); la herramienta está fundamentada en la metodología descrita en Riquelme *et al.* (2015), la cual extrae las discontinuidades afectadas por conjunto de discontinuidades persistentes y no persistentes a partir de nubes de puntos y analiza la ubicación relativa de los conjuntos en el espacio y calcula el espaciamiento entre las diferentes discontinuidades.

En el caso de estudio de este artículo hay zonas muy fracturadas como el área inferior derecha de la figura 10, ya que es la zona más explotada, por lo que sería erróneo considerar que no son discontinuidades persistentes. Por otra parte, podría pensarse que la zona está altamente erosionada por las manchas intensas en algunas zonas del banco de material. Sin embargo, no se trata de erosión, sino de la existencia de escurrimientos superficiales durante las épocas de lluvias que ocasionan manchas o alteraciones intensas en las épocas de secas.

En el cuadro 2 se muestra el espaciamiento normal considerando persistencia y no persistencia. Sin embargo, para mejores resultados tendría que analizarse solo la fracción de interés considerando los clústeres de dicha zona.

CUADRO 1

Familias de discontinuidades, orientación, buzamiento, densidad cantidad de clúster y parámetros del plano de discontinuidad, donde D es la distancia del origen al plano

Familia	Orientación/ buzamiento	Densidad (%)	Núm. de agrupaciones	Componentes de la ecuación del plano, a en el sentido x , b en el sentido y y c en el sentido z y d distancia del origen al plano $Ax + By + Cz + D = 0$		
				Ax	By	Cz
J1	104.36/86.07	33.78	97	-0.3307	-0.9413	0.0685
J2	277.69/83.26	30.88	112	-0.9841	0.1329	0.1174
J3	45.02/19.11	15.75	98	0.2315	0.2314	0.9449
J4	321.12/86.94	19.60	92	-0.6268	0.7773	0.0533

Fuente: elaboración propia.

CUADRO 2

Espaciamiento normal de cada familia de discontinuidades en condición persistente y no persistente

	J1		J2		J3		J4	
Persistencia	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí
Núm. de agrupaciones	97		112		98		92	
Espaciamiento normal (m)	0.79	0.41	0.79	0.31	0.69	0.15	0.94	0.45

Fuente: elaboración propia.

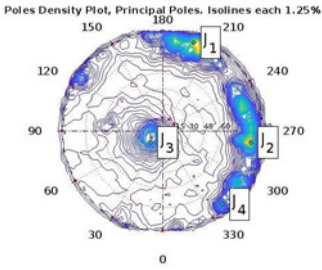
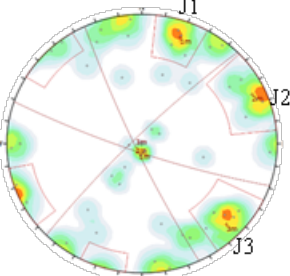
Con la metodología propuesta es posible llevar a cabo diversos tipos de análisis, según se requiera, ya sea un análisis cinemático de estabilidad de taludes para determinar la condición de falla crítica, el factor de seguridad y proporcionar propuestas de estabilización, así como la caracterización geomecánica donde se determine la calidad del macizo rocoso, condición actual y la descripción específica de los métodos de excavación, ya sea que se trate del corte de un talud, excavación de un túnel o algún tipo de cimentación. Con todo, siempre será importante contar con información adicional referente a la matriz rocosa como densidad, porosidad, resistencia a la compresión simple, resistencia a corte, entre otros. Con el fin de validar el método propuesto en la sección de discusión de resultados, se integran la comparativa con los resultados obtenidos mediante la metodología convencional.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La confiabilidad de los resultados en estudios relacionados con las condiciones geotécnicas de un macizo rocoso conllevan una gran responsabilidad, ya que se habla no solamente de costos o tiempos de la ejecución de los trabajos de corte, excavación o estabilización, sino que además trae como consecuencia la seguridad de los especialistas al ser expuestos a las adversidades del sitio al llevar a cabo la caracterización del macizo rocoso a partir de la metodología convencional. Por su parte, la metodología propuesta ofrece ventajas respecto a la metodología convencional, tales como el tiempo de adquisición de información o la seguridad del personal técnico, entre otras, así como diferencias notables en cuanto a otras metodologías.

En el tabla 2 se muestran las características y limitantes del método propuesto contrastado con el método convencional. El levantamiento convencional solo obtiene información de la zona baja de hasta 2 m de altura a través de las herramientas usuales (brújula de geólogo, esclerómetro y cinta métrica), lo que conlleva a que las agrupaciones de las familias de discontinuidades se muestren dispersas, mientras que con la metodología propuesta las familias de discontinuidades se muestran mejor delimitadas, por lo que los principales beneficios que demuestra la metodología propuesta son *a)* disminución de ambigüedad y riesgo del especialista en campo, *b)* menor tiempo de adquisición de información en campo, *c)* recolectar información de las zonas altas y los alrededores del talud, *d)* la metodología contribuye a que de manera sistémica se determinen las características de las familias de discontinuidades.

TABLA 2
Comparativa de metodología convencional y metodología propuesta

Método	Proyección estereográfica	Características	Limitantes
Propuesta	Familias: 4 	-Tiempo de adquisición: 40 min -Tiempo de procesamiento: 3 h -Información digital (nube de puntos) de alta resolución -Personal: 2 -Características que se obtienen: núm. de familias, espaciamiento, persistencia, abertura, rugosidad -Reducción de ambigüedad	-No se puede obtener la resistencia de la roca a partir de fotogrametría -El relleno y filtraciones solo se estima de manera visual en el modelo -Vegetación -Iluminación
Convencional	Familias: 3 	-Tiempo de adquisición: 6 h -Tiempo de elaboración de proyecciones: 2 h -Información en forma de lecturas manuales -Personal: 4 -Características que se obtienen: núm. de familias, espaciamiento, persistencia, abertura, rugosidad, resistencia, relleno y filtraciones	-Vegetación -Solo se obtuvo información de la zona baja -No más de 50 lecturas -Susceptibilidad a accidentes -En caso de existir incertidumbres, es necesario regresar al sitio -Subjetivo debido al criterio del especialista y el uso correcto de herramientas (brújula, cinta métrica, esclerómetro)

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3 se muestra un resumen de las características y requerimientos de diversas técnicas propuestas en la bibliografía. Miranda Gómez *et al.* (2022) determinaron la morfología y anomalías en el terreno aplicado a remanentes arqueológicos utilizando UAV y puntos de control, con ortomosaicos y modelos digitales de elevación; además, recomiendan su propuesta para sitios con abundante vegetación, aunque la técnica (índice de vegetación normalizado) es recomendada para imágenes multiespectrales. Tomás *et al.* (2020), Kong *et al.* (2021) y Riquelme *et al.* (2020) se enfocaron en macizos rocosos. Tomás *et al.* (2020) realizaron un análisis cinemático de taludes mediante el empleo de UAV y el *software* DSE, CloudCompare, KAT y RocSciences, el cual está en función del conocimiento, habilidad y experiencia del diseñador. Kong *et al.* (2021) abordan la caracterización geomecánica cuantitativa utilizando ventanas de muestreo, calculan estadísticamente las características de las discontinuidades e implementa algoritmos basados en la categorización de discontinuidades ubicadas aleatoriamente que interceptan la ventana de muestreo. Riquelme *et al.* (2020), en su caso, determinan la persistencia de discontinuidades empleando la técnica de SfM con cámaras de obturador mecánico.

En comparación con Miranda Gómez *et al.* (2022), la metodología propuesta solo usa nubes de puntos y la técnica de filtrado de vegetación no requiere imágenes multiespectrales, lo cual disminuye el costo de equipamiento. En contraste con Tomás *et al.* (2020) y Kong *et al.* (2021), solo requerimos de un operador de UAV y seguir las consideraciones de la metodología planteada, con la cual es posible obtener información de todo el macizo rocoso y de las zonas altas, además de no verse afectada la geolocalización de las imágenes, como en el caso de Riquelme *et al.* (2020).

TABLA 3
Características y requerimientos de diversas técnicas

Método	Tipo de análisis	Herramientas y características de datos	Requisitos	Tiempo
Miranda Gómez <i>et al.</i> (2022)	Morfología del terreno y anomalías aplicado a remanentes arqueológicos	-UAV y GCP -Modelo digital de terreno -Ortomosaico -Agisoft Metashape y Pix4D -Índice de vegetación normalizado	Técnico capacitado, operador de equipos	Sin referencia de tiempo estimado
Tomás <i>et al.</i> (2020)	Análisis cinemático de taludes	-UAV, GCP con estación total -Agisoft Metashape -CloudCompare -DSE -KAT -RocScience -Nube de puntos	Técnico capacitado y operador de equipos	±7 h
Kong <i>et al.</i> (2021)	Caracterización cuantitativa de discontinuidades, comparativa de método por trazas y fotogrametría	Línea de exploración, ventanas de muestreo, dron, GPS RTK, nube de puntos	Operador de equipos y técnico capacitado en la toma de datos y en la ejecución de algoritmos	Sin referencia de tiempo estimado
Riquelme <i>et al.</i> (2020)	Persistencia, comparativa entre fotogrametría y método convencional	-Brújula -Cámara Nikon -GCP -Agisoft Metashape -CloudCompare -DSE -Nube de puntos	Técnico capacitado	Sin referencia de tiempo estimado
Metodología propuesta	Identificación de discontinuidades (metodología genérica)	-UAV y GCP -Agisoft Metashape -CloudCompare -DSE -Nube de puntos -Filtrado de vegetación por umbral de colores RGB y reducción de densidad de nube de puntos	Operador de dron	±3 h

Fuente: elaboración propia.

PROSPECTIVA

La caracterización geomecánica de macizos rocosos es un aspecto que no debe tomarse a la ligera, ya que conlleva la seguridad del especialista y de la obra que se va a realizar. Por ende, aún existen diversos problemas por resolver para mejorar la metodología propuesta; por ejemplo, la eliminación de vegetación es un tema abierto para analizar taludes. Otro problema es la reconstrucción de nubes de puntos, ya que mostramos que la depuración de la vegetación genera huecos de información, por lo que es necesario aplicar técnicas de fusión con datos LiDAR para observar lo que existe detrás de la vegetación. Reconstruir nube de puntos ha sido explorado en figuras arqueológicas, las cuales tienen formas regulares, más no así en macizos rocosos, donde es complejo estimar una superficie irregular.

CONCLUSIONES

Este artículo describe una propuesta metodológica para la identificación de planos de discontinuidades mediante nubes de puntos 3D obtenidas de fotogrametría con UAV. Si bien la técnica fotogramétrica ha sido aplicada en áreas de investigación como arquitectura, agricultura, y minería, es distinta en función de como los algoritmos utilizados para el análisis emplean la información (nube de puntos, ortomosaicos, MDE o mallas). Por tanto, nuestra metodología ofrece con los procesos semiautomáticos descritos la identificación de los planos de discontinuidades con menor incertidumbre. Recordemos que la incertidumbre se asocia con la experiencia y criterio del especialista al momento de obtener las medidas y llevar a cabo la caracterización del macizo rocoso. Las ventajas que aporta la metodología propuesta respecto a la técnica convencional son *a)* al utilizar UAV, la toma de datos es segura para el operador por las técnicas de descenso vertical o escalada que evitan exponer su seguridad, *b)* la precisión de los modelos fotogramétricos disminuye la ambigüedad, ya que es posible observar todo el talud y hacer mediciones sobre él y *c)* la aplicación a diversos sitios de estudio donde existen macizos rocosos. Por otra parte, algunas limitaciones son *a)* para asegurar la calidad del modelo fotogramétrico, es necesario seguir las recomendaciones con respecto a cómo planear el vuelo y tomar en cuenta las condiciones ambientales (viento, lluvia y niebla), así como la cantidad de iluminación del sitio para asegurarse de contar con una mejor precisión de la información, *b)* la depuración de vegetación genera oquedades de información importante del macizo rocoso y *c)* la metodología propuesta es un apoyo para la caracterización geomecánica, ya que siempre debe considerarse las propiedades índice y mecánicas de la matriz rocosa obtenidas de pruebas de laboratorio para que la caracterización sea considerada como cuantitativa, o bien emplear pruebas geofísicas (resistividad eléctrica, refracción sísmica) que permitan estimar la calidad de la matriz rocosa y propiedades hidráulicas, dado que a partir de fotogrametría solo es posible detectar el área de las zonas de escurrimiento, mas no las propiedades hidráulicas del flujo dentro de la masa rocosa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al financiamiento de la beca 1006917 por parte de CONAHCYT, del proyecto 613 de cátedras CONAHCYT, así como del proyecto de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH y del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán, número de referencia ICTI-PICIR23-006. Asimismo, agradecemos a la revista CIENCIA *ergo-sum* por la oportunidad y a los árbitros por sus comentarios y correcciones en pro de la mejora del artículo.

REFERENCIAS

- Agisoft L.L.C. (2023). *Agisoft Metashape 2006*. <https://www.agisoft.com/>
- Battulwar, R., Zare-Naghadehi, M., Emami, E., & Sattarvand, J. (2021). A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 920-936. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.008>
- Chen, J., Zhu, H., & Li, X. (2016). Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud. *Computers & Geosciences*, 95, 18-31. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.06.015>
- Ćwiąkała, P., Gruszczyński, W., Stoch, T., Puniach, E., Mrocheń, D., Matwij, W., & Wójcik, A. (2020). UAV applications for determination of land deformations caused by underground mining. *Remote Sensing*, 12(11), 1733.

- Durgan, S. D., Zhang, C., Duecaster, A., Fournery, F., & Su, H. (2020). Unmanned aircraft system photogrammetry for mapping diverse vegetation species in a heterogeneous coastal wetland. *Wetlands*, 40, 2621-2633. <https://doi.org/10.1007/s13157-020-01373-7>
- Esposito, G., Mastrorocco, G., Salvini, R., Oliveti, M., & Starita, P. (2017). Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environmental Earth Sciences*, 76(3), 103.
- Feng, Q., & Röshoff, K. (2014). A survey of 3D laser scanning techniques for application to rock mechanics and rock engineering. In *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014* (pp. 265-293). Cham: Springer International Publishing.
- Girardeau-Montaut, D. (2016). *CloudCompare. Open Source Project*. <http://www.danielgm.net/cc/>
- Kong, D., Saroglou, C., Wu, F., Sha, P., & Li, B. (2021). Development and application of UAV-SfM photogrammetry for quantitative characterization of rock mass discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 141, 104729. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104729>
- Liu, C., Liu, X., Peng, X., Wang, E., & Wang, S. (2019). Application of 3D-DDA integrated with unmanned aerial vehicle–laser scanner (UAV-LS) photogrammetry for stability analysis of a blocky rock mass slope. *Landslides*, 16, 1645-1661. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01196-6>
- Miranda-Gómez, R., Cabadas-Báez, H. V., Antonio-Némiga, X., & Dávila-Hernández, N. (2022). Geospatial integration in mapping pre-Hispanic settlements within Aztec empire limits. *Virtual Archaeology Review*, 13(27), 49-65. <https://doi.org/10.4995/var.2022.16106>
- Pagano, M., Palma, B., Ruocco, A., & Parise, M. (2020). *Discontinuity characterization of rock masses through terrestrial laser scanner and unmanned aerial vehicle techniques aimed at slope stability assessment*. *Applied Sciences*, 10(8), 2960. <https://doi.org/10.3390/app10082960>
- Pix4D S.A. (2023). *Pix4D S. A. Software 2011*. <https://www.pix4d.com/>
- Rafee, M., & Yari, M. (2023). Application of Photogrammetry in Archaeology. *Journal of Archaeology and Archaeometry*, 2(2), 55-65. <https://doi.org/10.30495/JAA.2023.1993318.1013>
- Riquelme, A., Araújo, N., Cano, M., Pastor, J. L., Tomás, R., & Miranda, T. (2020). Identification of Persistent Discontinuities on a Granitic Rock Mass Through 3D Datasets and Traditional Fieldwork: A Comparative Analysis. In A. Correia, J. Tinoco, P. Cortez, & L. Lamas (Eds.), *Information Technology in Geo-Engineering. ICITG 2019. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_73
- Riquelme, A. J., Abellán, A., & Tomás, R. (2015). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 195, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009>
- Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, 68, 38-52. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J. L., Pagán, J. I., Asensio, J. L., & Ruffo, M. (2020). Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. *Revista de Teledetección*, 55, 1-15. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13168>
- Wu, C. (2011). *VisualSFM: A Visual Structure from Motion System 2011*. <http://www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm>, 14(2).



Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/21645>

Cómo citar el artículo:

Rodríguez Servin, M. G., Morales Rosales, L. A. y Arreygue Rocha, J. E. (2025). Metodología para identificar discontinuidades en macizos rocosos mediante procesos semiautomáticos con fotogrametría y UAV. *CIENCIA ergo-sum*, 32. <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a17>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a17>



Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Declaración de autoría (CRediT):

Marsella Gissel Rodríguez Servín: conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, *software*, visualización, redacción borrador-original, redacción-revisión y edición.

Luis Alberto Morales Rosales: conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, supervisión, redacción-revisión y edición, adquisición de fondos y recursos.

José Eleazar Arreygue Rocha: conceptualización, investigación, metodología, supervisión, redacción-revisión y edición, adquisición de fondos y recursos.