

Adquisición y evaluación de datos geométricos de macizos rocosos a partir de imágenes tridimensionales para su uso en análisis geotécnicos

J.L. Peñuela¹, Gloria Inés Beltrán-Calvo² y Rodrigo Hernández-Carrillo³

Recepción: 03-11-2018, Aceptación: 07-03-2019 | En línea: 31-05-2019

doi:10.17230/ingciencia.15.29.2

Resumen

En este artículo, se evalúa la aplicación de una herramienta de adquisición remota para el muestreo y la medición de propiedades de las discontinuidades en macizos rocosos, basado en la toma e interpretación de imágenes tridimensionales. Metodológicamente, se integra un amplio plan experimental tanto en campo como en laboratorio computacional, para recopilar datos estructurales tales como la orientación, la persistencia y espaciamiento de discontinuidades presentes en un macizo rocoso tomado como caso de estudio. Paralelamente, se llevó a cabo un intenso trabajo de toma de datos en campo por metodologías convencionales de brújula y cinta, con fines comparativos y de validación estadística. Los resultados obtenidos permiten establecer las ventajas del uso de técnicas no convencionales, en términos de calidad y cantidad de información, así como de eficiencia en términos del tiempo requerido para el levantamiento de información en campo. Mediante el análisis semiautomático de imágenes tridimensionales

¹ Universidad Nacional de Colombia, jlpenuelan@unal.edu.co, Bogotá, Colombia.

² Universidad Nacional de Colombia, gibeltranc@unal.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-2323-7241>, Bogotá, Colombia.

³ Universidad Nacional de Colombia, Universidad Pontificia Bolivariana, rhernandezca@unal.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-7412-8902>, Colombia.

se logró el mapeo geológico y la caracterización de discontinuidades para fines geotécnicos, constituyéndose en una herramienta poderosa con gran potencial de uso en proyectos viales y mineros en el medio colombiano.

Palabras clave: Análisis de imágenes tridimensionales; macizo rocoso; caracterización de discontinuidades; detección remota; mapeo geológico; Colombia.

Acquisition and Evaluation of Rock Mass Geometric Data from Three-Dimensional Images for Use in Geotechnical Analysis

Abstract

In this paper, the application of a remote acquisition tool for sampling and measurement of discontinuities properties of rock masses, based on the interpretation of three-dimensional images, is evaluated. The applied method integrates a wide experimental plan in both, field and computer laboratory, to collect structural data such as orientation, persistence and spacing of discontinuities in a rock mass taken as a case study. Simultaneously, an intensive work of data collection in the field was carried out by conventional methodologies using compass and tape, for comparative purposes and statistical validation. The results allow to establish the advantages of using unconventional techniques, in terms of quality and quantity of information, as well as efficiency in terms of time spent for field data collection. Through the semi-automatic analysis of three-dimensional images, geological mapping and objective characterization of discontinuities for geotechnical purposes were achieved, constituting a powerful tool with great potential for use in road and mining projects in Colombia.

Keywords: Three-dimensional images analysis; rock mass; characterization of discontinuities; remote detection; geological mapping; Colombia.

1 Introducción

El comportamiento de un macizo rocoso está determinado principalmente por las propiedades mecánicas de la roca intacta y por las características geométricas y geológicas del sistema de discontinuidades presentes, lo cual a su vez es reflejo de la diversidad de procesos geológicos asociados a su formación. La descripción adecuada de las discontinuidades en un macizo rocoso es un paso fundamental en el proceso de comprensión y predicción de su comportamiento para fines geotécnicos.

Las propiedades del sistema de discontinuidades que tienen influencia en el comportamiento mecánico del macizo rocoso son de tipo geométrico, como es el caso de la orientación, la persistencia y el espaciamiento, y de tipo geológico, como por ejemplo la litología, el material de relleno y la presencia de agua [1]. La medición convencional de estas características mediante brújula y cinta suele ser riesgosa, subjetiva y dispendiosa en campo, para obtener una base de datos representativa.

A pesar del desarrollo de nuevas tecnologías para la adquisición de información estructural en macizos rocosos que permitan superar estas limitaciones, la caracterización de sistemas de discontinuidades por metodologías no convencionales es aún inusual en Colombia.

En este trabajo, se emplea una herramienta de detección remota terrestre para el muestreo y la medición de propiedades geométricas de las discontinuidades en macizos rocosos, basado en la toma e interpretación de imágenes tridimensionales. El sistema empleado permite recopilar amplia información estructural de un macizo, útil para su mapeo geológico y para la caracterización con fines geotécnicos. Se aporta así un precedente en la aplicación de tecnologías prometedoras para efectuar una caracterización muy completa y objetiva de macizos rocosos, de gran utilidad en proyectos viales o mineros.

2 Metodologías convencionales

Dentro de las metodologías de toma de información en campo comúnmente empleadas en la caracterización de sistemas de discontinuidades, se contempla la realización de perforaciones con extracción de núcleos de roca y la observación y el análisis de superficies expuestas del macizo rocoso [1]. Si bien los núcleos de roca proporcionan información valiosa de la frecuencia y de la litología, el alto costo y tiempo de perforación, junto con la escasa información obtenida para caracterizar propiedades de las discontinuidades, son desventajas que limitan la aplicación de esta metodología como único recurso.

Algunas de estas limitaciones pueden ser superadas mediante el muestreo basado en la observación y el análisis de superficies expuestas del macizo rocoso. A pesar de su bajo costo, también tiene limitaciones puesto que

las superficies expuestas no siempre coinciden con las zonas específicas de interés y su accesibilidad depende de las condiciones geológicas y geomorfológicas del sitio. Además, la cantidad de discontinuidades presentes en un talud es generalmente alta y la medición de sus propiedades puede resultar inviable, por ser una tarea dispendiosa en campo para obtener una base de datos representativa, siendo necesario definir una muestra considerada representativa del total de estructuras presentes en la superficie expuesta.

Existen metodologías con fundamentos probabilísticos para la definición de muestras de discontinuidades, mediante líneas de exploración o mediante ventanas [1], cuya validez depende del error de muestreo, el cual tiene tres componentes: el sesgo y la aleatoriedad [2],[3],[4], y la medición [5],[6]. Sin embargo, en la práctica común la definición de la muestra se realiza según el criterio de expertos, cuya confiabilidad depende por completo de la interpretación correcta de las condiciones geológicas y geomorfológicas del macizo rocoso y de la subjetividad en cuanto a la selección del sector de muestreo.

En la determinación de las propiedades geométricas de las discontinuidades, el error de medición es relevante en aquellas zonas inaccesibles, en donde es obligatorio estimar visualmente las distancias. En la orientación, el error aumenta en condiciones de alta rugosidad y curvatura, donde se miden valores diferentes en una misma discontinuidad; si la junta es muy cerrada el error es inherente a la dificultad en el posicionamiento de la brújula.

Por otra parte, en macizos rocosos en condiciones cambiantes debido al avance permanente de obras de ingeniería o de explotaciones mineras, existen restricciones debido al corto periodo de exposición de los taludes, generando información estructural incompleta. Finalmente, el acercamiento físico hacia una discontinuidad para medir sus propiedades puede reducir la visión general para determinar elementos estructurales relevantes del talud [6].

3 Metodologías no convencionales

Las limitaciones de los métodos convencionales han fomentado el desarrollo de nuevas tecnologías para la recopilación de información a distancia o de-

tección remota [7], donde la captura de datos se puede realizar con sensores aéreos, satelitales o terrestres que pueden ser móviles o estacionarios.

Bhreasail et al [8] presentan una amplia discusión sobre técnicas emergentes de detección remota tales como de imágenes multiespectrales e hiperespectrales, radar interferométrico de apertura sintética (Insar) [9], radiometría pasiva de microondas y cámaras con sensores de movimiento. Así mismo, se reportan varios estudios de caso, utilizando emisiones laser con LIDAR [10],[11], o soluciones mediante combinación de diferentes técnicas [12],[13],[14],[15],[16], o análisis comparativos entre técnicas [17]. En varios de estos estudios se han empleado drones, e incluso globos aerostáticos [18] provistos de cámaras para el registro continuo y programado de imágenes.

Existe en el medio internacional, muchos otros referentes que reportan importantes avances con el uso de técnicas fotogramétricas y de digitalización y análisis de imágenes de taludes rocosos, para uso específico en mecánica de rocas y modelación geotécnica [19],[20],[21],[22],[23]. Entre las metodologías no convencionales empleadas se destacan aquellas basadas en principios de fotogrametría terrestre por su bajo costo y la alta precisión de sus resultados. En este tipo de metodologías, la posición y las dimensiones de un objeto en el espacio se determinan a partir de mediciones realizadas sobre fotografías obtenidas desde diferentes posiciones.

En un trabajo pionero en la aplicación de la fotogrametría terrestre en la mecánica de rocas, Preuss [24] utiliza un fototeodolito y un estereocomparador para determinar las coordenadas de tres puntos de una discontinuidad, y a partir de ellas calcular el plano. Posteriormente, Hagan [25] utiliza un montaje compuesto por dos cámaras fotográficas convencionales para determinar las coordenadas de cinco puntos en una discontinuidad, y a partir de ellas calcular la ecuación que mejor se ajusta al plano.

El desarrollo de computadores en la década de 1980 posibilitó el procesamiento y análisis de una alta cantidad de información asociada a imágenes digitales o matrices de píxeles. Aprovechando estas nuevas herramientas, Tsoutrelis [26] utilizó un digitalizador para convertir una fotografía convencional en un mapa de píxeles para analizarla computacionalmente, con lo cual se extrajo información de alta calidad de parámetros geométricos bidimensionales: longitud de traza, espaciamiento y rugosidad.

El análisis de imágenes 3D se ha usado incluso para estudios detallados de perfiles de rugosidad lineal y estimación del JRC (Joint Roughness Coefficient), con configuraciones fotográficas específicas [27],[28]. Este último estudio, permitió además estimar la separación y propiedades mecánicas e hidráulicas en discontinuidades de roca. Igualmente, se ha logrado resolver el problema de obtención de datos de distribución espacial en rocas cataclásticas de manera fácil y precisa, para estudiar los coeficientes de permeabilidad, leyes de distribución espacial de campos de esfuerzos e infiltración y cambios en las leyes de flujo con el tiempo [29].

Los sistemas remotos se clasifican según el equipo empleado en la obtención de las imágenes digitales: escáneres laser y cámaras digitales convencionales. Los primeros, poseen un amplio campo de visión independiente de la resolución de las fotografías; no obstante, el análisis de las imágenes obtenidas requiere de algoritmos especiales y el costo de estos equipos es bastante alto [30]. Riquelme et al, [31] desarrollaron un algoritmo para medir la persistencia real de discontinuidades usando agrupamiento de nubes de puntos 3D; sin embargo, recomiendan tratar la persistencia real como una función continua y no como un valor único, validar los resultados con geólogos de gran experiencia y conocimiento, así como la verificación de la resolución de los instrumentos usados, especialmente de los escáneres láser 3D terrestre de largo alcance. Por su parte, las cámaras digitales convencionales son las más ampliamente usadas, tienen un bajo costo y los algoritmos utilizados en el procesamiento de las imágenes digitales obtenidas son sencillos.

En Colombia se encuentran referencias de estudios de análisis de imágenes de radar, interferometría y de satélite [32], pero no hay reportes de estudios con análisis de imágenes tridimensionales a partir de fotografías terrestres tomadas a corto alcance, aplicados al estudio de taludes rocosos.

4 Caso de estudio

El macizo rocoso seleccionado para estudio es un talud de explotación de agregados para concretos ubicado en el municipio de Une, Cundinamarca, en la zona denominada El Pedregal. El macizo pertenece a la formación Areniscas de Une y se ubica en un monoclinal con buzamiento en dirección noroccidente e inclinación variable entre 18° y 30°. En el límite oriental

del monoclinial se extiende un escarpe en una longitud aproximada de 1500 metros, en cuyo extremo norte se ubica actualmente el frente de explotación de la mina. En esta zona se identifica una superficie expuesta con inclinación semi-vertical, con rumbo variable entre 280° y 300° , altura promedio de 25 metros y longitud aproximada de 270 metros. En la Figura 1 se observan la ubicación geográfica de la mina y las características topográficas del terreno en el frente de explotación.

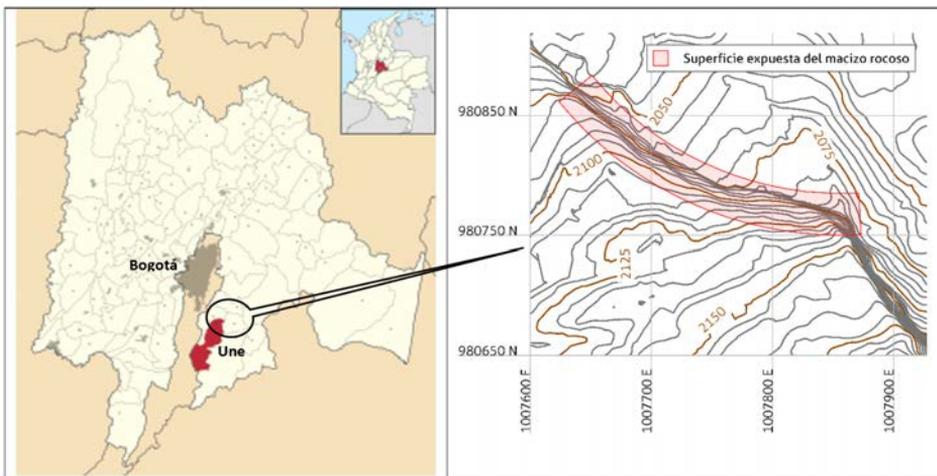


Figura 1: Ubicación de la mina El Pedregal y mapa de elevación del terreno en el frente de explotación.

Fuente: Adaptado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Une_\(Cundinamarca\)/media/File:Colombia_-_Cundinamarca_-_Une.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Une_(Cundinamarca)/media/File:Colombia_-_Cundinamarca_-_Une.svg) con el Sistema de coordenadas MAGNA Colombia Bogotá

La litología observada, muestra en la zona superior intercalaciones de estratos de cuarzo-arenitas de grano fino a grueso y lutitas carbonosas con variaciones de arena de grano medio y moderada cementación; en la zona inferior intercalaciones de secuencias de areniscas de grano fino a muy fino y lutitas carbonosas de bajo espesor. En la Figura 2 se evidencia la secuencia litológica descrita, así como dos familias de diaclasas.

Se realizó una amplia campaña experimental tanto en campo como en laboratorio computacional en el macizo, para recopilar datos estructurales tales como la orientación, la persistencia y espaciamiento de discontinuidades.



Figura 2: Litología típica observada en la superficie expuesta del macizo rocoso de estudio

des presentes, siempre que existiera accesibilidad. Para fines comparativos y de validación estadística, se aplicaron metodologías convencionales de brújula y cinta y no convencionales de adquisición remota y análisis de imágenes 3D basada en restitución fotogramétrica.

4.1 Adquisición de información por metodologías convencionales

La adquisición de información estructural la realizaron dos geólogos con experiencia en mecánica de rocas y conocimiento de las condiciones geológicas y geomorfológicas de la región, provistos de dos brújulas geológicas y dos cintas métricas. El subconjunto de discontinuidades representativas quedó definido según el criterio de los expertos, sin usar metodologías con fundamento probabilístico.

Inicialmente, se agrupan los datos de muestreo de discontinuidades en familias según la orientación; luego, se determina la orientación promedio y el cono de confianza de cada familia de discontinuidad, bajo la suposición de una distribución de probabilidad espacial; este proceso de agrupamiento y de proyección estereográfica se realiza por medio del software Orient [33]. Por último, se determinan los valores estadísticos y la distribución de

probabilidad de la longitud de traza y de la separación en dirección vertical de cada familia.

4.2 Adquisición de información por sistema remoto

Esta labor es realizada por un ingeniero civil con experiencia en mecánica de rocas y conocimiento de las condiciones geológicas y geomorfológicas de la región y un asistente de investigación. El sistema de detección remota empleado consiste en una cámara digital convencional calibrada, un trípode de escalamiento y un software de reconstrucción, procesamiento y análisis de imagen, denominado ShapeMetriX3D [34].

El proceso de adquisición de información se desarrolla en tres etapas. La primera, in situ en la cual se obtienen las imágenes digitales del talud; en la segunda, se reconstruye la superficie expuesta del macizo con base en las imágenes digitales obtenidas, mediante principios de fotogrametría. En la tercera, se definen los elementos estructurales de interés en la imagen tridimensional. A continuación se detalla cada etapa.

4.2.1 Obtención in situ de imágenes digitales En primer lugar, se define el área de medición o región de la superficie expuesta del macizo rocoso en la cual se desea obtener información estructural. Para el caso de estudio, el talud queda dividido en 20 regiones. Luego, se realiza el montaje del trípode de escalamiento que soporta un vástago central, en cuyos extremos se ubican dos discos de referencia separados a una distancia de 2.35 metros. El dispositivo es ubicado a un costado del área de medición definida, de tal forma que este no interfiera en la adquisición de información estructural, según se indica en la Figura 3. El vástago central se posiciona verticalmente por medio de un nivel de burbuja incorporado.

Posteriormente, es necesario determinar el azimut de una línea de referencia entre dos puntos cualquiera de la superficie expuesta del macizo rocoso; dado que se requiere una alta precisión, se evita el uso de la brújula geológica. En su lugar, se demarcan dos puntos que definen la línea de referencia sobre el talud, cuyas coordenadas se determinan mediante topografía; con ellas, se calcula el azimut de la línea de referencia.

Se procede entonces con la obtención de imágenes digitales del área

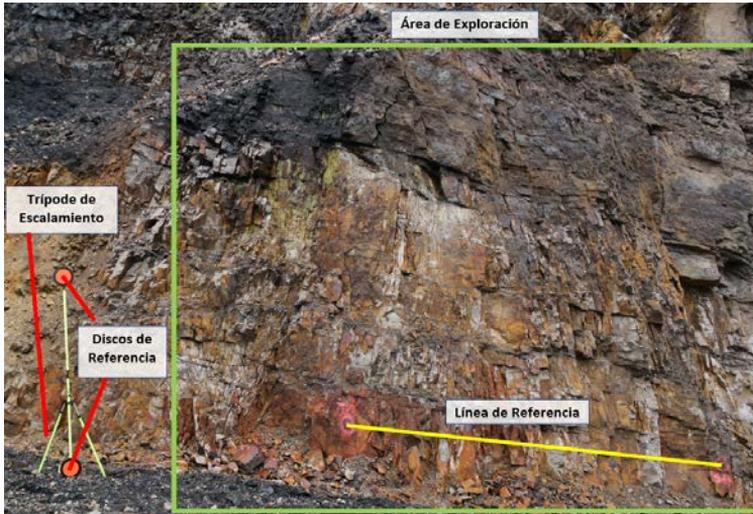


Figura 3: Actividades preliminares para la toma de imágenes

de medición desde dos posiciones de observación diferentes. Las imágenes digitales obtenidas componen un par estereoscópico, por medio del cual se determina la posición de los puntos de la superficie expuesta del macizo rocoso de estudio, tal y como se presenta en la Figura 4. A fin de garantizar la calidad de la imagen tridimensional, las posiciones de observación deben localizarse a una misma distancia del talud no mayor a 100 metros; además, la longitud de línea base o distancia entre las posiciones de observación debe ser entre 12% y 20% de la distancia que hay entre ellas y el talud.

Después de comprobar que no existen obstáculos visuales entre el área de medición y los puntos de observación definidos y se ubica la cámara digital calibrada en una posición horizontal, y se obtura enfocando el área de medición de modo que la imagen se extienda en la zona central (ver Figura 4) en donde la distorsión es menor.

4.2.2 Reconstrucción, procesamiento y análisis de la superficie expuesta del macizo Las imágenes digitales obtenidas in situ se importan para su procesamiento al software ShapeMetriX3D. La reconstrucción de la superficie expuesta del macizo se efectúa automáticamente, produciendo una imagen tridimensional en un sistema local de coordenadas a escala

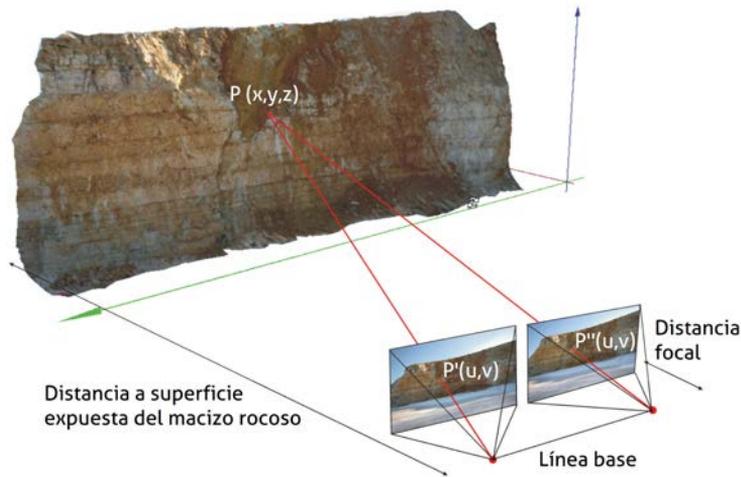


Figura 4: Principios de fotogrametría empleados en la reconstrucción de la superficie del macizo

Fuente: modificado de [34]

no real, resultante de la combinación de una fotografía digital bidimensional y una red triangular de elevaciones topográficas. La visualización de las imágenes 3D se realiza por medio de una herramienta de navegación espacial, que posibilita desplazamientos, rotaciones y acercamientos en cualquier lugar. Una herramienta adicional permite la visualización de cortes transversales de la superficie expuesta del macizo rocoso a lo largo de líneas definidas por el usuario.

En lo relacionado con la calidad de la imagen tridimensional, el software calcula la longitud de la línea base (ver Figura 4) y la distancia entre la cámara y el talud y verifica la relación del 12 % y el 20 %. Adicionalmente, el software calcula un índice de calidad variable entre 0 y 5; la imagen tridimensional se puede utilizar solo si el índice de calidad es mayor a 4.5. Para reducir el tamaño del archivo y aumentar el rendimiento del software, se recortan y eliminan las zonas de la imagen tridimensional ubicadas fuera del área de medición establecida; cada zona a recortar se define por medio de una polilínea tridimensional. En Figura 5 se muestra una imagen

reconstruida y recortada.



Figura 5: Superficie reconstruida, recortada y ajustada por medio del software ShapeMetriX3D

Las dimensiones de la imagen tridimensional son escaladas a las dimensiones reales de la superficie del macizo de estudio. Para ello, se ubican en la imagen tridimensional los centros de los discos de referencia del trípode de escalamiento, los cuales están separados una distancia de 2.35 metros. El software realiza automáticamente el proceso de escalamiento, para obtener finalmente una imagen 3D en un sistema local de coordenadas a escala real, el cual se debe rotar, para que coincida con el norte geográfico. Para ello se definen en la imagen los puntos inicial y final de la línea de referencia (ver Figura 3) y se ingresa el dato del azimuth. Adicionalmente, es posible georreferenciar la imagen si se hace un levantamiento de coordenadas de varios puntos sobre la imagen.

Con la imagen escalada, orientada y referenciada, el siguiente paso es identificar los elementos estructurales de interés, de modo semiautomático e interactivo.

4.2.3 Definición de elementos estructurales en la imagen tridimensional El analista experto debe inspeccionar en detalle la imagen tridimensional y determina todos los elementos estructurales de interés; por

ejemplo, es posible diferenciar las discontinuidades de origen natural, de aquellas producidas por procesos de perforación y voladura. El usuario delimita sobre la imagen tridimensional las trazas o planos de las discontinuidades y el software determina automáticamente su geometría, aunque no posee herramientas de identificación automática de todas las discontinuidades; este proceso se desarrolla manualmente.

En el caso de las trazas, se define una polilínea tridimensional a lo largo de la discontinuidad; siempre que ésta presente un cambio significativo en la profundidad, el software determina automáticamente la orientación de la superficie de discontinuidad que mejor se aproxima a la polilínea. También se calcula automáticamente la longitud de las trazas de las discontinuidades a partir de la posición absoluta de los nodos de las polilíneas tridimensionales que las definen. La frecuencia, por su parte, se calcula a lo largo de una o más líneas definidas por el usuario sobre la superficie del talud, a partir de la posición absoluta de los puntos de intersección de estas con las trazas de las discontinuidades. Finalmente, se determinan los valores estadísticos y la distribución de probabilidad de la longitud de traza y la separación en dirección vertical, en cada familia de discontinuidad.

En el caso de los planos, se define un polígono tridimensional sobre la discontinuidad y el software determina automáticamente la orientación promedio al interior de la zona definida. En ambos casos, el software asiste el proceso de definición, fijando automáticamente los nodos a la imagen tridimensional. Este proceso se repite en cada una de las discontinuidades identificadas en la imagen. En la Figura 6 se ilustra el proceso de identificación de las discontinuidades por medio de la herramienta JMX Analyst.

Para cada una de las discontinuidades definidas, el software calcula el azimut de buzamiento, buzamiento, separación y longitud. Es importante destacar que la separación calculada es la separación objetiva y reproducible, definida como la distancia entre dos discontinuidades en dirección normal a la orientación. Adicionalmente, tiene herramientas de medición puntual de coordenadas y de orientaciones en un punto específico de una superficie de discontinuidad.

El software también posee herramientas automáticas de proyección estereográfica y de análisis de agrupamiento de las discontinuidades por medio de un algoritmo del tipo k-Means [34], aunque también permite exportar la

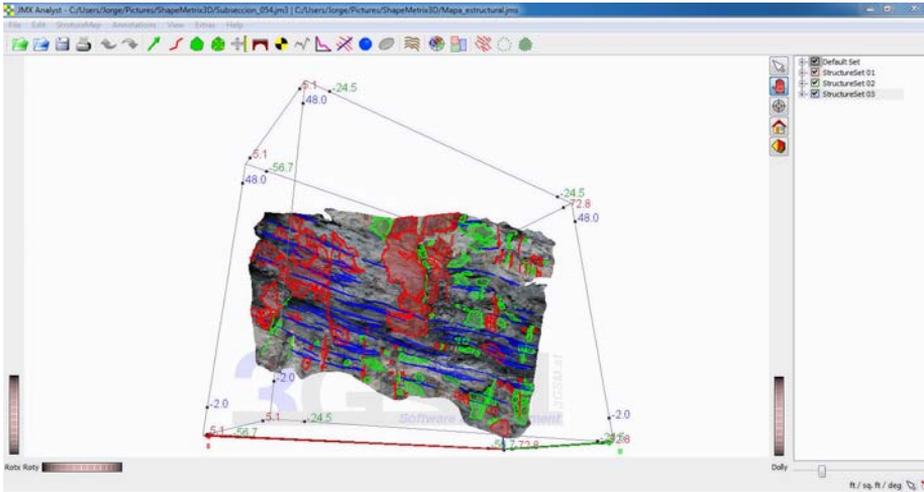


Figura 6: Elementos estructurales definidos en una imagen tridimensional

información estructural obtenida para elaborar los análisis por metodologías convencionales y usando el software Orient, para luego comparar con los resultados obtenidos automáticamente.

5 Resultados y análisis

En esta parte se presentan los análisis comparativos de los resultados obtenidos en los diferentes parámetros estructurales medidos sobre el macizo rocoso estudiado, con método convencional de brújula y cinta y con análisis semiautomáticos a partir de imágenes tridimensionales.

Como producto del preprocesamiento inicial de las fotografías, se establece un área de medición del talud aproximada de 7 m de alto por 50 m de longitud. La observación con brújula y cinta solo se logra en la franja de la base del talud, cubriendo como máximo 2 m de altura, equivalente al 28 % del área de observación lograda con las imágenes, la cual se reduce aún más al aplicar técnicas de muestreo.

5.1 Orientación

En la Figura 7 se presentan los diagramas de polos de la información estructural obtenida por métodos convencionales y con el análisis de imágenes 3D. Se presentan además los contornos en intervalos de 20 %, el cono de confianza y la orientación característica de las familias de discontinuidad.

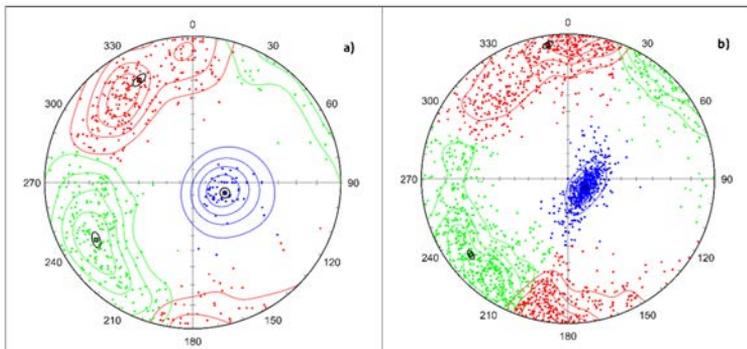


Figura 7: Diagrama de polos de datos de orientación obtenida (a) por metodologías convencionales y (b) por el sistema ShapeMetriX3D. Sistema de proyección: equiángulo en el hemisferio inferior

Los diagramas de polos muestran tendencias bastante similares y el análisis de agrupamiento coincide en identificar la existencia de tres familias de discontinuidad, mostradas en diferentes colores. La primera, en rojo, es un sistema de diaclasas con buzamiento en dirección sureste e inclinación semi vertical. La segunda familia, indicada en verde, es un sistema de diaclasas con buzamiento en dirección noreste e inclinación semi vertical, el cual ejerce control estructural sobre el talud de estudio. La tercera familia de discontinuidad, presentada en azul, es la estratificación con buzamiento en dirección noroccidente e inclinación de 20° aproximadamente.

En estos diagramas se aprecian diferencias importantes en la distribución de frecuencias de la información estructural de los sistemas de diaclasas. La proporción de elementos estructurales de la primera familia de discontinuidad con buzamientos en dirección sur a sureste es del 84 % en el levantamiento con brújula y cinta y del 62 % por medios no convencionales; en este último caso el 38 % tiene buzamiento en dirección norte a noroccidente. Esta diferencia puede deberse al bajo cubrimiento del área

muestreada, a la subjetividad de los métodos convencionales en la selección de las discontinuidades representativas y a una preferencia a muestrear elementos estructurales con buzamiento en dirección sur a sureste.

En las tablas 1 y 2 se presentan los parámetros estadísticos de la orientación obtenidos con brújula y con ShapeMetrix3D respectivamente. La medida de tendencia central empleada es la dirección y el ángulo de buzamiento de la orientación característica, que corresponde al máximo vector propio del tensor de orientaciones. La confiabilidad es indicada por el ángulo medio del cono de 95 % de confianza.

Tabla 1: Parámetros estadísticos de la orientación obtenida con brújula y cinta

| | Familia 1 | Familia 2 | Familia 3 |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Número de datos | 272 | 235 | 56 |
| Dirección de buzamiento (°) | 152.68 | 58.93 | 288.23 |
| Ángulo de buzamiento (°) | 76.51 | 74.53 | 25.71 |
| Ángulo del cono de confianza (°) | 2.87 | 2.98 | 3.68 |

Tabla 2: Parámetros estadísticos de la orientación obtenida por análisis de imágenes 3D

| | Familia 1 | Familia 2 | Familia 3 |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Número de datos | 657 | 732 | 521 |
| Dirección de buzamiento (°) | 171.54 | 51.59 | 297.39 |
| Ángulo de buzamiento (°) | 86.20 | 80.43 | 15.07 |
| Ángulo del cono de confianza (°) | 1.09 | 1.17 | 1.14 |

En relación con la cantidad de información estructural de orientación de discontinuidades, se observa que el análisis de imágenes permite contar con 1910 registros, lo que representa más de tres veces los datos recopilados con brújula y cinta (563 datos). Así mismo, la distribución de la información por familias también es significativamente diferente. Con análisis de imagen, el 35 % de los datos corresponden a la familia 1, el 38 % a la familia 2 y el 27 % de la familia 3, logrando uniformidad en la base de datos. Por su parte, con la metodología convencional, tan solo el 10 % de la información estructural adquirida pertenece a la estratificación (familia 3); el 90 % restante se distribuye casi equitativamente en las otras dos familias.

La poca densidad de datos en la estratificación se debe a que las discontinuidades de la estratificación son cerradas, lo cual dificulta y, en la mayoría de los casos, impide el posicionamiento de la brújula geológica. En consecuencia, el error de muestreo del método convencional aumenta en todos sus componentes: en el sesgo, puesto que la muestra está constituida por discontinuidades cuya orientación es determinable y no por aquellas representativas; en el error de medición, debido a la dificultad en el posicionamiento del equipo; y en el error de estimación, dado que la cantidad de datos obtenidos es baja. Por lo mismo, entre los dos métodos se aprecian diferencias del orden de 10° en la medición tanto de la dirección de buzamiento como del buzamiento de la estratificación. La mayor discrepancia entre ambos métodos se observa en la dirección de buzamiento en la primera familia de discontinuidad, con 19° de diferencia, lo cual parece estar relacionado con la preferencia en el método convencional a muestrear discontinuidades con buzamiento en dirección sur a sureste, para el caso de estudio. La menor discrepancia entre métodos se presenta en los resultados de orientación para la familia 2, con una diferencia máxima de 7° en los ángulos medidos entre ambos métodos. Es evidente que la cantidad de datos estructurales obtenidos por los dos métodos y los errores de medición mencionados, generan diferencias en la confiabilidad de la orientación característica de las familias de discontinuidades, evaluada mediante el ángulo medio del cono de confianza. Es así como el ángulo determinado con los datos de análisis de imágenes tridimensionales resulta entre 60 % y 70 % menor que el calculado con los datos de brújula y cinta. Si bien los valores de los ángulos son bajos, la diferencia indica una mayor dispersión de los datos obtenidos convencionalmente.

5.2 Persistencia o Longitud de traza

En las tablas 3 y 4 se presentan los parámetros estadísticos de la información de longitud de traza adquirida por método convencional y no convencional, agrupada por familias de discontinuidades. Así mismo, se indican los parámetros de las distribuciones de probabilidad exponencial y normal.

En primer lugar, se evidencian diferencias importantes en la cantidad de información de longitud de traza. El número de datos logrados usando cinta es de 465, mientras que con análisis de imagen se obtienen 1810 datos, lo

cual representa casi cuatro veces más datos que el método convencional. En cuanto a la composición de la información estructural, los datos obtenidos a partir de las imágenes se reparten en proporción más o menos uniforme para las tres familias de discontinuidades; de los datos obtenidos con cinta, apenas un 2 % pertenece a la estratificación.

Tabla 3: Parámetros estadísticos y de probabilidad de la longitud de traza por método convencional

| | Familia 1 | Familia 2 | Familia 3 |
|--|-----------|-----------|-----------|
| Número de mediciones | 233 | 225 | 7 |
| % de datos por familia | 50 | 48 | 2 |
| Valor medio (m) | 1.91 | 1.66 | 0.93 |
| Desviación estándar (m) | 2.61 | 1.68 | 0.73 |
| <i>Distribución exponencial</i> | | | |
| λ (1/m) | 0.52 | 0.60 | 1.08 |
| <i>Distribución normal logarítmica</i> | | | |
| (m) | 0.17 | 0.11 | -0.30 |
| σ (m) | 0.92 | 0.86 | 0.68 |

Tabla 4: Parámetros estadísticos y de probabilidad de la longitud de traza por método no convencional

| | Familia 1 | Familia 2 | Familia 3 |
|--|-----------|-----------|-----------|
| Número de mediciones | 590 | 721 | 499 |
| % de datos por familia | 33 | 40 | 27 |
| Valor medio (m) | 1.16 | 1.03 | 2.71 |
| Desviación estándar (m) | 0.93 | 0.93 | 1.97 |
| <i>Distribución exponencial</i> | | | |
| λ (1/m) | 0.86 | 0.97 | 0.37 |
| <i>Distribución normal logarítmica</i> | | | |
| (m) | -0.12 | -0.27 | 0.75 |
| σ (m) | 0.76 | 0.76 | 0.74 |

En este caso, la baja cantidad de información estructural de la estratificación medida con cinta, se debe a limitaciones de accesibilidad o de alcance por parte de los geólogos. En efecto, de los 56 planos cuya orientación es determinable con brújula, en solo 7 planos es posible medir la longitud de traza, con un valor promedio inferior a un metro. Mediante las

imágenes tridimensionales, se midió un valor medio de persistencia en la estratificación de 2.7 m, el cual resulta 290 % mayor respecto a los datos medidos con cinta.

Por su parte, para las otras dos familias de discontinuidades, las persistencias medidas con imágenes 3D y software resultan 4 % menores a las medidas con cinta, lo cual seguramente también está asociado con la diferencia significativa en cantidad de datos medidos por cada método y por el área de muestreo utilizada.

En las Figuras 8 y 9 se presenta la distribución de frecuencias de los datos de longitud de traza obtenidos por medio de metodologías convencionales y del sistema ShapeMetriX3D, respectivamente para cada una de las familias de discontinuidades. Adicionalmente, se incluyen las distribuciones de probabilidad ajustadas a la información estructural adquirida. La distribución de frecuencias de los datos obtenidos muestra que, la persistencia obtenida por medio del sistema ShapeMetriX3D se ajusta mejor a una distribución de probabilidad normal logarítmica, mientras los datos medidos con cinta se adaptan más a una distribución exponencial.

Los intervalos de agrupamiento de la persistencia han sido definidos a criterio de cada grupo de expertos responsable de la recopilación de datos. Para el caso de medición con cinta, se establecieron cuatro intervalos: el primero, para discontinuidades con traza menor a 1 m, el segundo de 1 a 3 m, el tercero de 3 a 10 m y el último de 10 a 20 m. Pese a que la medición con cinta no reporta ningún dato con persistencia mayor a 10 m, en las fotografías del talud mostradas anteriormente, se evidencia que la estratificación posee longitudes de traza importantes, que superan ampliamente el valor medio reportado; la longitud de traza más frecuente en todas las familias de discontinuidades es menor a 1 m, con probabilidades de ocurrencia entre 0.5 y 0.7. En cuanto a la medición con imágenes 3D, se establecieron intervalos de persistencia que incrementan cada 0.5 m. En el caso de la estratificación, la máxima longitud de traza determinada es de 12 m y el 90 % de los datos tiene un valor menor o igual a 5 m. Se observa amplia variedad en las longitudes de traza registradas; si bien hay probabilidades similares de encontrar persistencias entre 0.5 y 3 m, el intervalo de mayor frecuencia está comprendido entre 1.5 y 2 m. Las otras dos familias de discontinuidad no registran persistencias superiores a 6 m, siendo más frecuentes aquellas con longitudes de traza entre 0.5m y 1 m.

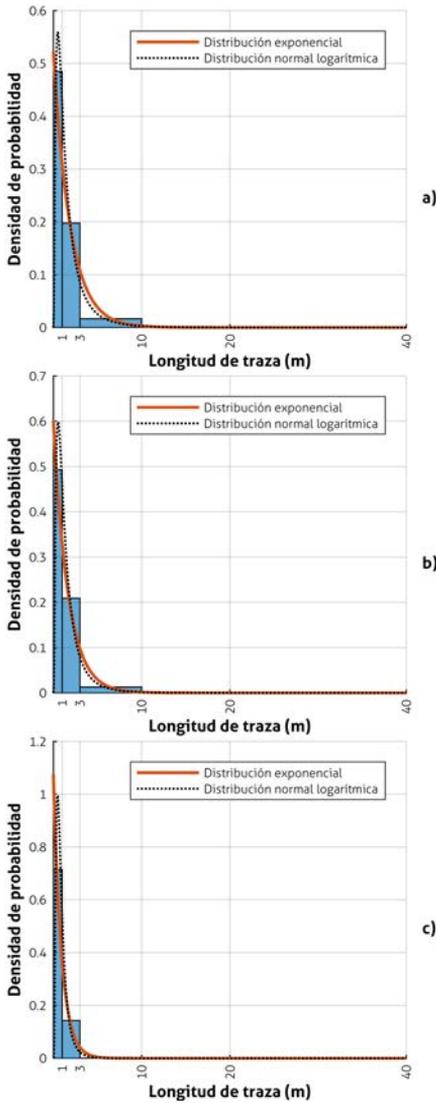


Figura 8: Histograma normalizado y distribuciones de probabilidad ajustadas por familia de discontinuidad (a) primera, (b) segunda, (c) tercera. Método convencional

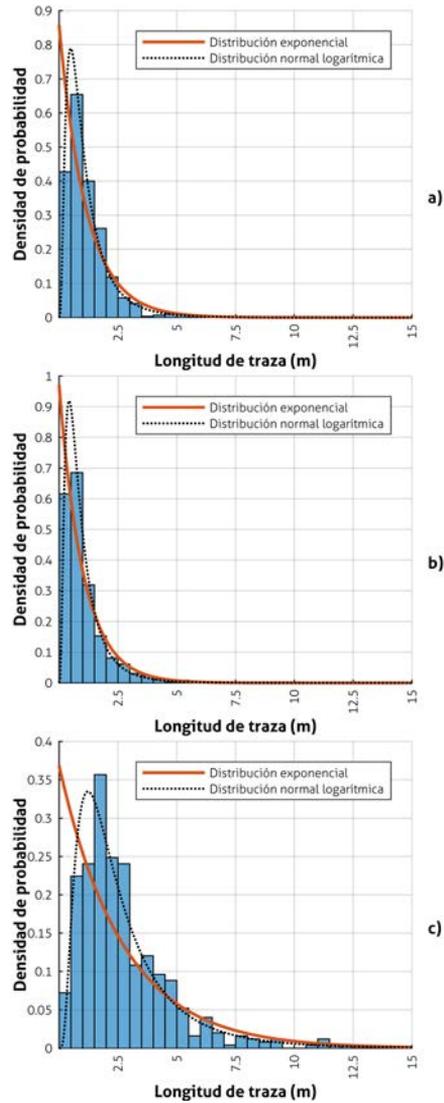


Figura 9: Histograma normalizado y distribuciones de probabilidad ajustadas por familia de discontinuidad (a) primera, (b) segunda, (c) tercera. Método no convencional

Así pues, los resultados de las distribuciones de frecuencia indican la gran incidencia que tiene, no solo el método de medición, sino también la definición de los intervalos para agrupamiento de las longitudes de traza.

5.3 Espaciamiento

En las tablas 5 y 6 se presentan los parámetros estadísticos de los datos de separación obtenidos convencional y no convencionalmente, agrupados en familias de discontinuidad. Así mismo, se indican los parámetros de la distribución de probabilidad exponencial.

Tabla 5: Parámetros estadísticos y de probabilidad del espaciamiento aparente. Método convencional

| | Familia 1 | Familia 2 | Familia 3 |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Número de mediciones | 205 | 200 | 3 |
| Valor medio (m) | 0.26 | 0.32 | 0.58 |
| Desviación estándar (m) | 0.33 | 0.35 | 0.65 |
| <i>Distribución exponencial</i> | | | |
| λ (1/m) | 3.77 | 3.13 | 1.73 |

Tabla 6: Parámetros estadísticos y de probabilidad del espaciamiento real. Método ShapeMetriX3D

| | Familia 1 | Familia 2 | Familia 3 |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Número de mediciones | 1690 | 2098 | 1550 |
| Valor medio (m) | 1.77 | 1.40 | 1.28 |
| Desviación estándar (m) | 2.63 | 2.13 | 1.75 |
| <i>Distribución exponencial</i> | | | |
| λ (1/m) | 0.57 | 0.71 | 0.78 |

Nuevamente, las diferencias en la cantidad de información recopilada sobre el espaciamiento de las discontinuidades por los dos métodos evaluados son bastante significativas: mientras con cinta se reportan 408 mediciones, con el sistema ShapeMetriX3D se recopilan 5338 registros, lo cual supone 13 veces más datos para análisis. La composición de la información estructural también posee discrepancias importantes. En tanto los datos obtenidos de las imágenes 3D se reparten uniformemente por familia de

discontinuidad, menos del 1% (3 registros) adquiridos por metodologías convencionales corresponde a la tercera familia de discontinuidad, lo cual no es representativo desde el punto de vista estadístico. De nuevo, la baja cantidad de información puede ser producto del proceso convencional de muestro, la inaccesibilidad de algunos elementos estructurales o del eventual criterio experto.

Es importante mencionar que las magnitudes obtenidas por metodologías convencionales indican espaciamientos aparentes en dirección vertical y, el sistema ShapeMetriX3D reporta espaciamiento real en dirección normal a la orientación de la discontinuidad, luego no son directamente comparables para el caso de estudio. Si bien el espaciamiento aparente es igual o mayor al real, los menores valores reportados con cinta pueden tener origen en los sectores de observación seleccionados a criterio del experto para medición. Cabe recordar que el área de medición sobre la imagen tridimensional es considerablemente mayor a la abarcada con cinta.

En las Figuras 10 y 11 se presenta la distribución de frecuencias de los datos de espaciamiento, obtenidos por metodologías convencionales y por el sistema ShapeMetriX3D, respectivamente. Así mismo, se incluyen las distribuciones de probabilidad exponencial ajustadas a la información estructural adquirida para cada familia.

Los intervalos de agrupamiento seleccionados también varían según el criterio de cada grupo de expertos. Para la medición con imágenes 3D se establecieron intervalos que incrementan cada 0.5 m. En la medición con cinta se establecieron cuatro intervalos: el primero, para discontinuidades con espaciamiento menor a 0.06 m, el segundo de 0.06 a 0.2 m, el tercero de 0.2 a 0.6 m y el último de 0.6 a 2 m.

La distribución de frecuencias de los datos obtenidos por ambos métodos de medición muestra que el espaciamiento más probable en todas las familias de discontinuidades es menor de 0.5 m. Aunque el levantamiento con cinta no reporta valores mayores a 2 m, en campo se observaron espaciamientos de tal magnitud en las tres familias, según se evidencia en las imágenes incluidas en el numeral 4.

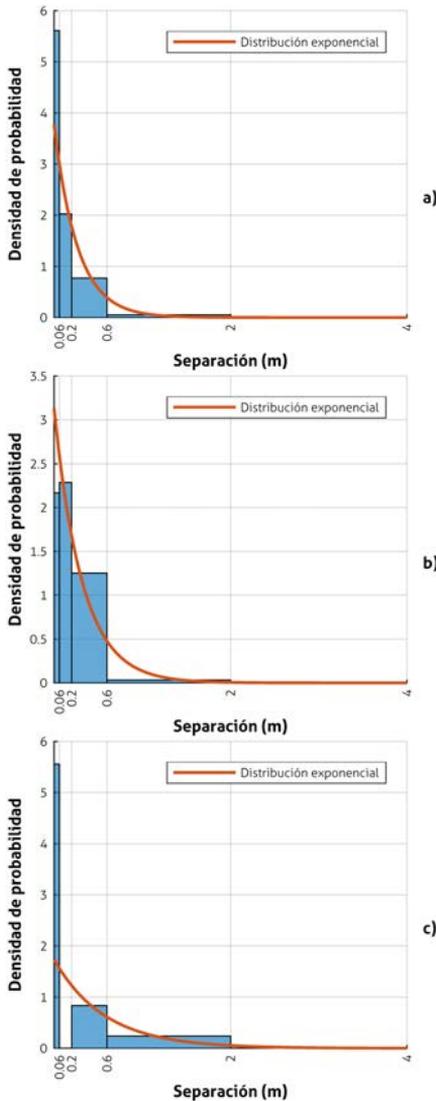


Figura 10: Histograma normalizado y distribución de probabilidad ajustada en la primera (a), segunda (b) y tercera (c) familia de discontinuidad - Método convencional

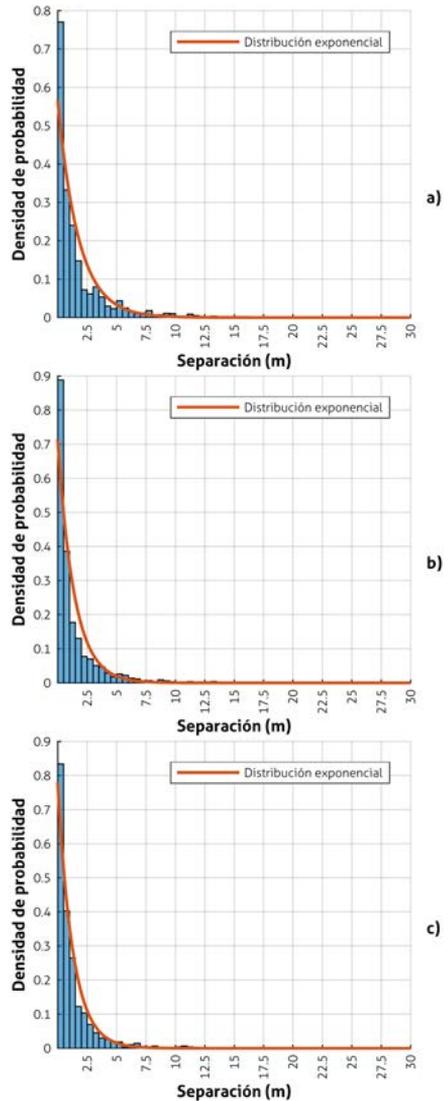


Figura 11: Histograma normalizado y distribución de probabilidad ajustada en la primera (a), segunda (b) y tercera (c) familia de discontinuidad. Método no convencional

5.4 Tiempo y rendimiento

En términos generales, la metodología convencional toma alrededor de dos jornadas de 8 horas para recopilar en campo la base de datos reportada en este estudio, con la participación de dos geólogos expertos. En cuanto al trabajo de oficina, puede requerir dos jornadas adicionales de 8 horas para la digitalización de los datos, su procesamiento en software especializado y obtención de la caracterización estructural.

Por su parte, la toma de pares fotográficos del macizo rocoso en campo toma alrededor de tres horas, considerando todo el proceso descrito en el numeral 4.2.1.

En estos términos, puede decirse que el sistema de toma de imágenes reduce alrededor de 8 % el tiempo requerido para la toma de información en campo, para casos similares al de estudio; esto aumenta significativamente el rendimiento y, lo más importante, reduce la exposición y por ende la vulnerabilidad del personal profesional encargado de estas labores.

6 Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo, se aplica una herramienta basada en la toma e interpretación de imágenes tridimensionales a un caso de estudio conformado por un macizo rocoso de un talud minero. El sistema empleado ha permitido la adquisición remota de información estructural, el mapeo geológico y la caracterización digital con fines geotécnicos, de modo satisfactorio y eficiente.

Con el ánimo de comprobar las ventajas del uso de esta técnica no convencional, se compararon los procesos y resultados frente a la medición con brújula y cinta comúnmente usada en nuestro medio. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes derivados de los análisis y resultados obtenidos.

Una de las principales ventajas del sistema de análisis de imágenes 3D es el aumento significativo del rendimiento en la toma de datos en campo, lo cual redundará en algo aún más importante, que es la reducción del tiempo de exposición del personal profesional y por ende de su vulnerabilidad ante cualquier amenaza de inestabilidad.

Otra diferencia significativa entre los dos métodos está relacionada con el área de medición, pues las imágenes tridimensionales permiten cubrir como mínimo tres veces más superficie sobre el talud que el área realmente observada con brújula y cinta. Este hecho está directamente relacionado con la cantidad de datos que se pueden recopilar: sobre la imagen se pueden determinar las propiedades geométricas de todos los elementos estructurales en cualquier región del talud, sin la necesidad de realizar un proceso de muestreo como sucede con la medición directa. Esto garantiza una mayor objetividad en los datos y un bajo error de muestreo. Es así como se registran 9058 datos a partir de las imágenes 3D: 1910 registros de orientación, 1810 de persistencia y 5338 de espaciamiento, los cuales representan más de 6 veces la base recopilada con brújula y cinta: 1436 datos distribuidos en 563 registros de orientación, 465 de persistencia y 408 de separación.

Si bien, puede parecer que las diferencias en los resultados se atribuyen exclusivamente al tamaño del área explorada en cada método, esto no es del todo cierto. Más allá de la cantidad de datos recopilados por los dos métodos, lo más importante a resaltar es la calidad y continuidad de la información técnica que se logra con las imágenes para los análisis y de representatividad en términos estadísticos. Por ejemplo, la inaccesibilidad de varios sectores del talud para medir el espaciamiento o la persistencia, así como la dificultad para colocar la brújula en los planos de discontinuidad para medir su orientación, resultan más relevantes en la baja cantidad de información recopilada por el método convencional, que la misma área de muestreo seleccionada.

En relación con la definición de las familias de discontinuidades presentes, ambos métodos coinciden en la identificación de tres familias: dos sistemas de diaclasas (familias 1 y 2) y uno de estratificación (familia 3). La distribución de datos recopilados de estas familias es sensiblemente diferente entre métodos: la base recopilada a partir de las imágenes 3D tiene proporciones similares para las tres familias, mientras la estratificación apenas logra contar un con 5% de los datos medidos con cinta, lo que hace reduce su representatividad estadística.

Esta limitación del método convencional se atribuye a dificultades en el posicionamiento de la brújula geológica sobre los planos de discontinuidad, a las limitaciones de accesibilidad y de alcance a zonas ubicadas en la parte media alta del talud, al bajo cubrimiento del área muestreada, a

su subjetividad en la selección de las discontinuidades representativas, así como al muestreo preferente de estructuras con cierto buzamiento. Así, la capacidad de determinar la orientación de una discontinuidad con base en su traza en un talud por medio de imágenes tridimensionales resulta especialmente útil en aquellos elementos estructurales cerrados, en los cuales es difícil la medición por medio de la brújula geológica. Los resultados de las distribuciones de frecuencia de la persistencia evidenciaron la incidencia que tiene la definición de los intervalos para agrupamiento de las longitudes de traza. Desde el punto de vista de espaciamiento, el sistema de imágenes 3D arroja información de separación real, mientras que los datos medidos con cinta reportan la separación aparente, lo que no permite comparaciones de manera directa.

Considerando sus ventajas significativas, el sistema de análisis de imágenes tridimensionales representa una herramienta de soporte en la caracterización estructural de macizos rocoso y se recomienda su uso con validación sistemática de los métodos convencionales de brújula y cinta, para considerar el invaluable conocimiento experto. Al quedar digitalizada la imagen tridimensional, quedará disponible permanentemente para realizar las verificaciones que se desee en el momento que se requiera, manejando la escala con el nivel de detalle que se precise. Con los métodos convencionales, cualquier verificación requiere desplazamiento del personal a campo. Si bien, hay una reducción significativa en el tiempo dedicado a la labor de campo, el trabajo de oficina puede llegar a ser similar al del método convencional, debido al preprocesamiento que se requiere en las imágenes para alcanzar la calidad requerida, a la necesidad de validación de los cálculos y a las determinaciones semiautomáticas que se realizan para la caracterización estructural. En la medida en que se logra una mayor apropiación de la tecnología no convencional basada en el análisis de imágenes 3D, de modo que el procesamiento sea cada vez automático, los tiempos dedicados al trabajo de oficina también tenderán a reducirse con impactos positivos sobre rendimiento y por supuesto de la calidad de los datos. Finalmente, con este trabajo se aporta un precedente importante en la aplicación de tecnologías prometedoras para efectuar una caracterización más completa y objetiva de macizos rocosos, con gran potencial de uso en proyectos viales o mineros en el medio colombiano.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por Colciencias y a Gravillera Albania la disponibilidad para la toma de datos en campo en la mina El Pedregal.

Referencias

- [1] S. D. S. D. Priest, *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall, 1993. 45, 46
- [2] G. Baecher and N. A. Lanney, “Trace length biases in joint surveys,” in *In 19th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 1978, pp. 56–65. [Online]. Available: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-78-0080> 46
- [3] S. Priest and J. Hudson, “Discontinuity spacings in rock,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 13, no. 5, pp. 135–148, may 1976. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90818-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90818-4) 46
- [4] S. D. Priest and J. A. Hudson, “Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 18, no. 3, pp. 183–197, jun 1981. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90973-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90973-6) 46
- [5] V. Ewan and G. West, “Reproducibility of joint orientation measurements in rock,” *Transport and Road Research Laboratory (TRRL)*, 1981. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/179882> 46
- [6] A. Gaich, M. Poetsch, and W. Schubert, “Acquisition and assessment of geometric rock mass features by true 3D images,” in *The 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics*. Golden, Colorado: American Rock Mechanics Association, jan 2006. [Online]. Available: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-06-1051> 46
- [7] J. B. Campbell and R. H. Wynne, *Introduction to remote sensing*. Guilford Press, 2011. [Online]. Available: <https://www.guilford.com/books/Introduction-to-Remote-Sensing/Campbell-Wynne/9781609181765/reviews> 47
- [8] Á. N. Bhreasail, O. Pritchard, S. Carluccio, J. Manning, T. Daly, A. Merritt, and J. Codd, “Remote Sensing for Proactive Geotechnical Asset Management on England’s Strategic Road Network,” *Infrastructure Asset Management*, pp. 1–40, jun 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/jinam.17.00025> 47

- [9] F. Cigna, S. Bianchini, and N. Casagli, “How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach,” *Landslides*, vol. 10, no. 3, pp. 267–283, jun 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0335-7> 47
- [10] J. Martinez, F. Buill, and J. Bartoll, “Utilización de técnicas láser escáner y de fotogrametría terrestre para el estudio de desprendimientos de rocas: el caso de la zona de más riesgo del tren cremallera,” *Mapping*, vol. 103, pp. 26–33, 2005. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1211877> 47
- [11] A. Bell, J. McKinley, D. Hughes, M. Hendry, and A. Macciotta, “Spatial and temporal analyses using Terrestrial LiDAR for monitoring of landslides to determine key slope instability thresholds: Examples from Northern Ireland and Canada,” in *6th Canadian GeoHazards Conference* “GeoHazards 6”, 2014, pp. 15–18. 47
- [12] T. G. Carter, A. Begin, P. Dittrich, C. Evans, J. Byron, P. Rico, J. L. Carvalho, N. Solis, R. Gillinder, L. F. Brewster, R. Arthur, D. Williamson, and R. Murdoch, “Innovative use of GIS and drone photogrammetry for cliff stability modelling,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, vol. 171, no. 3, pp. 89–97, sep 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/jmaen.2018.17> 47
- [13] F. Cigna, V. Banks, A. Donald, S. Donohue, C. Graham, D. Hughes, J. McKinley, K. Parker, F. Cigna, V. J. Banks, A. W. Donald, S. Donohue, C. Graham, D. Hughes, J. M. McKinley, and K. Parker, “Mapping Ground Instability in Areas of Geotechnical Infrastructure Using Satellite InSAR and Small UAV Surveying: A Case Study in Northern Ireland,” *Geosciences*, vol. 7, no. 3, p. 51, jul 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/geosciences7030051> 47
- [14] J. Park, M. Bates, Y. S. Jeong, K. M. Kim, and J. Kemeny, “Creating a Digital Outcrop Model by Using Hyper-Spectrometry and Terrestrial LiDAR,” in *50th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association, jun 2016, pp. 26–29. [Online]. Available: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2016-507> 47
- [15] J. Chen, K. Li, K.-J. Chang, G. Sofia, and P. Tarolli, “Open-pit mining geomorphic feature characterisation,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 42, pp. 76–86, oct 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2015.05.001> 47
- [16] R. Salvini, M. Francioni, S. Riccucci, F. Bonciani, and I. Callegari, “Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and

- rock fall runout along the Domodossola–Iselle railway, the Italian Alps,” *Geomorphology*, vol. 185, pp. 110–122, mar 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2012.12.020> 47
- [17] A. Riquelme, M. Cano, R. Tomás, and A. Abellán, “Identification of rock slope discontinuity sets from laser scanner and photogrammetric point clouds: A comparative analysis,” in *Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2017.*, Ostrava-Poruba, Czech Republic, 2017, pp. 838–845. [Online]. Available: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/67538> 47
- [18] G. Firpo, R. Salvini, M. Francioni, and P. Ranjith, “Use of Digital Terrestrial Photogrammetry in rocky slope stability analysis by Distinct Elements Numerical Methods,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 48, no. 7, pp. 1045–1054, oct 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2011.07.007> 47
- [19] H. Zhu, X. Li, and X. Zhuang, “Recent advances of digitization in rock mechanics and rock engineering,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 220–233, sep 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2011.00220> 47
- [20] V. Bonilla-Sierra, L. Scholtès, F. V. Donzé, and M. K. Elmoultie, “Rock slope stability analysis using photogrammetric data and DFN–DEM modelling,” *Acta Geotechnica*, vol. 10, no. 4, pp. 497–511, aug 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0374-z> 47
- [21] V. Bonilla-Sierra, M. Elmoultie, F.-V. Donzé, and L. Scholtès, “Composite wedge failure using photogrammetric measurements and DFN-DEM modelling,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 41–53, feb 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2016.08.005> 47
- [22] D. Tannant, “Review of Photogrammetry-Based Techniques for Characterization and Hazard Assessment of Rock Faces,” *International journal of geohazards and environment*, vol. 1, no. 2, pp. 76–87, jul 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15273/ijge.2015.02.009> 47
- [23] W. Gates and W. Haneberg, “Comparison of Standard Structural Mapping Results to 3-D Photogrammetric Model Results: Boundary Transformer Banks Rockfall Mitigation Project, Metaline Falls, Washington,” in *46th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association, jan 2012, pp. 24–27. [Online]. Available: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2012-368> 47

- [24] H. D. Preuss, “Numerisch-photogrammetrische Kluftmessung.” Springer, Vienna, 1974, pp. 5–15. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8372-4_3 47
- [25] T. Hagan, “A case for terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 17, no. 4, pp. 191–198, aug 1980. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(80\)91085-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)91085-2) 47
- [26] C. Tsoutrelis, G. Exadaktylos, and A. Kapenis, “Study of the rock mass discontinuity system using photoanalysis,” *Mechanics of jointed and faulted rock*, pp. 103–112, 1990. 47
- [27] D. H. Kim, G. Poropat, I. Gratchev, and A. Balasubramaniam, “Assessment of the Accuracy of Close Distance Photogrammetric JRC Data,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49, no. 11, pp. 4285–4301, nov 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1042-9> 48
- [28] S. J. Chen, W. C. Zhu, Q. L. Yu, and X. G. Liu, “Characterization of Anisotropy of Joint Surface Roughness and Aperture by Variogram Approach Based on Digital Image Processing Technique,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49, no. 3, pp. 855–876, mar 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0795-x> 48
- [29] J. Zhao, L. Yin, and W. Guo, “Stress-Seepage Coupling of Cataclastic Rock Masses Based on Digital Image Technologies,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 51, no. 8, pp. 2355–2372, aug 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1519-9> 48
- [30] A. Gaich, A. Fasching, and W. Schubert, “Determining Structural Rock Mass Parameters Using a Computer Vision System,” *Felsbau*, vol. 21, no. 2, pp. 46–50, 2003. 48
- [31] A. Riquelme, R. Tomás, M. Cano, J. L. Pastor, and A. Abellán, “Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 51, no. 10, pp. 3005–3028, oct 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1519-9> 48
- [32] I. F. Arango Vélez, M. en Ingeniería, and I. F. A. V. (ismaran-gov@hotmail.com), “Desprendimiento de rocas en laderas: una guía para la evaluación del riesgo en vías,” 2014. [Online]. Available: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/4491> 48
- [33] F. W. Vollmer, “Orient 3.7.1 Spherical Projection and Orientation Data Analysis Software User Manual.” 50

- [34] G. GmbH, “ShapeMetrix3D Manual,” Graz, Austria, Tech. Rep., 2010. 51, 53, 55