



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**EVALUACIÓN PRELIMINAR DE POTENCIAL DE ROCA ORNAMENTAL
DEL PLUTÓN CABEZA DE VACA (REGIÓN DE ATACAMA, CHILE) A
PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FRACTURACIÓN
OBTENIDOS MEDIANTE DATOS FOTOGRAFÍAS**

Edwards Enrique Vega Espinoza

Copiapó, Chile 2025



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**EVALUACIÓN PRELIMINAR DE POTENCIAL DE ROCA ORNAMENTAL
DEL PLUTÓN CABEZA DE VACA (REGIÓN DE ATACAMA, CHILE) A
PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FRACTURACIÓN
OBTENIDOS MEDIANTE DATOS FOTOGRAMÉTRICOS**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Geólogo

Profesor Guía: Mg. Francisco Tapia

Edwards Enrique Vega Espinoza

Copiapó, Chile 2025

Dedicatoria

A mi familia y a Dios.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que creyeron en mí desde el primer día, en especial a mis padres, hermanos, tíos y abuelos, quienes me acompañaron en este largo proceso. Quiero agradecer a mi compañera de vida Paula ya que, sin ella no sería quien soy ahora. No puedo olvidar a mis amigos, en especial a Kazhyr's y Sebastián, quienes me han aconsejado y acompañado en esta linda etapa. Finalmente, quiero agradecer a Dios por la oportunidad que me dio de poder estar aquí y en este momento tan especial.

Resumen

La región de Atacama posee un alto potencial económico en recursos de roca ornamental, pero sus cuerpos graníticos han sido poco caracterizados desde el punto de vista estructural y geomecánico. En este trabajo se evaluó el plutón Cabeza de Vaca mediante vuelos fotogramétricos con drones, reconstrucción de modelos 3D por Structure from Motion y análisis automatizado de discontinuidades con el software Discontinuity Set Extractor (DSE), cuantificando parámetros como la orientación, el espaciamiento medio, la frecuencia lineal de fracturas (JF), la densidad volumétrica (J_v) y el índice de calidad de la roca (RQD) conforme a la metodología de Muñoz de la Nava *et al.* (1989) y aplicando la relación de Priest & Hudson (1981) para el RQD. Se estudiaron cuatro sectores con resultados contrastantes: el sector 1 presentó el mayor grado de fracturamiento ($J_v \approx 12,34$ fracturas/m³; RQD ≈ 29 %), indicando un macizo de calidad muy pobre y bloques muy pequeños; los sectores 2 y 4 mostraron fracturación moderada ($J_v \approx 6,6$ fracturas/m³; RQD ≈ 52 %), lo que sugiere la posibilidad de extraer bloques de tamaño medio y un potencial ornamental moderado; el sector 3 registró valores intermedios ($J_v \approx 9,2$ fracturas/m³; RQD ≈ 40 %), con un potencial limitado pero superior al del sector 1. En todos los casos se observó la presencia de al menos un set de discontinuidades subhorizontal o de inclinación moderada, acompañado de varias familias subverticales o verticales; esta combinación de familias controla la geometría de los bloques, generando prismas estrechos en los sectores más fracturados y volúmenes mayores en los sectores moderados. La integración de los modelos 3D con el modelo digital de terreno permitió situar georreferenciadamente cada familia de discontinuidades y evaluar su relación con la topografía local. En conjunto, la investigación demuestra la eficacia y replicabilidad de la fotogrametría UAV y el análisis DSE para caracterizar macizos de difícil acceso, contribuyendo a establecer una base metodológica que puede aplicarse a otros plutones de la región y servir de referencia para elaborar un inventario regional de rocas ornamentales. Se recomienda complementar este enfoque con mediciones directas de persistencia, evaluar factores económicos y ambientales y optimizar los parámetros de vuelo para futuras campañas.

Abstract

The Atacama region has considerable economic potential in ornamental rock resources, yet its granitic bodies have been poorly characterised from a structural and geomechanical perspective. This thesis addresses that gap by evaluating the Cabeza de Vaca pluton using drone-based photogrammetry, Structure from Motion reconstructions, and automated discontinuity analysis with the Discontinuity Set Extractor. Four sectors were surveyed; discontinuity families were identified and quantified in terms of orientation, mean spacing, fracture frequency (JF), volumetric density (Jv) and Rock Quality Designation (RQD) in accordance with Muñoz de la Nava (1989) methodology and the Priest & Hudson *et al.* (1981) relationship for the RQD. Results vary markedly: Sector 1 is intensely fractured (Jv \approx 12.34 fractures/m³; RQD \approx 29 %) and yields only small, non-commercial blocks; sectors 2 and 4 show moderate fracturing (Jv \approx 6.6 fractures/m³; RQD \approx 52 %), suggesting medium-sized blocks and a moderate ornamental potential; sector 3, with intermediate values (Jv \approx 9.2 fractures/m³; RQD \approx 40 %), has a limited but non-negligible potential. In all sectors at least one subhorizontal or moderately dipping set accompanies several subvertical or vertical family, and this combination dictates block geometry: predominantly steep planes in sectors 1 and 3 lead to slender prisms, whereas sectors 2 and 4 allow larger volumes. Integrating the 3D models with a digital terrain model enabled accurate georeferencing of the fracture family and improved spatial interpretation. This study demonstrates that UAV photogrammetry and DSE provide a replicable, high-resolution approach for inaccessible outcrops, laying the groundwork for similar assessments in other plutons and contributing to a regional inventory of ornamental stone resources. Further work should include direct measurements of fracture persistence, economic and environmental analyses, and optimization of flight parameters to refine future surveys.

Índice

1. Marco introductorio	17
1.1. Introducción.....	17
1.2. Planteamiento del problema	17
1.3. Hipótesis	18
1.4. Objetivos	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
1.5. Área de estudio: Ubicación y accesos	18
2. Marco teórico	20
2.1. Fotogrametría	20
2.2. Antecedentes de la fotogrametría	20
2.3. Fotograma.....	21
2.4. Tipos de fotogrametría	22
2.4.1 Fotogrametría analógica.....	22
2.4.2 Fotogrametría analítica.....	22
2.4.3 Fotogrametría digital.....	23
2.4.4 Fotogrametría terrestre	23
2.4.5 Fotogrametría aérea.....	23
2.4.6 Structure from Motion (SfM).....	24
2.4.7 LIDAR	25
2.4.8 Oclusión	26
2.4.9 Georreferenciación.....	27
2.4.10 Registro de imagen.....	28
2.4.11 Resolución de terreno.....	29

2.4.12	Yacimientos ornamentales	30
2.4.13	Rocas ornamentales.....	31
2.4.14	Rocas ornamentales en Chile	31
2.4.15	Geomecánica	33
2.4.16	Mapeo geotécnico	34
2.4.17	Conceptos claves.....	35
2.4.17.2	Frecuencia de fractura	36
2.4.17.3	Número de familias de diaclasa.....	37
2.4.17.4	Espaciamiento	38
3.	Marco geológico regional	40
3.1.	Geología regional de la Precordillera.....	40
3.2.	Geología local.....	44
3.2.1	Los Loros	44
4.	Metodología	49
4.1.	Trabajos previos	50
4.1.1	Recopilación de la información	50
4.1.2	Planificación del trabajo en terreno.....	50
4.1.3	Selección de macizos rocosos en base a su fracturamiento	51
4.2.	Trabajo de terreno	53
4.2.1	Levantamiento de información	54
4.3.	Postproceso de imágenes.....	55
4.3.1	Creación y exportación del modelo 3D en Agisoft Metashape.....	55
4.3.2	Importación, submuestreo y exportación del modelo en Cloud Compare	57
4.3.3	Importación y análisis de la nube de puntos en DSE.....	58
5.	Resultados	66

5.1. Desarrollo de un modelo digital de terreno (MDT) a partir de datos fotogramétricos	66
5.2. Sector 1	66
5.2.1 Clasificación de estructuras sector 1	66
5.3. Sector 2.....	68
5.3.1 Clasificación de estructuras sector 2.....	69
5.4. Sector 3.....	70
5.4.1 Clasificación de estructuras sector 3	71
5.5. Sector 4.....	73
5.5.1 Clasificación de estructuras sector 4	73
5.6. Análisis estructurales para cada sector	76
5.6.1 Sector 1.....	76
5.6.2 Sector 2.....	80
5.6.3 Sector 3.....	84
5.6.4 Sector 4.....	88
5.7. Relación entre densidad volumétrica y RQD estimado.....	91
6. Discusión.....	93
6.1. Metodología y validación de herramientas	93
6.2. Evaluación de parámetros de vuelo.....	93
6.3. Conexión con el MDT	93
6.4. Análisis estructural por sector	94
6.4.1 Sector 1	94
6.4.2 Sector 2.....	94
6.4.3 Sector 3.....	95
6.4.4 Sector 4.....	95

6.5.	Evaluación geomecánica y potencial de canterabilidad	95
6.6.	Comparación con metodologías de referencia	97
6.7.	Replicabilidad de la metodología	97
7.	Conclusiones	99
8.	Recomendaciones.....	101
9.	Referencias	102

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de ubicación zona de estudio.....	19
Figura 2: Obtención del punto principal a partir de las marcas fiduciales (extraído de Fernández et al., 2021).....	22
Figura 3: Esquema del uso de SFM. La proyección del punto Pj perteneciente al espacio 3D sobre la imagen de la cámara en el tiempo y espacio k resulta en el punto 2D llamado Pj,k. Extraído de Zúñiga et al., (2016).....	25
Figura 4: Representación de la oclusión y el sesgo relacionado con la orientación vertical. Cuando la cámara tiene una línea de visión vertical que es paralela a una discontinuidad, puede surgir un sesgo por orientación. Si la línea de visión vertical de la cámara apunta hacia arriba con un ángulo más agudo que la discontinuidad, esto puede provocar oclusión en una zona de sombra. Extraído de Fernández (2016).	27
Figura 5: Montaje para diversos enfoques de registro. Los cuadrados representan posiciones de cámara/escáner y las estrellas puntos de control. Los símbolos o líneas rellenos indican los lugares de medición. Extraído de Sturzenegger y Stead (2009a). ...	29
Figura 6: Planificación de la exploración de campo y factores que se deben tener en cuenta. Modificado de Muñoz de la Nava et al. (1989).	33
Figura 7: Mapa geológico del área de estudio. Modificado de Arévalo et al., (2005).....	42
Figura 8: Mapa de croquis geológico de la zona al este de Copiapó. La imagen muestra la geología generalizada, en rojo se señala el plutón Cabeza de Vaca. Extraído de Taylor et al., (2007).	47
Figura 9: Diagrama de flujo que resume la metodología a utilizar para la determinación de zonas de potencial canterabilidad.....	49
Figura 10: Revisión previa del área de estudio y sus accesos. El polígono verde representa el área de estudio, la línea roja representa la ruta de acceso C-401.	50
Figura 11: Selección de posibles puntos canterables y sus accesos.....	53
Figura 12: Dron modelo Mavic 2 zoom.....	54
Figura 13: Ejemplo de imagen obtenida con dron en el punto P4.	55
Figura 14: Ejemplo del conjunto de imágenes obtenidas con dron, en A se observa el modelo sin las imágenes y en B con las imágenes.....	55
Figura 15: Ejemplo de nube de puntos densa obtenida del punto 1.....	56

Figura 16: Proceso de submuestreo en el software Cloud Compare a 2 cm.	57
Figura 17: Parámetros de submuestreo de la nube de puntos densa en Cloud Compare.	58
Figura 18: Clasificación de familias de estructuras obtenidas con DSE.....	59
Figura 19: Diagrama de polos donde se muestra la clasificación de las 6 familias de estructuras.	59
Figura 20: Preasignación de colores para cada una de las familias de estructuras identificadas.	60
Figura 21: Resultado final de la clasificación de las estructuras del punto 1.	61
Figura 22: Nube de puntos densa en RGB.....	61
Figura 23: Sobreposición de los clústeres ya clasificados y con asignación de colores sobre la nube de puntos RGB.	62
Figura 24: Parámetros para la caracterización automática del espaciamiento para las familias de estructuras.....	62
Figura 25: Gráfico que representa el espaciamiento por la función de densidad de las estructuras persistentes y no persistentes.	63
Figura 26: MDT construido a través de fotogrametría para el sector 1 de estudio. La orientación de la vista del modelo 3D es NW-SE	66
Figura 27: Vista frontal del modelo 3D con la clasificación de las 6 familias de estructuras para el sector 1, se observan los siguientes colores: verde claro(J4), amarillo(J5), rojo(J3), azul(J1), verde oscuro(J2) y anaranjado(J6). La orientación de la vista del modelo 3D es NW-SE	67
Figura 28: Vista frontal derecha del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es NNW-SSE	67
Figura 29: Vista frontal izquierda del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es WNW-ESE	68
Figura 30: MDT construida a través de fotogrametría para el sector 2 de estudio. La orientación de la vista del modelo 3D es SW-NE	68
Figura 31: Vista frontal del modelo 3D con la clasificación de las 3 familias de estructuras para el sector 2, se observan los siguientes colores: verde claro (J1), rojo (J2) y azul (3). La orientación de la vista del modelo 3D es SW-NE	69

Figura 32: Vista frontal derecha del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es WSW-ENE .	69
Figura 33: Vista frontal izquierda del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es SSW-NNE .	70
Figura 34: MDT construido a través de fotogrametría para el sector 3 de estudio. La orientación de la vista del modelo 3D es SE-NW .	70
Figura 35: Vista frontal del modelo 3D con la clasificación de las 4 familias de estructuras para el sector 3, se observan los siguientes colores: verde claro(J4), rojo(J1), azul(J3) y anaranjado(J2). La orientación de la vista del modelo 3D es SE-NW .	71
Figura 36: Vista frontal derecha del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es SSE-NNW .	71
Figura 37: Vista frontal izquierda del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es ESE-WNW .	72
Figura 38: MDT construida a través de fotogrametría para el sector 4 de estudio. La orientación de la vista del modelo 3D es SE-NW .	73
Figura 39: Vista frontal del modelo 3D con la clasificación de las 3 familias de estructuras para el sector 4, se observan los siguientes colores: verde claro(J2), rojo(J3) y azul(J1). La orientación de la vista del modelo 3D es SE-NW .	74
Figura 40: Vista frontal derecha del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es SSE-NNW .	74
Figura 41: Vista frontal izquierda del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es ESE-WNW .	75
Figura 42: Diagrama de polos que contiene todas las estructuras del sector 1 obtenida del software DSE. Se observa a J1 y J2 como las principales familias, mientras que J3, J4, J5 y J6 como estructuras secundarias.	77
Figura 43: Diagrama de polos de las 6 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 1.	77
Figura 44: Diagrama de rosetas de las 6 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 1.	78
Figura 45: Representación gráfica del espaciamiento para las 6 familia de estructuras del sector 1.	79

Figura 46: Diagrama de polos que contiene todas las estructuras del sector 2 obtenida del software DSE. Se observa a J1 como la principal familia, mientras que J2 y J3 como estructuras secundarias.....	81
Figura 47: Diagrama de polos de las 3 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 2.....	81
Figura 48: Diagrama de rosetas de las 3 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 2.....	82
Figura 49: Representación gráfica del espaciamiento para las 3 familia de estructuras del sector 2. La figura muestra las funciones de densidad de espaciamiento obtenidas para cada familia. La curva verde corresponde al espaciamiento calculado con clústeres de full persistencia; la curva azul corresponde al escenario no persistente (NFP). Se observa que las distribuciones son sesgadas a la derecha con modas en valores bajos de espaciamiento.	83
Figura 50: Diagrama de polos que contiene todas las estructuras del sector 3 obtenida del software DSE. Se observa a J1 como la principal familia, mientras que J2, J3 y J4 como estructuras secundarias.....	85
Figura 51: Diagrama de polos de las 4 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 3.....	85
Figura 52: Diagrama de rosetas de las 4 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 3.....	86
Figura 53: Representación gráfica del espaciamiento para las 4 familia de estructuras del sector 3.	87
Figura 54: Diagrama de polos que contiene todas las estructuras del sector 4 obtenida del software DSE. Se observa a J1 como la principal familia, mientras que J2 y J3 como estructuras secundarias.....	89
Figura 55: Diagrama de polos de las 3 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 4.....	89
Figura 56: Diagrama de rosetas de las 3 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 4.....	90
Figura 57: Representación gráfica del espaciamiento para las 3 familia de estructuras del sector 4.	91

Figura 58: Mapa donde se representan la relación del Jv y la canterabilidad.....97

Índice de tablas

Tabla 1: Usos de las rocas ornamentales en Chile. Extraído de Yuraszeck (1999).....	32
Tabla 2: Producción de lapislázuli y mármol de 1995 a 2004 en toneladas. Extraído de Gajardo y Carraco (2006).....	33
Tabla 3: Grupos de diaclasas, modificado de Muñoz de la Nava et al., (1989).....	51
Tabla 4: Intervalos y espaciado de diaclasas, modificado de Muñoz de la Nava et al., (1989).....	52
Tabla 5: Tamaño de los bloques, modificado de Muñoz de la Nava et al., (1989).....	52
Tabla 6: Registro espacial de los puntos preseleccionados.....	53
Tabla 7: Tabla resumen con las características de la cámara del dron Mavic 2 zoom. ...	54
Tabla 8: Parámetros obtenidos para cada uno de los vuelos aerofotogramétricos.....	54
Tabla 9: Información relevante para el procesamiento de la nube de puntos en el software DSE.	57
Tabla 10: Resultados obtenidos para las 6 familias de estructuras para el sector 1.....	76
Tabla 11: Resumen de las principales propiedades geomecánicas de las 6 familias de estructuras del sector 1.....	78
Tabla 12: Resultados obtenidos para las 3 familias de estructuras del sector 2.....	80
Tabla 13: Resumen de las principales propiedades geomecánicas de las 3 familias de estructuras del sector 2.....	82
Tabla 14: Resultados obtenidos para las 4 familias de estructuras para el sector 3.....	84
Tabla 15: Resumen de las principales propiedades geomecánicas de las 4 familias de estructuras del sector 3.....	86
Tabla 16: Resultados obtenidos para las 3 familias de estructuras para el sector 4.....	88
Tabla 17: Resumen de las principales propiedades geomecánicas de las 3 familias de estructuras del sector 4.....	90
Tabla 18: relación entre J_v y RQD para los 4 sectores analizados.	92
Tabla 19: resultados de la evaluación geomecánica y el potencial de canterabilidad para cada sector.....	96

1. Marco introductorio

1.1.Introducción

La caracterización estructural de macizos rocosos mediante técnicas fotogramétricas ha cobrado relevancia en los últimos años, dado su potencial para evaluar parámetros como orientación, espaciamiento, frecuencia de fracturas y RQD en entornos tridimensionales de alta resolución (Sturzenegger & Stead *et al.*, 2009a; Lato *et al.*, 2012). Estas metodologías permiten la identificación de familias de discontinuidades que inciden directamente sobre la calidad geomecánica de la roca, siendo factores críticos en la evaluación del potencial ornamental de unidades plutónicas (Riquelme *et al.*, 2014). En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar preliminarmente el potencial ornamental del plutón Cabeza de Vaca, mediante la integración de datos estructurales derivados de nubes de puntos densas (modelo 3D) obtenidas a través de imágenes con dron y procesadas con softwares especializados. La selección de este enfoque metodológico se fundamenta en su capacidad para representar fielmente la geometría y distribución espacial de las discontinuidades.

1.2.Planteamiento del problema

La escasez de estudios previos sobre el potencial de roca ornamental en el Plutón Cabeza de Vaca se vincula principalmente con las limitaciones logísticas, operativas y de seguridad que dificultan la aplicación de levantamientos geomecánicos convencionales en terreno, especialmente por la presencia de labores mineras abandonadas con accesos restringidos y riesgos para el personal, sumado al tiempo considerable que demanda la recolección sistemática de datos en unidades geológicas extensas y de exposición irregular. Esta situación genera una brecha en la caracterización estructural necesaria para evaluar el potencial de explotación ornamental, lo que plantea la interrogante de si la fotogrametría aérea con drones puede constituir una herramienta válida y eficiente para apoyar al geólogo en este tipo de estudios. Diversas investigaciones, como Riquelme (2015), han demostrado que la generación de modelos digitales de superficie de alta resolución mediante técnicas fotogramétricas permite identificar, medir y clasificar discontinuidades.

1.3.Hipótesis

La utilización de drones y la técnica Structure from Motion (SfM) para generar modelos 3D constituye una herramienta válida y eficiente para la caracterización estructural de yacimientos de roca ornamental, permitiendo identificar discontinuidades y geometrías de los macizos rocosos con alta resolución, optimizando el tiempo, los recursos y la seguridad en terreno respecto a los métodos geomecánicos convencionales.

1.4.Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el potencial para la extracción de roca ornamental del plutón Cabeza de Vaca desarrollando un mapeo geomecánico a través de aerofotogrametría con dron.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Desarrollar un modelo digital de terreno (MDT) a partir de datos fotogramétricos.
- ✓ Determinar la orientación de las estructuras aflorantes en el macizo rocoso del plutón Cabeza de Vaca.
- ✓ Caracterizar las propiedades geomecánicas RQD, frecuencias de fracturas, familias de diaclasas, espaciamiento y orientación de estructuras.
- ✓ Identificar zonas de potencial rocoso en la zona de estudio.

1.5.Área de estudio: Ubicación y accesos

El área de estudio se localiza aproximadamente a 40 km al noreste de la ciudad de Copiapó, específicamente, en la comuna de Tierra Amarilla, en la región de Atacama, Chile, dentro del distrito del plutón Cabeza de Vaca. Geográficamente, el área está delimitada por las siguientes coordenadas en el sistema WGS84: Punto 1 (E399000, N69451500), Punto 2 (E399000, N6947300), Punto 3 (E396000, N6947300) y Punto 4 (E396000, N6945150). Para acceder a este lugar, se debe tomar la ruta 5 norte desde Copiapó, luego la ruta C-35 que atraviesa la comuna de Tierra Amarilla, para finalmente dirigirse por la ruta C-401 que conecta con el área de estudio (figura 1).

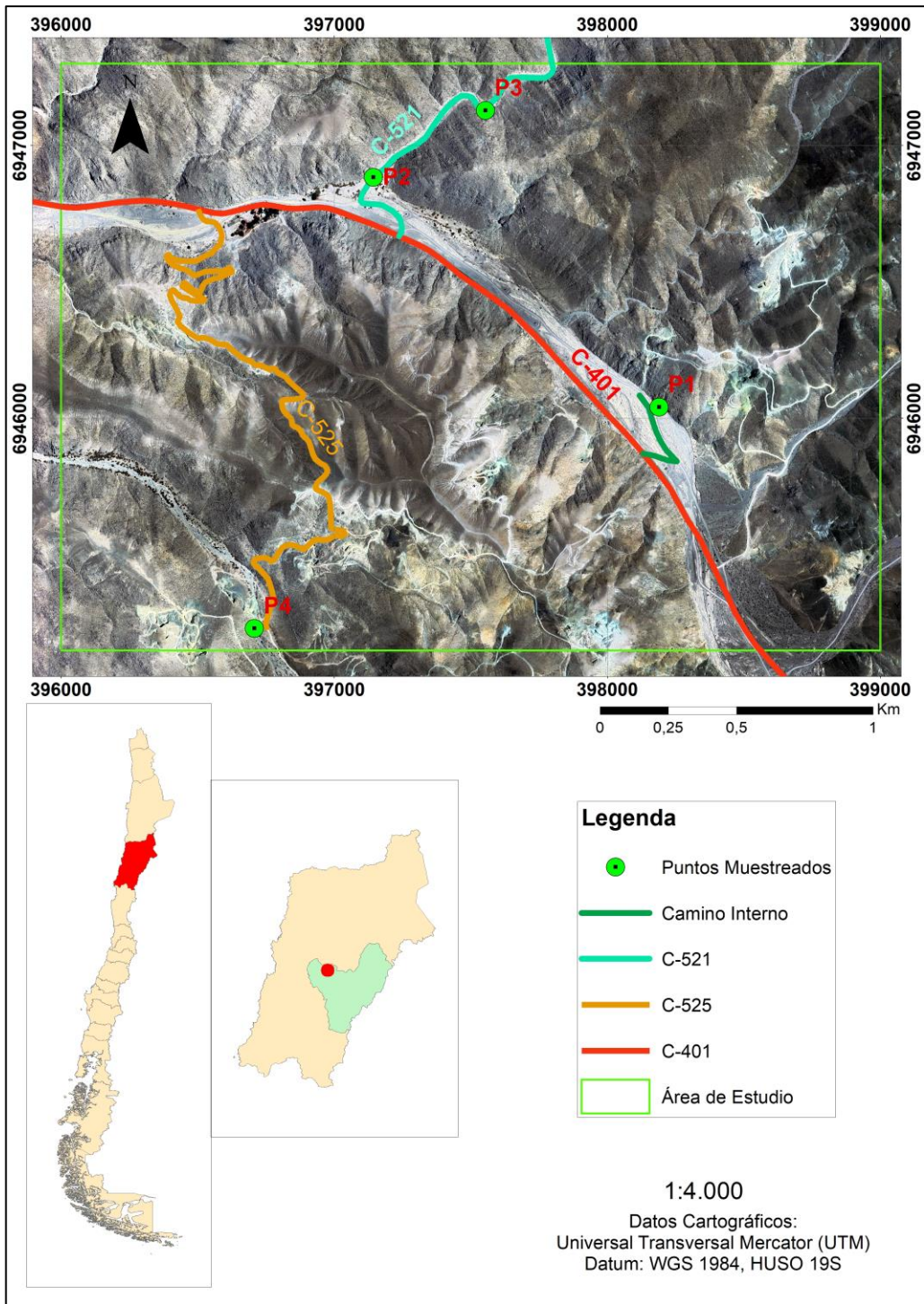


Figura 1: Mapa de ubicación zona de estudio.

2. Marco teórico

El presente capítulo sienta las bases fundamentales para comprender el uso de la fotogrametría en la determinación de parámetros de fracturación en el contexto de esta tesis. Exploraremos las teorías y conceptos clave relacionados con la fotogrametría y su aplicación en la caracterización geomecánica de macizos rocosos. Este marco teórico servirá como cimiento para abordar de manera sólida y efectiva la metodología propuesta en el estudio, que busca ofrecer nuevas perspectivas en la evaluación de yacimientos de rocas ornamentales.

2.1. Fotogrametría

La palabra "fotogrametría" tiene una etimología que proviene del griego y se compone de varias partes. En griego, "phos" (φῶς) significa "luz," "gramma" (γράμμα) significa "escritura" o "dibujo," y "metron" (μέτρον) significa "medida" o "medición." La combinación de estas partes da lugar al término "fotogrametría," que puede interpretarse como la "medición o registro mediante la luz y la escritura" (Coelho y Brito *et al.*, 2009). Según Bonneval *et al.*, (1972) la fotogrametría, es una técnica cuyo objetivo es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera mediante el uso de una o varias fotografías. Por su parte Wolf *et al.*, (2000) define a la fotogrametría como una ciencia y tecnología que se ocupa de la obtención, procesamiento, análisis e interpretación de imágenes fotográficas para obtener información métrica y generar modelos digitales.

2.2. Antecedentes de la fotogrametría

Los fundamentos de la fotogrametría tienen sus raíces en tiempos antiguos ya que, tanto los griegos como los romanos empleaban cámaras oscuras para capturar imágenes de objetos distantes (Wolf *et al.*, 2000). Sin embargo, no fue hasta el siglo XIX que la fotogrametría se consolidó como una disciplina científica, gracias a las contribuciones de destacados científicos franceses como Joseph Nicéphore Niépce, Jacques Mandé Daguerre y Aimé Laussedat (Coelho y Brito *et al.*, 2009; Duelis *et al.*, 2015). En 1858, el ingeniero alemán Albrecht Meydenbauer acuñó el término "fotogrametría" para describir

el proceso de obtener información métrica a partir de fotografías (Albertz *et al.*, 2002). Meydenbauer desarrolló un método para calcular distancias entre puntos en una fotografía, lo que posibilitó la creación de modelos topográficos altamente precisos.

2.3.Fotograma

Un fotograma es un término utilizado en el ámbito de la fotografía y la cinematografía para referirse a una imagen individual capturada en una secuencia de imágenes en movimiento. Cada fotograma es una representación estática de un momento específico en el tiempo que, cuando se reproduce de manera continua a alta velocidad, crea la ilusión de movimiento. En Horenstein *et al.*, (2011), se describe un fotograma como "una imagen individual tomada en una secuencia de imágenes capturadas mediante una cámara de cine o una cámara digital. Cuando se reproducen en sucesión rápida, estos fotogramas generan la ilusión de movimiento en el cine o el video."

En este estudio, se utiliza el concepto de "fotograma" en referencia a una vista aérea del terreno obtenida a partir de una fotografía capturada desde una aeronave o dron. En este proceso, las aeronaves están equipadas con una cámara especial ubicada en su parte inferior, que se encarga de adquirir los fotogramas. Estos fotogramas, además de capturar una porción específica del terreno, incluyen en sus márgenes una serie de datos importantes, como la distancia focal, la altitud de vuelo, la hora de la captura, el número de identificación de la fotografía, entre otros (Santamaría Peña y Sanz Méndez *et al.*, 2011 citado en Fernández *et al.*, 2021).

Se requieren dos condiciones esenciales para el fotograma. La primera implica conocer la distancia focal con una precisión de centésimas de milímetro. La segunda condición involucra la proyección de la distancia focal en el fotograma, que se denomina "Punto Principal". Este punto se determina mediante la intersección de las diagonales del fotograma. La figura 2 ilustra el método de obtención del punto principal (Fernández *et al.*, 2021).

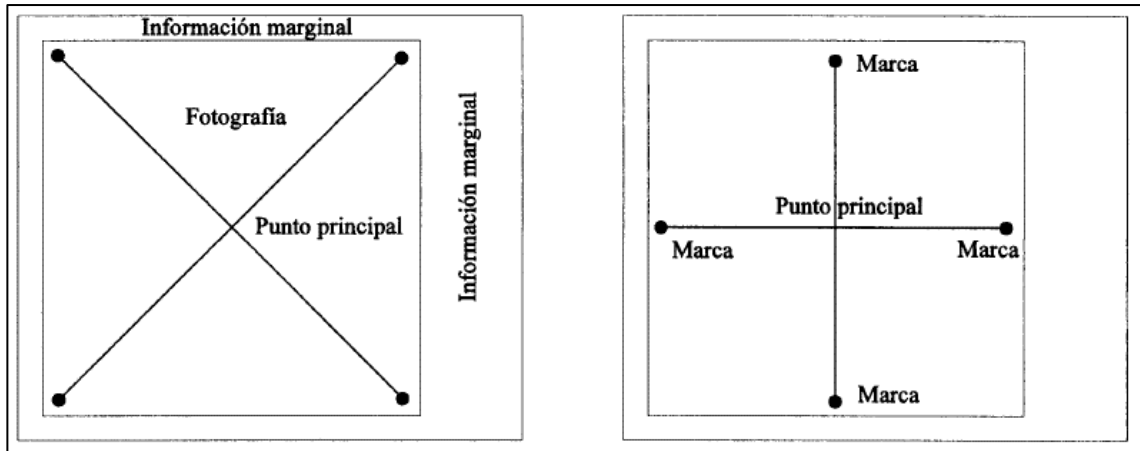


Figura 2: Obtención del punto principal a partir de las marcas fiduciales (extraído de Fernández et al., 2021).

2.4. Tipos de fotogrametría

Dependiendo a la instrumentación utilizada o en función de la distancia al objeto, la fotogrametría puede ser clasificada como:

2.4.1 Fotogrametría analógica

La fotogrametría analógica es una técnica fotogramétrica que se basa en el uso de fotografías analógicas o imágenes impresas en película fotográfica para medir y reconstruir objetos y terrenos tridimensionales (Thompson *et al.*, 1966). En contraste con la fotogrametría digital, que utiliza imágenes digitales, la fotogrametría analógica se desarrolló en la era de la fotografía convencional y se basa en principios ópticos y geométricos para realizar mediciones precisas (Thompson *et al.*, 2016; Coelho y Brito *et al.*, 2009).

2.4.2 Fotogrametría analítica

La fotogrametría analítica es un enfoque avanzado de la fotogrametría que se centra en la medición precisa y la reconstrucción tridimensional de objetos y terrenos a partir de imágenes fotográficas, utilizando métodos y técnicas analíticas y matemáticas (Doyle *et al.*, 1964). A diferencia de la fotogrametría analógica, que se basa en fotografías convencionales, la fotogrametría analítica utiliza imágenes digitales y sistemas informáticos avanzados para realizar mediciones y análisis (Chandler y Moore *et al.*, 1989).

2.4.3 Fotogrametría digital

La fotogrametría digital es una disciplina altamente especializada dentro del campo de la fotogrametría que se enfoca en la adquisición, procesamiento y análisis de datos tridimensionales a partir de imágenes digitales (Egels y Kasser *et al.*, 2001; Linder *et al.*, 2009). Utiliza técnicas y algoritmos avanzados para medir con precisión la geometría y la topografía de objetos y terrenos a partir de conjuntos de imágenes digitales, eliminando la necesidad de fotografía analógica y métodos manuales. Esta tecnología ha revolucionado diversas industrias, incluyendo la cartografía, la ingeniería civil, la arquitectura, la arqueología y la geomática, al proporcionar una capacidad sin precedentes para generar modelos tridimensionales precisos y detallados del entorno físico (Linder *et al.*, 2013).

2.4.4 Fotogrametría terrestre

La fotogrametría terrestre es una rama especializada de la fotogrametría que se centra en la captura de datos geométricos y topográficos precisos de objetos y terrenos desde una posición fija en tierra utilizando cámaras fotográficas (Bitelli *et al.*, 2004). Esta técnica implica la toma de fotografías desde diferentes ubicaciones y ángulos, lo que permite la creación de modelos tridimensionales y la medición de dimensiones y coordenadas de puntos de interés (Mihkail *et al.*, 2001). La fotogrametría terrestre se utiliza en una variedad de aplicaciones, como la cartografía, la inspección de estructuras, la documentación de patrimonio cultural y la ingeniería civil, donde se requiere alta precisión en la adquisición de datos geoespaciales.

Según Fernández *et al.*, (2021), la incorporación de nuevas tecnologías y la reducción en los costos asociados al escáner laser, ha generado que la fotogrametría terrestre haya sido sustituida por métodos que dan mejor respuesta a:

- Necesidad de efectuar levantamiento en corto tiempo y en gran extensión de área.
- Levantamiento en sectores con relieve muy escarpado o de difícil acceso.
- Condiciones de Inestabilidad del terreno.

2.4.5 Fotogrametría aérea

La fotogrametría aérea es una disciplina especializada de la fotogrametría que se enfoca en la adquisición de datos topográficos y geométricos utilizando cámaras fotográficas

montadas en aeronaves en vuelo. Esta técnica permite la captura de imágenes de grandes áreas de la superficie terrestre desde una perspectiva elevada, lo que facilita la generación de modelos tridimensionales y la medición precisa de dimensiones y coordenadas de objetos y terrenos. La fotogrametría aérea ha experimentado un crecimiento significativo en términos de extensión y desarrollo, impulsado en gran medida por los avances tecnológicos en aeronaves no tripuladas, conocidas como UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*, en inglés), en los últimos años. Estos avances han posibilitado una mayor precisión en la fotogrametría, especialmente debido a la capacidad de obtener resoluciones de píxeles de menos de 1 cm (Fernández *et al.*, 2021).

La fotogrametría aérea se utiliza ampliamente en aplicaciones como la cartografía, la planificación urbana, la gestión de recursos naturales, la monitorización ambiental y la agricultura de precisión, donde la capacidad de obtener datos geospaciales de alta resolución a gran escala es esencial.

2.4.6 Structure from Motion (SfM)

Structure from Motion (SfM por sus siglas en inglés), es una técnica de fotogrametría que se utiliza para crear modelos tridimensionales de objetos, terrenos o estructuras a partir de secuencias de imágenes o fotografías tomadas desde diferentes posiciones o ángulos (figura 3) (Snavely *et al.*, 2008).

SfM aprovecha el movimiento relativo de una cámara o sensor (como una cámara montada en un vehículo o un dron) para calcular la posición y la orientación de la cámara en cada imagen individual (James y Robson *et al.*, 2014). Luego, utiliza la información de las múltiples imágenes para reconstruir la estructura tridimensional del objeto o la escena que se está fotografiando.

Esta técnica se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, como la cartografía, la arqueología, la inspección de edificios, la geomática y la topografía, entre otras (Zúñiga *et al.*, 2016). La SfM es especialmente útil cuando se requiere obtener modelos 3D detallados de áreas extensas o cuando no es posible utilizar métodos de escaneo láser u otras técnicas costosas (Förstner *et al.*, 1993). También es una técnica importante en la fotogrametría moderna y en la reconstrucción de modelos tridimensionales a partir de imágenes digitales.

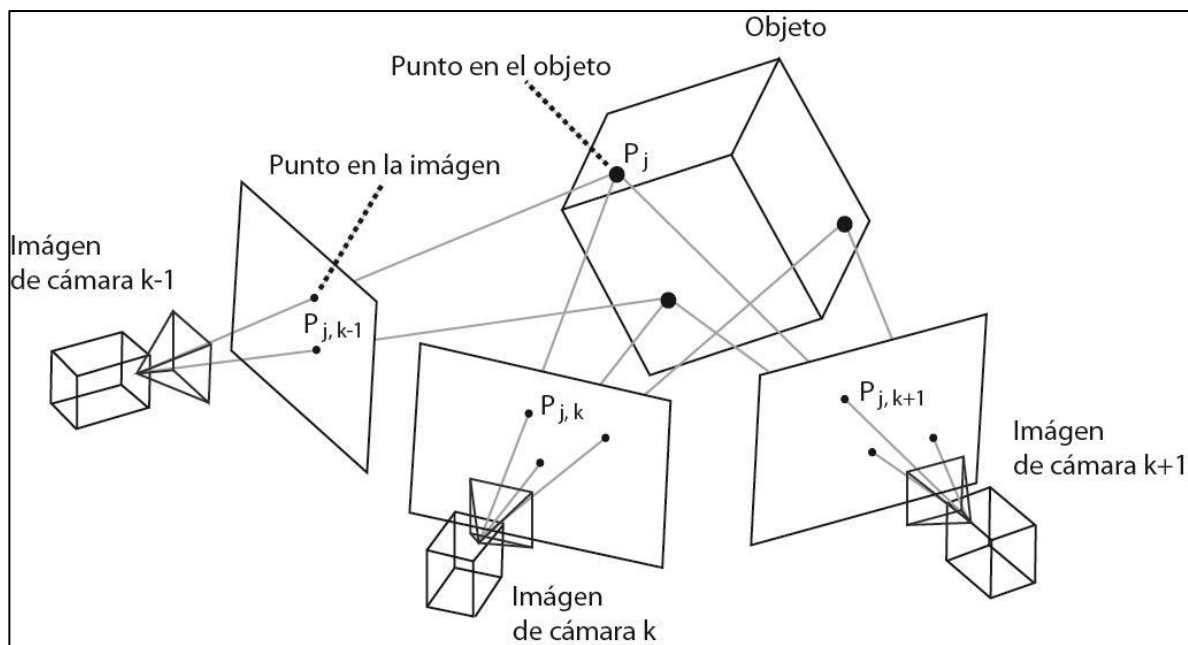


Figura 3: Esquema del uso de SFM. La proyección del punto P_j perteneciente al espacio 3D sobre la imagen de la cámara en el tiempo y espacio k resulta en el punto 2D llamado $P_{j,k}$. Extraído de Zúñiga et al., (2016).

2.4.7 LIDAR

El LIDAR (*Light detection and ranging*, detección por luz y distancia) es una tecnología avanzada de teledetección que utiliza pulsos láser para medir distancias precisas entre el sensor y los objetos en la superficie terrestre (Razak *et al.*, 2011). Esta tecnología proporciona datos tridimensionales altamente detallados y precisos, lo que permite la creación de modelos digitales del terreno, la detección de objetos, la caracterización de la vegetación y la evaluación de cambios en el entorno geoespacial (Toth y Józskó *et al.*, 2016). El LIDAR se ha convertido en una herramienta esencial en diversas disciplinas, como la cartografía, la topografía, la gestión de recursos naturales, la planificación urbana y la investigación geológica y ambiental (Vosselman y Maas *et al.*, 2010).

La tecnología LIDAR ha emergido como una herramienta transformadora en el campo de la geología, proporcionando una capacidad sin precedentes para adquirir datos topográficos tridimensionales precisos y detallados a lo largo de extensas áreas geográficas. Su aplicación en la geología ha abierto nuevas puertas para la caracterización de terrenos, el estudio de peligros geológicos, la identificación de fallas y estructuras geológicas, y la investigación de procesos geomorfológicos.

Una de las aplicaciones clave del LIDAR en geología es la generación de Modelos de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) de alta resolución que permiten a los geólogos analizar y comprender mejor la topografía de una región específica. Un caso de estudio ilustrativo es el trabajo de Rosser *et al.*, (2005), donde se utilizó LIDAR para mapear fallas activas y deslizamientos de tierra en el área de la cordillera de San Gabriel, California. Los datos LIDAR proporcionaron una representación precisa de las deformaciones del terreno, lo que permitió una evaluación más completa de los riesgos geológicos.

Además, LIDAR ha demostrado ser eficaz en la detección y caracterización de características geológicas ocultas bajo la vegetación densa. Un ejemplo es el estudio de Taylor *et al.*, (2015), que utilizó datos LIDAR para revelar características geológicas previamente desconocidas en áreas de selva tropical en Guatemala. La capacidad del LIDAR para penetrar la cubierta vegetal facilitó el descubrimiento de estructuras arqueológicas y geológicas enterradas.

2.4.8 Oclusión

La oclusión en fotogrametría se refiere a la situación en la cual un objeto o parte de un objeto no es visible en una imagen debido a la interferencia de otros elementos en primer plano. Este fenómeno puede obstaculizar la generación de modelos precisos y completos, ya que las áreas ocluidas no se capturan adecuadamente y pueden resultar en datos faltantes o imprecisos (Kynas y Gaboutchian *et al.*, 2016). El fenómeno de oclusión adquiere una gran relevancia en el contexto de la geología cuando una de las caras de la pared de roca a modelar queda parcial o totalmente fuera del campo visual debido a la interferencia de otros objetos circundantes. En este contexto geológico, resulta imposible obtener fotografías completas de dicha cara desde una ubicación alternativa (Sturzenegger y Stead *et al.*, 2009a). Es esencial subrayar la importancia de minimizar este efecto a través de la captura del afloramiento desde diversas perspectivas, particularmente cuando se enfrentan cambios significativos de orientación en el afloramiento geológico (Sturzenegger y Stead *et al.*, 2009b). La figura 4 ilustra como el fenómeno de la oclusión ocurre en una pared de roca.

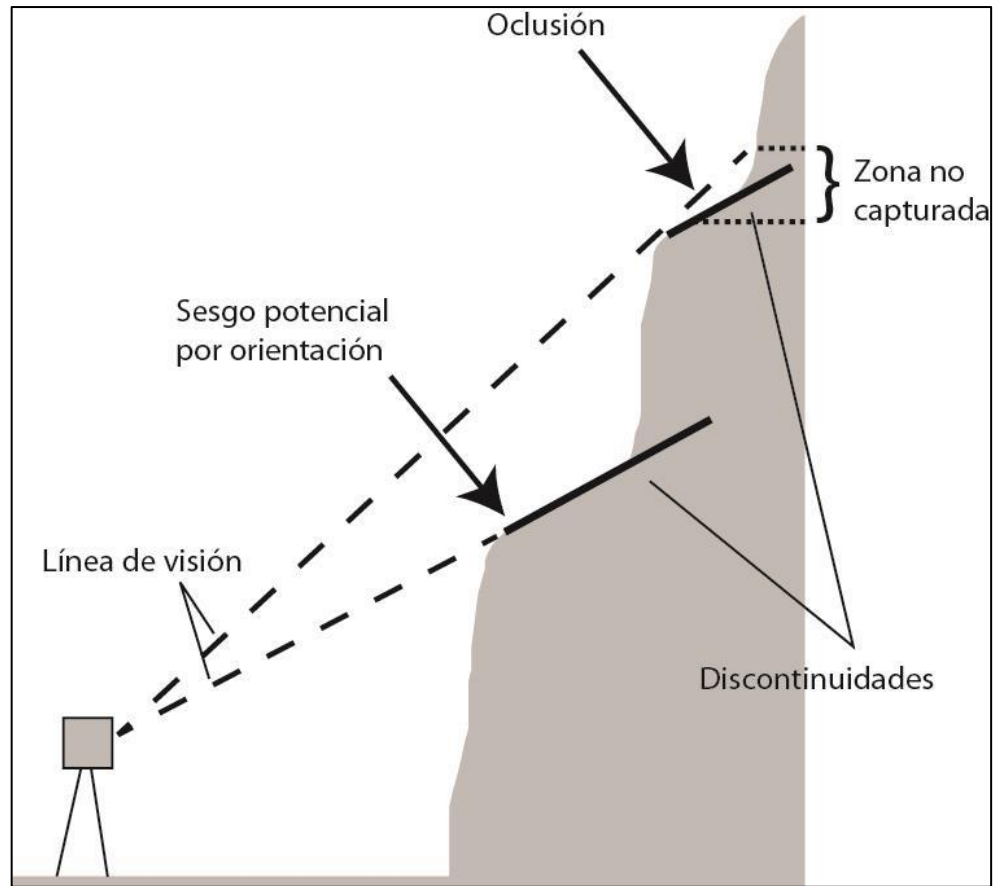


Figura 4: Representación de la oclusión y el sesgo relacionado con la orientación vertical. Cuando la cámara tiene una línea de visión vertical que es paralela a una discontinuidad, puede surgir un sesgo por orientación. Si la línea de visión vertical de la cámara apunta hacia arriba con un ángulo más agudo que la discontinuidad, esto puede provocar oclusión en una zona de sombra. Extraído de Fernández (2016).

2.4.9 Georreferenciación

La georreferenciación es el proceso fundamental de asignar coordenadas geográficas precisas (como latitud, longitud y altitud) a datos, objetos o imágenes para situarlos en un sistema de referencia geoespacial global (Sturzenegger y Stead *et al.*, 2009a). Esto permite la integración de la información en un contexto geoespacial más amplio y facilita la comparación y el análisis de datos georreferenciados en relación con otros datos geoespaciales, como mapas, imágenes satelitales o bases de datos geográficas (Elachi y Van Zyl *et al.*, 2021).

La georreferenciación es especialmente relevante al utilizar la técnica de "Structure from Motion" (SfM). La SfM se basa en imágenes capturadas desde diferentes ubicaciones y ángulos, y la georreferenciación asegura que los modelos tridimensionales generados a

partir de estas imágenes estén vinculados a un sistema de coordenadas geoespaciales (Zúñiga, 2016). Esto permite la integración de los modelos SfM con otros datos geoespaciales y facilita su uso en aplicaciones como la cartografía, la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la investigación geológica (Sturzenegger y Stead *et al.*, 2009a).

2.4.10 Registro de imagen

La precisión final de un modelo 3D está influenciada por la calidad del proceso de registro de imágenes. El registro de imágenes en un modelo 3D puede adoptar diferentes enfoques, dependiendo de si se necesita en un sistema de coordenadas absoluto o en uno relativo orientado al Norte. Existen varios métodos (A-E) para el registro de modelos 3D, cada uno con diferentes configuraciones y requisitos de equipo (Sturzenegger y Stead *et al.*, 2009a):

- Método A: Se basa en la medición de la línea de visión de la cámara con una brújula y la escala se obtiene midiendo la distancia entre dos cámaras utilizando un trípode con nivel de bola (Fernández, 2016).
- Método B: Implica tomar tres fotografías desde posiciones conocidas, generando modelos 3D ligeramente menos precisos debido a que asume el centro de perspectiva de la cámara como el punto GPS de la cámara, lo que puede causar una pequeña discrepancia (Adam Technology *et al.*, 2007).
- Método C: Se colocan seis o más puntos de control en la pared de roca, siendo tres puntos suficientes para georreferenciar el modelo 3D, mientras que los otros puntos optimizan la distribución espacial y proporcionan redundancia.
- Método D: Un punto de control se coloca en la pared de roca a modelar, y las fotografías se toman desde al menos dos posiciones conocidas (CSIRO *et al.*, 2007).
- Método E: Se localizan tres puntos que forman un ángulo recto cerca del frente a modelar, y los ángulos x e y del sistema de georreferenciación local se alinean con los ejes Norte y Este, mientras que la escala se obtiene midiendo la distancia entre los puntos.

Los métodos más simples (A y E) utilizan lecturas de clinómetro de brújula para el registro en un sistema de referencia relativo orientado al Norte, siendo rápidos, simples y de bajo

costo. Por otro lado, los enfoques B, C y D requieren una estación total y/o DGPS, lo que implica un levantamiento más largo y costoso. Cuando el acceso a un corte de roca es limitado, los enfoques A y B resultan convenientes. La elección del enfoque de registro depende de la precisión requerida y de las limitaciones de tiempo, esfuerzo y costos. La figura 5 ilustra los enfoques A - E para el registro de modelos 3D.

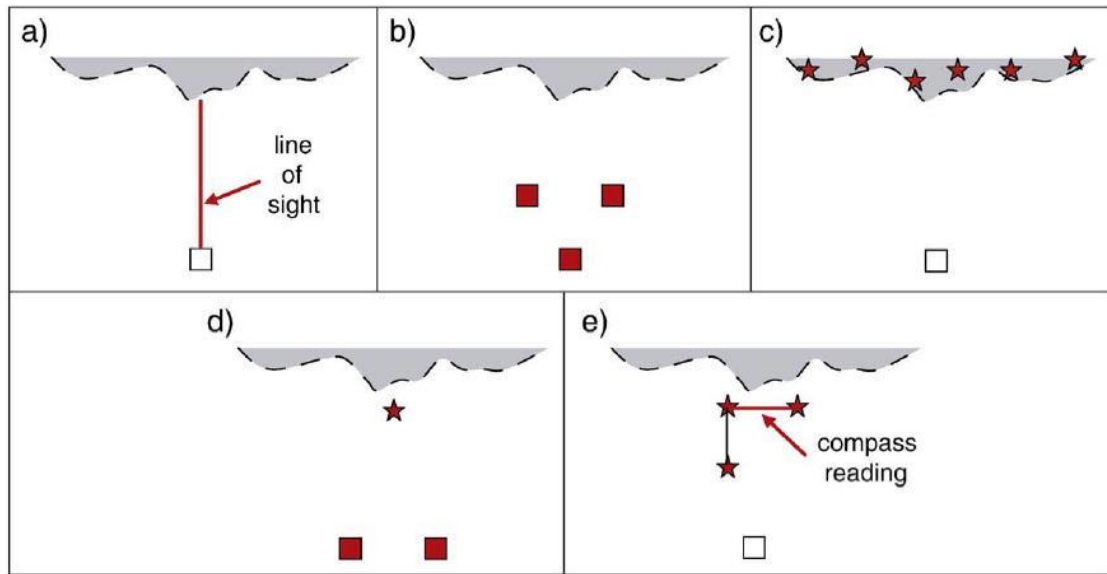


Figura 5: Montaje para diversos enfoques de registro. Los cuadrados representan posiciones de cámara/escáner y las estrellas puntos de control. Los símbolos o líneas rellenos indican los lugares de medición. Extraído de Sturzenegger y Stead (2009a).

2.4.11 Resolución de terreno

Para comprender la resolución espacial en sensores remotos basados en fotografía, es esencial emplear el concepto de celdas de resolución de terreno (GRC por sus siglas en inglés), las cuales representan el tamaño de un elemento dentro de la imagen (Rengers, 1967; Sturzenegger y Stead, 2009a).

En la fotogrametría digital, el espaciado entre los puntos del terreno depende del tamaño del paso, que a su vez es el número de píxeles del terreno utilizados tanto en la dimensión vertical como en la horizontal para definir un punto en el espacio (Ecuación 1). El tamaño del píxel se multiplica por el número de pasos para obtener el espaciado entre los puntos del terreno. Como regla general, se recomienda utilizar una resolución ligeramente alta para asegurar una redundancia suficiente que garantice una interpolación precisa hacia un modelo 3D (Giussani y Scaioni, 2004; Sturzenegger y Stead, 2009a; Fernández, 2016).

$$pixel_{terreno} = S pixel_{sensor} \quad \text{Ec. 1}$$

En la fotogrametría digital, el tamaño del píxel de terreno está influenciado por la escala y las dimensiones de la imagen (Birch, 2006). La captura de ciertas características en los frentes de roca requiere un número mínimo de píxeles, que puede variar según las circunstancias, mientras que la escala (S) puede aproximarse mediante la Ecuación 2 (Fernández, 2016). Es importante destacar que la escala permanece constante independientemente del nivel de zoom (Sturzenegger y Stead, 2009a).

$$S = \frac{f}{D} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde "*f*" representa la longitud focal y "*D*" es la distancia entre el objeto y la cámara. Por ejemplo, a una distancia de 500 metros con una longitud focal de 200 mm, la relación de escala es de 1:2500 (Fernández, 2016). En el caso de paredes de roca, se recomienda el uso de lentes con longitudes focales que oscilen entre 20 y 50 mm. Sin embargo, si la distancia entre la cámara y el objeto se encuentra en el rango de 1 a 2 kilómetros, es necesario utilizar lentes con longitudes focales comprendidas entre 100 mm y 400 mm (Sturzenegger y Stead, 2009b).

2.4.12 Yacimientos ornamentales

Los yacimientos de rocas ornamentales son depósitos minerales que contienen rocas naturales con características físicas y estéticas que las hacen adecuadas para su uso en aplicaciones decorativas y constructivas (Yari *et al.*, 2020). Estos yacimientos se caracterizan por la belleza y singularidad de las rocas que albergan, en términos de color, textura y patrones geológicos. Las rocas ornamentales se extraen en canteras o minas específicas para su posterior procesamiento y comercialización en diversas industrias (Vintró *et al.*, 2014).

Los yacimientos de rocas ornamentales se evalúan en función de la calidad de las rocas que contienen, incluyendo aspectos como la homogeneidad del color, la ausencia de defectos visuales, la resistencia mecánica y la facilidad de pulido. La textura y la cristalinidad de la roca también son factores importantes en su valor ornamental (Marchán Sanz, 2017).

En el mercado global, los yacimientos de **rocas ornamentales** desempeñan un papel significativo en la industria de la construcción, la fabricación de elementos decorativos y la joyería. Según datos de 2019, la industria de las rocas ornamentales alcanzó un valor de mercado de más de 18 mil millones de dólares, con una tendencia al alza. Países como China, India, Turquía, España e Italia son líderes en la producción y exportación de rocas ornamentales, lo que refleja la demanda global de estos materiales (MRRPB, 2023).

2.4.13 Rocas ornamentales

Se denominan rocas ornamentales a aquellas cuyo uso principal se centra en su valor estético, que proviene de la belleza de sus colores y de los contrastes cromáticos que ofrecen. No obstante, no se debe pasar por alto sus características mecánicas, que son igualmente relevantes, aunque también puedan emplearse en otros sectores industriales, como áridos y cementos (Muñoz de la Nava *et al.*, 1989).

Los siguientes tipos de rocas se incluyen en esta denominación (Bravo, 1999):

- Rocas ígneas, principalmente granitos, andesitas, tobas y riolitas.
- Rocas sedimentarias, calizas, coquinas y diatomitas.
- Rocas metamórficas, mármol, esquisto y pizarra.
- Rocas de alteración hidrotermal, mármol-ónix y mármol travertino.

Muñoz de la Nava *et al.*, (1989) recomiendan tener en cuenta las siguientes características al momento de estudiar un yacimiento de rocas ornamentales:

- Viscosidad o calidad ornamental.
- Homogeneidad del yacimiento
- Medidas de foliación magmáticas y tectónicas
- Presencia de oxidantes
- Estudio de la Fracturación

2.4.14 Rocas ornamentales en Chile

El uso de rocas ornamentales en Chile se remonta a la época precolombina. Los pueblos indígenas utilizaban estas rocas para la construcción de viviendas, templos y otras estructuras (Museo Chileno de Arte Precolombino, 2021). En la época colonial, el uso de rocas ornamentales se intensificó. Los españoles importaron rocas de todo el mundo para la construcción de edificios religiosos y civiles. En Chile existen una gran variedad de

rocas ornamentales. Las más comunes son las siguientes: granito, mármol, travertino y pizarra (Biese, 1950; Gajardo y Carrasco, 2006). Chile cuenta con una gran cantidad de reservas de rocas ornamentales, las principales regiones productoras son la región Metropolitana, la región de Valparaíso, la región de Coquimbo y la región de Atacama (Yuraszeck, 1999). A pesar de lo anteriormente señalado históricamente, en Chile, la producción de rocas para construcción y ornamentación ha sido limitada debido al desarrollo lento del mercado, la falta de tradición en el uso de estos materiales y la intensa fracturación geológica en el país. Esto ha resultado en una escasa experiencia en la prospección y explotación de estas rocas, así como en una infraestructura de procesamiento insuficiente y una producción reducida, tanto industrial como artesanal (Gajardo y Carrasco, 2006). La tabla 1 muestra la amplia gama de aplicaciones de las rocas ornamentales en la industria chilena.

No hay un registro oficial de la producción de rocas para construcción y ornamentación en el país, a excepción de una producción limitada de lapislázuli y mármol. Esto se debe a que el Código de Minería no requiere la constitución de pertenencia minera para materiales directamente utilizados en la construcción, como el granito, el mármol y la toba. Según se muestra en la tabla 2, la producción registrada de lapislázuli y mármol entre 1995 y 2004 ha experimentado una notable disminución, especialmente en el caso del lapislázuli, que dejó de registrarse a partir de 1998 (Gajardo y Carrasco, 2006).

Para la exploración de rocas ornamentales, en este trabajo se empleó la metodología (figura 6) propuesta por Muñoz de la Nava *et al.* (1989).

Usos %	Rocas silíceas	Rocas calcáreas
	(Granitos) %	(Mármoles) %
Pavimentación Exterior	28.0	6.0
Pavimentación Interior	7.0	30.0
Revestimiento Exterior	18.0	7.5
Revestimiento Interior	5.0	16.0
Escalas y Similares	5.7	5.5
Trabajos Estructurales	8.0	8.0
Industria Funeraria	18.0	12.0
Otros Usos	10.3	15.0

Tabla 1: Usos de las rocas ornamentales en Chile. Extraído de Yuraszeck (1999).

Roca/año	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Lapislázuli (Ton)	190	150	-	-	-	-	-	-	-	-
Mármol (Ton)	5.908	401	1.248	1.427	828	812	782	633	828	845

Tabla 2: Producción de lapislázuli y mármol de 1995 a 2004 en toneladas. Extraído de Gajardo y Carraco (2006).

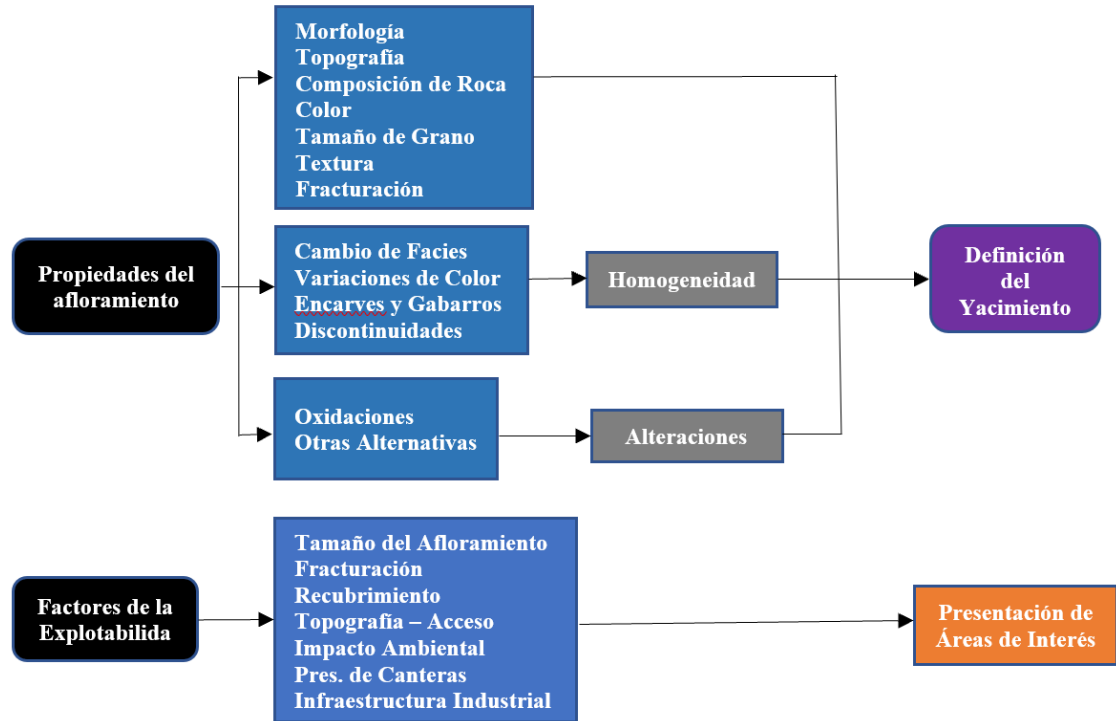


Figura 6: Planificación de la exploración de campo y factores que se deben tener en cuenta. Modificado de Muñoz de la Nava et al. (1989).

2.4.15 Geomecánica

La geomecánica es una disciplina interdisciplinaria de la geología y la mecánica que se enfoca en el estudio de las propiedades mecánicas de las rocas y su interacción con las estructuras subterráneas (Chávez-Aguirre *et al.*, 2006). Esta rama de la geociencia es fundamental para comprender la respuesta de las formaciones rocosas bajo diferentes condiciones de carga, presión y temperatura, y desempeña un papel crucial en la ingeniería geotécnica y la industria extractiva. Como señala Zoback (2010), "la geomecánica es la ciencia que se ocupa de la respuesta mecánica de las rocas y los minerales en la corteza terrestre". La importancia de la geomecánica radica en su capacidad para evaluar la estabilidad de taludes en excavaciones mineras, túneles, pozos petroleros y geotérmicos, así como en la planificación segura de proyectos subterráneos. Además, proporciona información valiosa para minimizar los riesgos geotécnicos asociados con la ingeniería

civil y la exploración de recursos naturales (Jaeger, 1979; Duque-Escobar y Escobar, 2016).

En el contexto de las rocas ornamentales, la geomecánica adquiere un valor específico al centrarse en la caracterización estructural y mecánica de macizos graníticos con el fin de determinar su canterabilidad. Factores como el espaciamiento de discontinuidades, la frecuencia lineal de fracturas (JF), la densidad volumétrica (J_v) y el Rock Quality Designation (RQD) son parámetros críticos que permiten inferir el tamaño y la forma de los bloques potencialmente extraíbles (Priest & Hudson, 1981; Muñoz de la Nava et al., 1989). Asimismo, la orientación y persistencia de las familias de discontinuidades condicionan la geometría de los bloques y, por lo tanto, la viabilidad económica de la explotación. En este sentido, la geomecánica aplicada a rocas ornamentales no sólo evalúa la estabilidad de los macizos, sino que también constituye la base para estimar la calidad ornamental y el aprovechamiento industrial de los cuerpos graníticos.

2.4.16 Mapeo geotécnico

El mapeo geotécnico, en el contexto de la ingeniería y la geología, es un proceso esencial que implica la evaluación y representación detallada de las propiedades geotécnicas y la distribución de materiales en una determinada área geográfica. Se basa en la recopilación, análisis y visualización de datos geológicos, geotécnicos y topográficos para comprender la naturaleza y el comportamiento de los suelos y rocas presentes en un sitio específico (Fenton y Griffiths, 2008). Con el propósito de llevar a cabo este proceso, se recopilan datos sobre la estructura, se detallan las interrupciones en el terreno y se procede con la obtención de muestras geomecánicas, realización de pruebas en el lugar y documentación fotográfica. Entre las características de las discontinuidades a evaluar se encuentran su inclinación, dirección de inclinación, longitud, separación, rugosidad, continuidad, apertura, contenido y terminación (Priest *et al.*, 1993; Chávez-Aguirre *et al.*, 2006).

Este proceso proporciona información crucial sobre la estabilidad de pendientes, la capacidad de carga del suelo, la permeabilidad, la expansión y contracción del suelo, entre otros factores geotécnicos, que son fundamentales para la planificación y el diseño de proyectos de ingeniería civil y geotécnica (Holtz y Kovacs, 2010). El mapeo geotécnico desempeña un papel crítico en la mitigación de riesgos geotécnicos, la toma de decisiones

informadas y la seguridad en la construcción de infraestructuras, contribuyendo significativamente al éxito de proyectos de ingeniería de manera sostenible y segura.

En la industria de las rocas ornamentales, el mapeo geotécnico cumple un rol esencial en la determinación del potencial canterable. A través de este proceso se establecen los valores de espaciamiento medio, frecuencia lineal (JF), densidad volumétrica (Jv) y RQD, que permiten clasificar los macizos en categorías de calidad y prever el tamaño de los bloques obtenibles (Muñoz de la Nava et al., 1989; Priest & Hudson, 1981). Con la incorporación de nuevas tecnologías, como la fotogrametría digital y el análisis automatizado de discontinuidades en modelos 3D (Riquelme et al., 2014), el mapeo geotécnico ha evolucionado hacia procedimientos más eficientes y seguros, capaces de superar limitaciones logísticas y riesgos asociados a levantamientos convencionales. En este marco, el mapeo geotécnico no sólo sirve para evaluar la estabilidad de macizos, sino también para definir, con base objetiva, la viabilidad económica y ornamental de un yacimiento granítico.

2.4.17 Conceptos claves

2.4.17.1 Rock quality designation (RQD)

El "*Rock Quality Designation*" (RQD, por sus siglas en inglés), es un parámetro geomecánico ampliamente utilizado en la geología y la ingeniería civil para evaluar la calidad y la fracturación de una masa de roca (Deere, 1964; Chávez Aguirre *et al.*, 2006). Fue desarrollado por Deere en 1964 y se define como el porcentaje de testigo de perforación de más de 10 cm de longitud que no está roto o fracturado (Deere, 1964; Bieniawski, 1989). El RQD proporciona información importante sobre la continuidad y la integridad de una masa de roca, lo que es fundamental en la planificación y el diseño de proyectos de ingeniería civil, minería, y túneles (Jaeger, 1979; Deere y Deere, 1989).

Parámetros Claves del RQD (Deere, 1964; Deere, 1968; Bieniawski, 1989):

- Longitud del testigo: El RQD se calcula sobre la base de la longitud del testigo de perforación.
- Longitud de las fracturas: El RQD se calcula excluyendo las fracturas que tienen una longitud superior a 10 cm.

- Grado de meteorización: El RQD se calcula excluyendo las rocas que están meteorizadas.

El RQD en sí mismo no se utiliza directamente en la fotogrametría, ya que es un parámetro geomecánico que se calcula a partir de muestras de núcleo de perforación de roca recogidas en campo. Sin embargo, la información sobre la calidad de la roca obtenida mediante el RQD puede ser relevante en proyectos de fotogrametría geológica o geotécnica (Fernández, 2016). Por ejemplo, en la planificación de proyectos de mapeo geológico con fotogrametría, la calidad de la roca puede influir en la selección de las ubicaciones de las cámaras y en la interpretación de las características geológicas en las imágenes fotogramétricas (Salvini *et al.*, 2020).

2.4.17.2 Frecuencia de fractura

La **frecuencia de fractura** en geomecánica se define como el conteo de fracturas o discontinuidades presentes en una determinada longitud de una masa de roca. Este parámetro desempeña un papel crucial en la evaluación de la calidad y el comportamiento geomecánico de la roca, siendo de gran relevancia en proyectos de ingeniería civil, minería y geología (Hoek y Brown, 1997; Brady y Brown, 2006).

Los aspectos clave de la frecuencia de fractura incluyen (Hoek y Brown, 1997):

- Número de fracturas: Representa la cantidad total de fracturas o discontinuidades en un tramo específico de la masa rocosa.
- Longitud de intervalo: Indica la distancia sobre la cual se realiza la evaluación de la frecuencia de fractura, pudiendo variar según el contexto y los objetivos del estudio.

La frecuencia de fractura resulta esencial para comprender la resistencia y la estabilidad de la masa rocosa en proyectos de ingeniería, dado que la presencia de un mayor número de fracturas tiene un impacto significativo en la resistencia de la roca (Hoek y Brown, 1997). Además, contribuye a identificar áreas propensas a deformaciones y colapsos, lo que reviste gran importancia para la seguridad en proyectos subterráneos y mineros. Asimismo, facilita la planificación de actividades como la excavación de túneles, la minería y la construcción de presas, ya que las fracturas pueden influir en la estabilidad de estas estructuras (Marinos y Hoek, 2000; Brady y Brown, 2006). La información sobre

la frecuencia de fractura se emplea en modelos geotécnicos para prever el comportamiento de la masa rocosa bajo diversas cargas y condiciones geomecánicas.

2.4.17.3 Número de familias de diaclasa

En geología estructural, una familia de diaclasas se refiere a un conjunto de fracturas o discontinuidades en una formación rocosa que comparten características geológicas y geométricas similares, lo que las agrupa en una categoría específica. Estas diaclasas pueden tener orientaciones, dimensiones y propiedades geológicas en común (Belousov, 1968; Ragan, 1985). Los parámetros claves de una familia de diaclasas son (Fossen, 2016):

- **Orientación:** La dirección y el ángulo de inclinación de las diaclasas en relación con un sistema de coordenadas geográficas.
- **Espaciado:** La distancia entre las diaclasas dentro de la familia, que puede variar según la formación geológica.
- **Longitud:** La extensión o longitud de las diaclasas dentro de la masa de roca.
- **Apertura:** El espacio o abertura entre las superficies de fractura de las diaclasas, que puede influir en la permeabilidad de la roca.
- **Rugosidad:** La textura o aspereza de las superficies de fractura, lo que puede afectar la fricción y la interacción entre las diaclasas.
- **Persistencia:** La continuidad o extensión de las diaclasas a través de la formación rocosa, lo que puede variar en términos de interrupciones o discontinuidades.
- **Frecuencia:** El número de diaclasas de la familia presentes en un tramo específico de la roca.

La importancia de las familias de diaclasas radica en que, su caracterización es fundamental, ya que proporciona información sobre la historia de deformación de una región geológica. Ayuda a comprender la geometría y la cinemática de las fracturas en la corteza terrestre, lo que es esencial para reconstruir la historia geológica y evaluar los riesgos geológicos. También la identificación de familias de diaclasas es relevante en la exploración y explotación de recursos naturales, como yacimientos minerales y reservorios de petróleo y gas. Finalmente facilita la planificación geotécnica en proyectos de construcción civil y obras subterráneas, como túneles y presas, para garantizar la

estabilidad de las estructuras en presencia de fracturas geológicas (Ragan, 1985; Fossen, 2016).

2.4.17.4 Espaciamiento

El término espaciamiento hace referencia a la distancia promedio que existe entre las fracturas o diaclasas que se encuentran en una formación rocosa. Esta característica desempeña un papel crucial en la descripción de la estructura de una masa de roca y en la comprensión de la distribución espacial de estas fracturas (Ragan, 1985; Fossen, 2016).

La determinación del espaciamiento posibilita la evaluación de la calidad de una masa de roca en relación con su capacidad para resistir cargas y tensiones. Un menor espaciamiento puede sugerir una mayor densidad de fracturas y, en ocasiones, una menor resistencia de la roca. Además, este parámetro es de utilidad en la planificación y diseño de proyectos geotécnicos, como la construcción de túneles, presas y cimientos de edificios, al proporcionar información esencial sobre la estructura y estabilidad de la roca (Chávez Aguirre *et al.*, 2006).

2.4.17.5 Sencibilidad de los parámetros

La clasificación de canterabilidad es sensible a variaciones en el espaciamiento y la orientación de las discontinuidades (Muñoz de la Nava *et al.*, 1989). Por ejemplo, una reducción del 20 % en el espaciamiento medio de una familia incrementa su JF y, por ende, la J_v total del sector, lo que reduce el RQD de forma exponencial. De igual manera, un cambio en la orientación de las familias puede modificar la geometría de los bloques: familias más perpendiculares generan prismas de mayor volumen, mientras que ángulos agudos o muy obtusos favorecen la formación de cuñas o láminas delgadas, reduciendo el tamaño aprovechable. Estas consideraciones sugieren que pequeños cambios en la densidad o la geometría de las discontinuidades pueden desplazar a un sector de una categoría “moderada” a “limitada”.

2.4.17.6 Método línea de detalle (“Scanline”)

El método de línea de detalle, conocido como **Scanline**, es una técnica ampliamente utilizada en geología y geomecánica para la caracterización de macizos rocosos, particularmente en la evaluación de fracturas, diaclasas y discontinuidades. Este método consiste en trazar una línea recta de longitud definida sobre la superficie del macizo rocoso, a lo largo de la cual se registran todas las discontinuidades que interceptan la línea,

incluyendo su orientación (rumbo y buzamiento), espaciamiento, persistencia, apertura y rugosidad (Priest, 1980; Hudson & Harrison, 1997). El proceso implica la medición manual o mediante herramientas especializadas, como clinómetros y cintas métricas, aunque en la actualidad se complementa con técnicas fotogramétricas que permiten la digitalización y análisis de las discontinuidades a partir de modelos 3D generados con drones o cámaras de alta resolución (Lato *et al.*, 2012). Una de las principales ventajas del método Scanline es su capacidad para proporcionar datos cuantitativos sobre la densidad de fracturas (Frecuencia de Fracturas) y el Índice de Calidad de Roca (RQD), parámetros esenciales para la evaluación de la estabilidad y calidad del macizo rocoso en proyectos de ingeniería y minería (Bieniawski, 1989). Sin embargo, el método tiene limitaciones, como su dependencia de la accesibilidad al terreno y la posible subestimación de discontinuidades que no interceptan la línea de detalle (Zhang & Einstein, 2000). A pesar de estas limitaciones, el Scanline sigue siendo una herramienta fundamental en la caracterización geomecánica, especialmente cuando se combina con tecnologías modernas como la fotogrametría, que permiten una mayor precisión y cobertura espacial en el análisis de macizos rocosos.

3. Marco geológico regional

La zona de investigación está situada en la Precordillera de la región de Atacama (ver Figura 3.1). En este capítulo se proporciona información sobre los aspectos geológicos pertinentes para el presente estudio.

3.1. Geología regional de la Precordillera

La Precordillera de la región de Atacama, en Chile tiene una edad que se remonta a la era Paleozoica, específicamente al periodo Ordovícico, hace aproximadamente 488 a 443 millones de años atrás (Jordan *et al.*, 1983). Las rocas más antiguas que afloran en la Precordillera corresponden a sedimentos marinos paleozoicos de plataforma continental, polideformados y metamorfizados durante el ciclo Gondawánico, exhumados y observados en la actualidad (Mpodozis *et al.*, 2005).

El proceso de formación de la Precordillera de la región de Atacama estuvo influenciado por varios factores geológicos, como la subsidencia tectónica y la acumulación de sedimentos (Bahlburg y Hervé *et al.*, 1997). Durante el ciclo Andino, a medida que se acumulaban sedimentos en el fondo del mar, las capas de roca se compactaban con el tiempo, formando secuencias sedimentarias estratificadas. Estas secuencias incluyen una variedad de rocas sedimentarias, como lutitas, areniscas y conglomerados, que representan diferentes condiciones ambientales a lo largo de millones de años (Bahlburg y Hervé *et al.*, 1997; Mpodozis *et al.*, 2005).

En el occidente, se acumularon rocas volcánicas, volcanoclásticas y epiclásticas, en ambientes continentales a transicionales, como la Formación Punta del Cobre (Arévalo *et al.*, 2006; Del Real *et al.*, 2018). En contraste, hacia el oriente se encuentran rocas sedimentarias marinas, pertenecientes al Grupo Chañarcillo (Seegerstrom y Parker, 1959). Estas formaciones representan, dos tipos de asociaciones geológicas durante el Jurásico Superior-Cretácico Inferior, correspondientes a un arco volcánico en el oeste y un tras-arco (o intra-arco) en el este (Lucassen *et al.*, 1996; Scheuber y González, 1999). Durante el Cretácico Inferior al Cretácico Superior, se depositaron aproximadamente 4.000 metros de sedimentos, en su mayoría de naturaleza clástica y con un origen asociado a procesos volcánicos. Estos sedimentos conformaron lo que se conoce como la Formación Cerrillos (Seegerstrom y Parker *et al.*, 1959; Seegerstrom y Ruiz *et al.*, 1962), depositados en una

cuenca continental angosta que se desarrolló sobre las secuencias geológicas del Cretácico inferior (Arévalo *et al.*, 2005).

Las secuencias volcánicas e intrusivas del Cretácico Superior – Paleógeno inferior exhiben relaciones de contacto, asociaciones de facies y patrones estructurales regionales o locales resultando de la evolución de estructura volcánicas (Rivera y Falcón, 2000), y formación de complejos vulcano-plutónicos emplazados durante eventos de colapso-resurgencia de calderas en ambiente tectónico extensional (Rivera y Mpodozis *et al.*, 1991, 1994; Rivera *et al.*, 1992; Cornejo *et al.*, 1993, 1994; Arévalo *et al.*, 1994; Mpodozis *et al.*, 2005). En las zonas precordilleranas de El Salvador, Copiapó y Vallenar, se encuentran campos de calderas y calderas anidadas que datan del Paleoceno al Eoceno, y están relacionadas con diversas etapas del ciclo evolutivo de cuencas vulcano-tectónicas extensionales, tales como Hornitos e Indio Muerto que abarcan desde el Cretácico Superior hasta el Paleógeno inferior (Arévalo *et al.*, 2005). A continuación, en la figura 7, se representan las principales unidades de la zona de estudio:

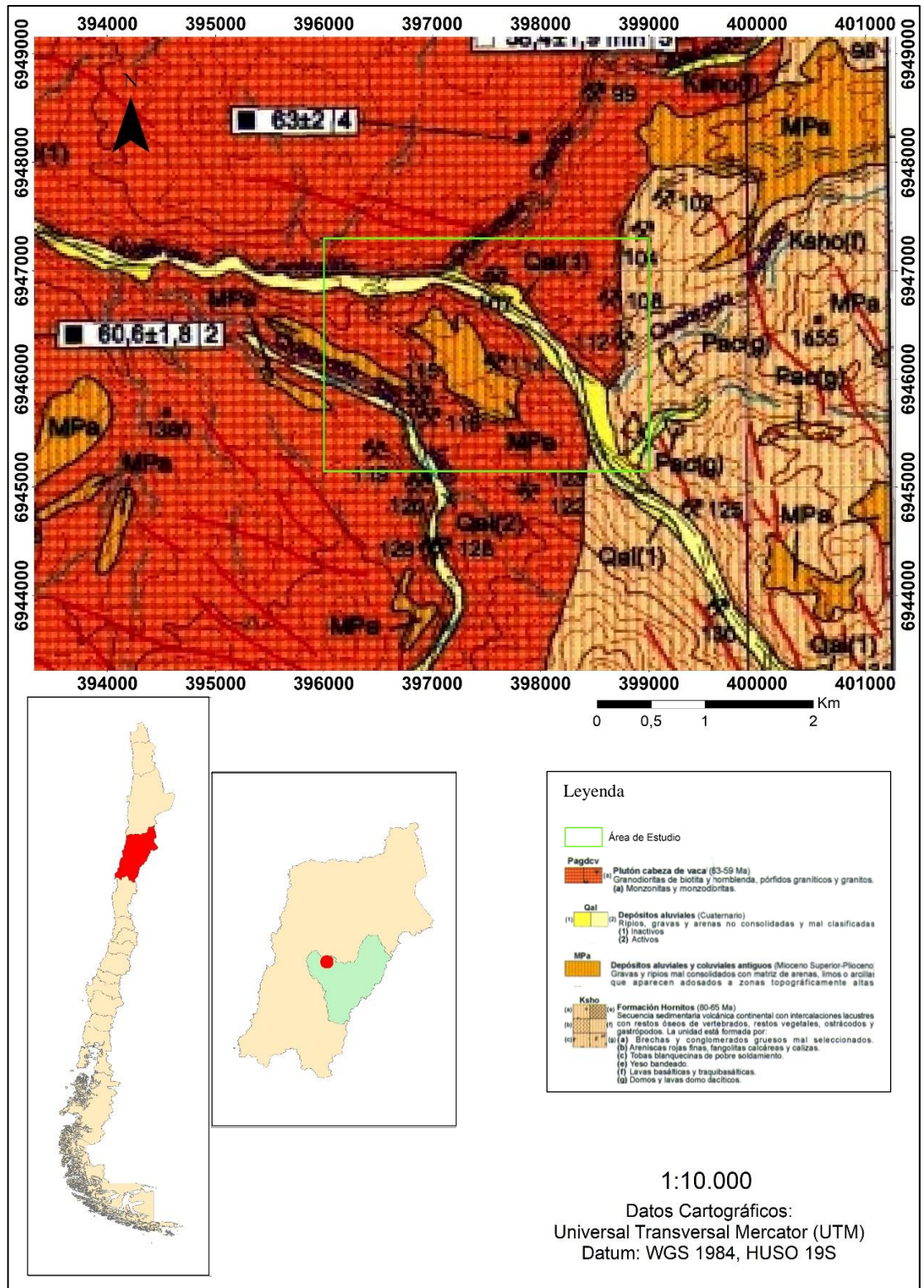


Figura 7: Mapa geológico del área de estudio. Modificado de Arévalo et al., (2005)

El desarrollo volcánico-tectónico de la Precordillera de la Región de Atacama estuvo condicionado por un régimen extensional activo desde el Cretácico Superior al Paleoceno. En este contexto se configuró un sistema de hemigraben con sedimentación continental compuesta por conglomerados, areniscas rojas, fangolitas y calizas lacustres, que posteriormente fueron cubiertos por flujos de lava basálticos y traquibasálticos (Arévalo, 1994).

Sobre estas unidades se emplazó un extenso campo de calderas de colapso. Estudios sugieren que la actividad comenzó hacia los 64–65 Ma, aproximadamente 8 millones de años antes del colapso principal de la Megacaldera Carrizalillo, reflejando altas tasas de extensión y repetidos colapsos de cámaras magmáticas (Rivera y Mpodozis, 1991; Rivera, 1992; Arévalo, 2005).

La evolución inicial estuvo marcada por la formación de al menos 14 calderas de menor tamaño, como Lomas Bayas, El Durazno, Agua Nueva y Bellavista, distribuidas en una franja de dirección NS–NNE de más de 350 km de longitud y entre 30 y 60 km de ancho. Su emplazamiento estuvo controlado por estructuras locales subanulares y fallas regionales longitudinales que definieron los márgenes de las cuencas volcano-tectónicas (Rivera y Mpodozis, 1991; Rivera, 1992; Rivera y Falcón, 2000).

Posteriormente, el sistema evolucionó hacia el colapso principal de la Megacaldera Carrizalillo, evento que representa la culminación de la actividad volcánica de gran magnitud en la zona. Este colapso estuvo asociado a un sistema transtensivo de carácter dextral, que favoreció la inyección de grandes volúmenes de magma en niveles corticales superiores y la posterior extrusión de flujos de lava y depósitos piroclásticos (Rivera y Mpodozis, 1994; Niemeyer, 2010).

Las fases finales de este ciclo extensional corresponden al Paleoceno–Eoceno, período en el cual se reconocen calderas anidadas en sectores precordilleranos de El Salvador, Copiapó y Vallenar. Estas estructuras se asocian con los estadios terminales de las cuencas volcano-tectónicas cretácico-paleocenas (Rivera y Falcón, 2000). El cierre de la actividad magmática se refleja en la intrusión del Plutón Cabeza de Vaca, que constituye la expresión final del sistema en la región (Rivera y Falcón, 2000).

3.2. Geología local

3.2.1 Los Loros

La caracterización geológica de la zona de estudio se enmarca en la Carta Geológica Los Loros (Arévalo, 2005), publicada por el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN) como parte de la Serie Geológica Básica. Esta carta, a escala 1:100.000, abarca el área ubicada en la Precordillera de la región de Atacama e integra información litológica, estructural y cronológica clave para el análisis de unidades presentes en el área de estudio.

3.2.1.1 Depósitos Aluviales (2.6 Ma - actualidad)

Los depósitos aluviales corresponden a depósitos de ripios, gravas y arenas, mal clasificadas que han sido transportados como flujos gravitacionales y que ocupan laderas de baja pendiente y rellenan quebradas. Han sido separados en depósitos aluviales antiguos o inactivos, que están formados por clastos heterocomposiciones y subangulosos en una matriz limo arenosa y constituyen mantos extendidos lateralmente, que forman el relleno seco y la desembocadura de la quebrada Cachiyuyo; y depósitos aluviales activos que corresponden a gravas y ripios no consolidados, de baja selección que rellenan cursos disecados en los depósitos anteriores (Arévalo, 2005; Rojas, 2022).

La formación de estos depósitos se origina a partir de la acumulación de flujos gravitacionales densos, incluyendo corrientes de barro y flujos de detritos, que se desplazan hacia zonas más bajas. Estos flujos llenan antiguos cursos aluviales, dando lugar a la formación de conos aluviales y mantos extendidos. La ocurrencia de estos flujos se asocia con episodios pluviales esporádicos, pero de gran intensidad. Estos eventos se sitúan en el rango de edades que abarca desde el Pleistoceno hasta el Holoceno, ya que estos procesos erosionan unidades geológicas continentales del Mioceno-Plioceno y continúan activos en la actualidad (Arévalo, 2005).

3.2.1.2 Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos (7.2 Ma – 2.9 Ma)

Los depósitos antiguos, se componen de gravas y ripios poco consolidados (Arévalo, 2005). Estos forman conos aluviales que pueden ser individuales o fusionarse en una unidad más grande. Además, incluyen depósitos coluviales y llanuras de inundación que están ubicadas junto a áreas de mayor elevación topográfica. Estos depósitos antiguos están cubiertos por sedimentos aluviales más jóvenes del Cuaternario. En términos de su

morfología, mantienen la típica forma de abanico, con secciones apicales estrechas que llenan las áreas más altas de las quebradas, y zonas distales más amplias. Se distribuyen principalmente hacia las laderas de la Sierra El Plomo y se consideran parte integral del paisaje geológico de la región. No se han hallado datos cronológicos directos para establecer la edad de esta unidad geológica. Sin embargo, se realizó una datación K-Ar en biotita obtenida desde cenizas que se intercalan en las gravas presentes en la llanura de Fraga, la que arrojó una edad aproximada de $7,2\pm 3,3$ millones de años (Arévalo, 2005). También se llevaron a cabo análisis de biotita que proporcionaron edades K-Ar de alrededor de $6,3\pm 0,4$ millones de años y $2,9\pm 0,4$ millones de años (Godoy y Lara, 1998), otras edades obtenidas dan $6,4\pm 1,1$ Ma (Godoy *et al.*, 2003).

3.2.1.3 Plutón Cabeza de Vaca (63 Ma – 59Ma)

El plutón Cabeza de Vaca (Paleoceno 63-59 Ma) fue caracterizado por Segerstrom y Parker (1959). Este plutón posee una forma subanular alargada en la dirección NNE- SSW y es predominantemente granodiorítico con una facies marginal de monzonita/monzodiorita de cuarzo (Taylor *et al.*, 2007). Además, se encuentran pórfidos graníticos y, en su interior, numerosas chimeneas de brechas de turmalina y vetas de turmalina asociadas. Hacia las zonas más orientales del plutón, se observan variaciones hacia facies más finas de monzonitas y monzodioritas. Tiene aproximadamente 45 km de diámetro máximo, donde intruye rocas volcánicas de la Formación Hornitos (Taylor *et al.*, 2007), conglomerados del basamento pre-caldera y tobas del colapso de la mega caldera Carrizalillo (Rivera y Mpodozis, 1994). En el norte se desvía de ésta y se extiende hacia el este-noreste donde finalmente es truncado por fallas inversas del Sistema de Fallas de La Ternera.

En su parte septentrional, el plutón presenta un contacto transicional con un techo plano, mientras que, en su margen occidental, el contacto es abrupto. No se aprecian deformaciones en las rocas circundantes (Gerding, 2020). El emplazamiento del plutón Cabeza de Vaca ocurrió durante un período de resurgencia, aprovechando la fractura subanular que se había formado durante el colapso de la mega caldera (Rivera y Mpodozis, 1994), lo que también generó actividad volcánica posterior al colapso (Lipman, 1988). Han sido obtenidas cuatro edades K-Ar en biotitas para el plutón Cabeza de Vaca: 63 ± 2 Ma (Rivera y Mpodozis, 1994); $60,6\pm 1,8$ Ma (Zentilli, 1974) y 63-60 a $58,9\pm 2,3$ Ma

(Arévalo, 1994, 1995). Como muchos otros plutones del Cretácico-Paleoceno más tardío, una de las características de campo más notables, en comparación con los plutones cretácicos más antiguos del oeste, es la frecuente aparición de texturas de mezcla de magma entre los constituyentes más ácidos y básicos (Taylor *et al.*, 2007).

Los depósitos alojados en el plutón Cabeza de Vaca comprenden chimeneas de brecha que se encuentran en facies de granodiorita de grano medio. Estas chimeneas, en general, presentan formas que varían de elípticas a irregulares. En el interior de las brechas, se pueden identificar dos categorías de clastos, uno de composición granodiorítica y otro de naturaleza diorítica porfídica. Estos clastos están embebidos en una matriz compuesta por turmalina, cuarzo, magnetita, crisocola, atacamita, malaquita, oro y minerales de plata, lo que da lugar a diversas paragénesis minerales (Díaz, 2000).

3.2.1.4 Mineralización y alteración

Las brechas que componen el plutón Cabeza de Vaca presentan una composición de clastos granodioríticos y dioríticos porfídicos, en una matriz que contiene turmalina, cuarzo, óxidos e hidróxidos de hierro, así como sulfuros de calcopirita y bornita (Sillitoe, 2010; Cooke *et al.*, 2005). Además, se encuentran óxidos de cobre como crisocola, atacamita, brochantita, cuprita y cobre nativo, minerales típicos de la zona de oxidación supergénica en sistemas porfídicos cupríferos (Camus, 2003; Reich *et al.*, 2009) La acción de procesos de oxidación y lixiviación, tanto en el plutón como en las brechas, ha dado lugar a una extensa zona de enriquecimiento de cobre, lo que permite dividir el depósito en áreas de lixiviación-oxidación, mixtas e hipógenas primarias (Gustafson & Hunt, 1975; Sillitoe, 2005). En este contexto, se han identificado cinco etapas paragenéticas que definen la evolución de este depósito (Novoa, 2021):

- Etapa magmática-hidrotermal, compuesta por una paragénesis mineral de feldespatos potásico, biotita secundaria y magnetita. Sobreimpuesta por,
- Etapa hidrotermal primaria temprana, que implica la alteración clorita- en granodioritas, acompañada de diseminaciones de pirita.
- Etapa hidrotermal principal relacionada con la brechización de la turmalina y se caracteriza por la formación de una alteración cuarzo-sericita en los fragmentos de roca, así como la presencia de minerales metálicos como calcopirita, con cantidades menores de pirita.

- Etapa de enriquecimiento supérgeno, se observa la sustitución de los sulfuros de cobre hipógenos por minerales como calcosina y covelina. En esta fase, la pirita y la magnetita experimentan un reemplazo parcial por hematita y goethita, en estrecha asociación con oro nativo. En una etapa hidrotermal posterior, la caolinita se superpone a todas las alteraciones previamente mencionadas, dando lugar a una alteración argílica en las rocas. Con el tiempo, comienzan a aparecer minerales del grupo de la illita y esmectitas en esta etapa temprana.

La alteración supérgena posterior, se caracteriza por las asociaciones cuarzo-caolinita-dickita-sepiolita y alunita-jarosita-caolinita-cuarzo residual, donde ocurre la lixiviación completa de los sulfuros (Novoa, 2021).

En la figura 8 se observa un mapa de croquis geológico de la zona al este de Copiapó enfatizando en las formaciones que acompañan geoespacialmente al plutón Cabeza de Vaca (Taylor *et al.*, 2007).

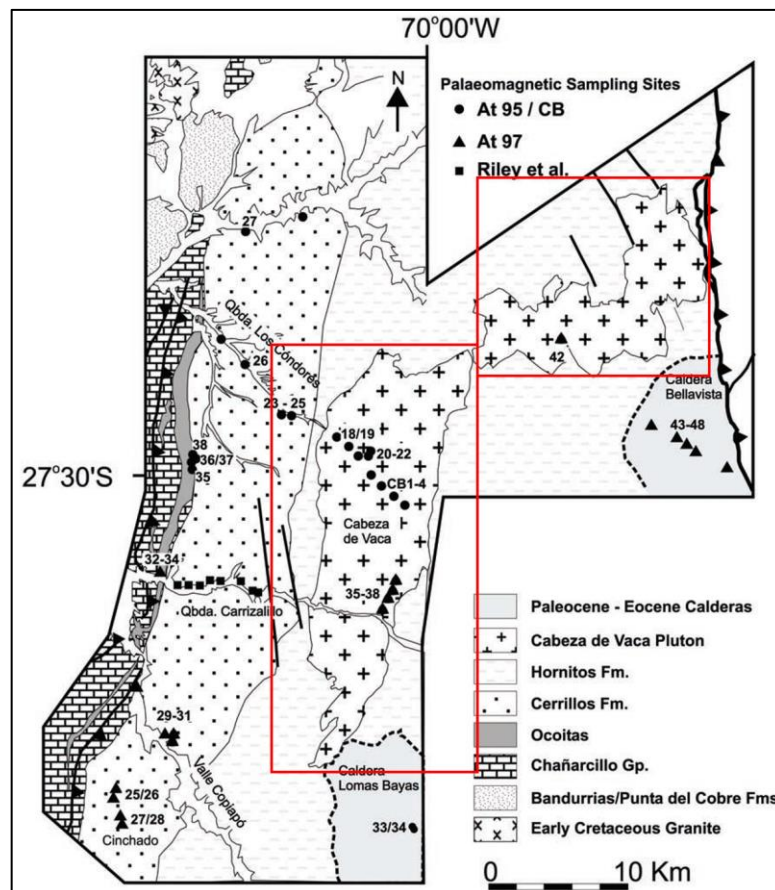


Figura 8: Mapa de croquis geológico de la zona al este de Copiapó. La imagen muestra la geología generalizada, en rojo se señala el plutón Cabeza de Vaca. Extraído de Taylor *et al.*, (2007).

3.2.1.5 Minería del plutón Cabeza de Vaca

El plutón Cabeza de Vaca ha sido un área de interés minero desde épocas prehispánicas, cuando los pueblos originarios de la región, como los Diaguitas, explotaban minerales de cobre y oro para la fabricación de herramientas y ornamentos (Núñez, 1999). Durante la colonización española en el siglo XVI, la actividad minera en la zona se intensificó, particularmente en busca de metales preciosos. Sin embargo, fue durante el siglo XIX, con el auge de la minería en la región de Atacama, que el plutón Cabeza de Vaca adquirió mayor relevancia. La explotación de cobre y plata en yacimientos cercanos, como Chañarcillo y Tres Puntas, impulsó el desarrollo de infraestructura y tecnología minera en la región, lo que indirectamente benefició la exploración de recursos en el plutón (Vicente, 2005). A principios del siglo XX, la minería en el área se enfocó en la extracción de minerales industriales, como feldespato y cuarzo, utilizados en la industria cerámica y vidriera. Durante este período, se registraron pequeñas explotaciones artesanales y semi-industriales, aunque la falta de tecnología adecuada limitó su rentabilidad (SERNAGEOMIN, 2003). En las últimas décadas, el interés en el plutón Cabeza de Vaca se ha centrado en su potencial como fuente de roca ornamental, debido a la calidad y homogeneidad de sus granitos. Estudios recientes han evaluado la viabilidad económica de estos recursos, destacando su uso en la construcción y decoración de edificios (López *et al.*, 2010). A lo largo de su historia, el plutón Cabeza de Vaca ha sido testigo de la evolución de la minería en Chile, desde las técnicas rudimentarias de los pueblos originarios hasta los métodos avanzados de la industria moderna, consolidándose como un área de gran importancia geológica y económica en la región de Atacama.

4. Metodología

A continuación, en la figura 9, se presenta un diagrama de flujo de la metodología utilizada en el presente trabajo:

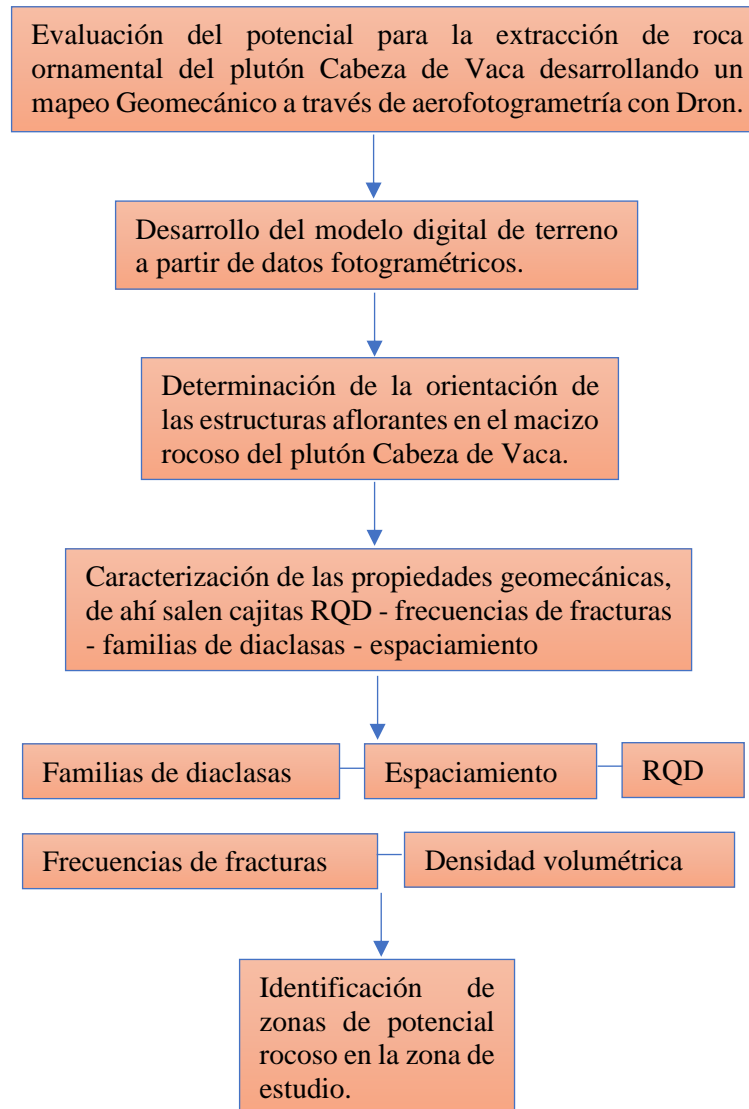


Figura 9: Diagrama de flujo que resume la metodología a utilizar para la determinación de zonas de potencial canterabilidad.

La presente metodología incorporó los aspectos fundamentales para desarrollar el levantamiento de información en terreno y un correcto procesamiento digital de los datos. Para esto, se utilizó como guía las metodologías propuestas principalmente Muñoz de la Nava *et al.* (1989) y Riquelme *et al.* (2014). Es en este sentido que la presente se dividirá en tres ejes generales; “Trabajos previos, de terreno y postproceso”.

4.1. Trabajos previos

4.1.1 Recopilación de la información

En esta etapa, se realizó una recopilación y análisis bibliográfico del área de estudio, donde se consultaron diversas publicaciones científicas y cartas geológicas del sector, para de esta forma poder caracterizar geológicamente la zona de interés. Esta información está explicada en el “Capítulo 3 Marco geológico regional” de este documento.

4.1.2 Planificación del trabajo en terreno

Una vez recopilada toda la información, se procedió a planificar la etapa de terreno. Este proceso, comienza con el uso del software Google Earth Pro, donde se dibujó el polígono del área de estudio y se revisó el sector en búsqueda de sus accesos (figura 10).



Figura 10: Revisión previa del área de estudio y sus accesos. El polígono verde representa el área de estudio, la línea roja representa la ruta de acceso C-401.

Es muy importante tener en consideración los aspectos mencionados en la figura 6, que tratan sobre los factores condicionantes de la explotabilidad para seleccionar los puntos en terreno.

En este trabajo, el análisis principal se centró en las características geomecánicas del macizo rocoso, de acuerdo con el objetivo general señalado en el punto 1.4.1: “Evaluar el potencial para la extracción de roca ornamental del plutón Cabeza de Vaca mediante un mapeo geomecánico apoyado en aerofotogrametría con drones”. Dentro de este enfoque,

la fracturación del macizo constituye un dato crítico, ya que la densidad del diaclasado es el principal factor que condiciona el tamaño de los bloques extraíbles. En particular, un diaclasado denso limita la obtención de bloques comerciales, un diaclasado de densidad media solo permite su extracción en zonas específicas, mientras que un diaclasado bajo facilita la obtención de bloques de tamaño comercial de manera más generalizada.

4.1.3 Selección de macizos rocosos en base a su fracturamiento

El nivel de fracturamiento del macizo rocoso, es uno de los factores más importantes para considerar en la explotación, en este sentido, de la densidad y espaciado del diaclasado va a depender el que se puedan extraer o no bloques de tamaño comercial, de ahí la importancia de realizar un profundo y detallado estudio de la fracturación.

El primer aspecto considerado fue la distribución espacial del sistema de diaclasado y su relación geométrica. Para ello, se representaron en estereogramas los datos de dirección de buzamiento y buzamiento de las diaclasas medidas en el terreno. Esto permitió definir con precisión la disposición de las diferentes familias de diaclasas sistemáticas. Además, se analizó la continuidad y el desarrollo de las diaclasas, tanto en superficie como en profundidad, facilitando su clasificación según sus dimensiones, lo que a su vez permite evaluar su impacto en el tamaño del bloque natural extraíble. Para la categorización de las dimensiones de las diaclasas, se empleó la categorización de “Muñoz de la Nava *et al.* (1989)”, expresadas en la tabla 3:

Categoría de diaclasa	Continuidad	
	Diaclasas menores (uniflow joints)	Muy baja
Baja		1-3 m.
Diaclasas mayores (major joints)	Media	3-10 m.
	Alta	10-20 m.
Diaclasas principales (master joints)	Muy alta	>20 m.

Tabla 3: Grupos de diaclasas, modificado de Muñoz de la Nava *et al.*, (1989).

Para evaluar el tamaño de los bloques naturales, se determinó el espaciado entre diaclasas de cada familia, considerando este parámetro como el principal factor condicionante. Se realizó un análisis estadístico de los valores medidos directamente en terreno, construyendo para cada familia un histograma de frecuencias ponderadas. En dichos histogramas, se representó, en porcentaje, la suma de los espaciados correspondientes a

cada intervalo respecto a la suma total de los espaciados, de manera que se incorporó tanto el número de diaclasas por intervalo como la longitud de cada espaciado. Los intervalos se definieron siguiendo una escala logarítmica según lo propuesto por Muñoz de la Nava *et al.* (1989), tal como se detalla en la Tabla 4.

Intervalo	Espaciado
0 – 1 m.	Reducido
1 – 2.5 m.	Moderado
2.5 – 6.25 m.	Amplio
6.25 – 15.62 m.	Muy Amplio
> 15.62 m.	Extremadamente amplio

Tabla 4: Intervalos y espaciado de diaclasas, modificado de Muñoz de la Nava *et al.*, (1989).

Para determinar la explotabilidad de los yacimientos, se seleccionaron los intervalos de espaciado de acuerdo con el tamaño mínimo de bloque comercial extraído en grandes canteras. Se consideró que un yacimiento es altamente explotable cuando presenta la superposición de a lo más dos familias de diaclasas subperpendiculares: una con espaciado moderado y otra con espaciado amplio, ya que espaciados demasiado reducidos dificultan la extracción de bloques comerciales Muñoz de la Nava (1989). En los casos en que el ángulo entre ambas familias se desvía significativamente de 90°, se aplicaron factores de corrección. La densidad del diaclasado se expresó mediante el parámetro J_v , que indica el número de diaclasas por unidad de volumen, calculado sumando las frecuencias de las familias existentes, es decir, el número de diaclasas por metro lineal. Finalmente, los tamaños de bloques naturales se determinaron según los criterios establecidos por Muñoz de la Nava (1989), como se muestra en la Tabla 5.

J_v	Tamaño orientativo del bloque	
<1.7	Grande	Bloque comercial
1.7	Óptimo	
2.2	Aceptable	Bloque no comercial
>2.2	No aceptable	

Tabla 5: Tamaño de los bloques, modificado de Muñoz de la Nava *et al.*, (1989).

Para garantizar que los bloques con potencial de extracción alcanzaran un tamaño comercial aceptable, se consideró que ellos debía presentar espaciados amplios en el rango de 2,5 a 6,5 metros. Asimismo, se evaluó que estas familias fueran aproximadamente

perpendiculares entre sí, dado que la orientación influye directamente en la forma y estabilidad de los bloques durante la extracción.

4.2.Trabajo de terreno

De forma preliminar se realizó un recorrido de la **zona de estudio**, donde se preseleccionaron 4 puntos con alto potencial de canterabilidad, estos puntos fueron registrados en la tabla 6:

N°	Norte	Este
1	6946042	398190
2	6946884	397144
3	6947129	397554
4	6945231	396708

Tabla 6: Registro espacial de los puntos preseleccionados.

Los cuatro puntos preseleccionados presentan diferencias en su accesibilidad, destacando el punto 4 como el de acceso más complicado, al cual se llega a través de la ruta C-525. Estos puntos se representan en la figura 11.

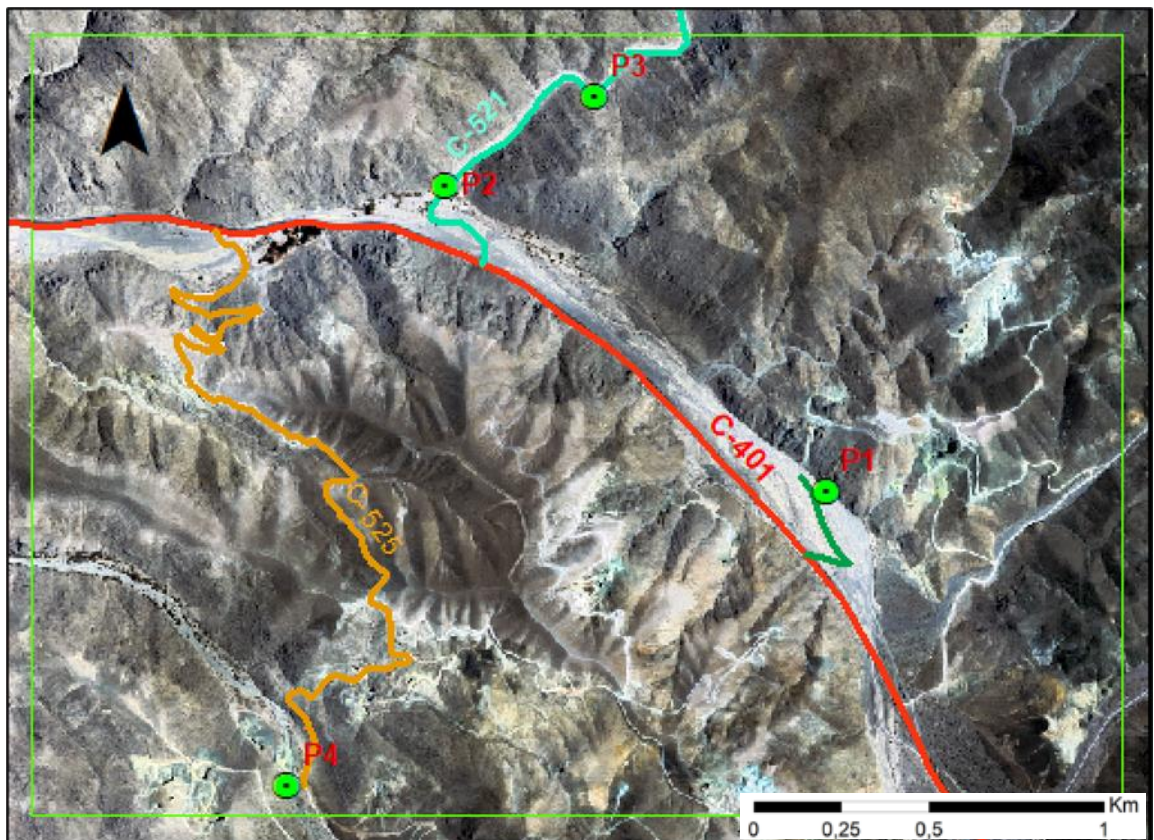


Figura 11: Selección de posibles puntos canterables y sus accesos.

4.2.1 Levantamiento de información

4.2.1.1 Planificación de vuelo UAV

Para el vuelo fotogramétrico se utilizó el dron DJI Mavic 2 Zoom (figura 12), este dron posee una cámara Test_Pro de 4.386 mm, estos datos son descritos en la tabla 7.



Figura 12: Dron modelo Mavic 2 zoom.

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
Test_Pro (4.386mm)	4000 x 2250 píxeles	4.386 mm	1.72 x 1.72 micras

Tabla 7: Tabla resumen con las características de la cámara del dron Mavic 2 zoom.

Para la planificación del vuelo del dron se utilizó la App DJI PILOT, en ella se establecieron los parámetros principales para el vuelo, como la resolución, superposición, altitud, tiempo de vuelo, distancia al macizo y área a fotografiar. De esta forma se realizó el vuelo aerofotogramétrico considerando aspectos de seguridad y con licencia de Operador RPA otorgada por la DGAC, obteniendo los siguientes resultados expresados en la tabla 8:

Parámetro	P1	P2	P3	P4
Resolución en terreno	6.6 mm/pix	5.8 mm/pix	4.51 mm/pix	3.76 mm/pix
Cantidad de fotografías	76	146	341	176
Altitud media de vuelo	15.8 m	15.4 m	11.4 m	10.1 m
Área cubierta	1110 m ²	1340 m ²	839 m ²	289 m ²
Densidad fotografías/área	0.07 fotografías por m ²	0.11 fotografías por m ²	0.40 fotografías por m ²	0.60 fotografías por m ²

Tabla 8: Parámetros obtenidos para cada uno de los vuelos aerofotogramétricos.

Además de los parámetros, obtenemos una serie de imágenes georreferenciadas (figura 13) que cubren toda el área de interés, esto se ejemplifica en la figura 14.



Figura 13: Ejemplo de imagen obtenida con dron en el punto P4.

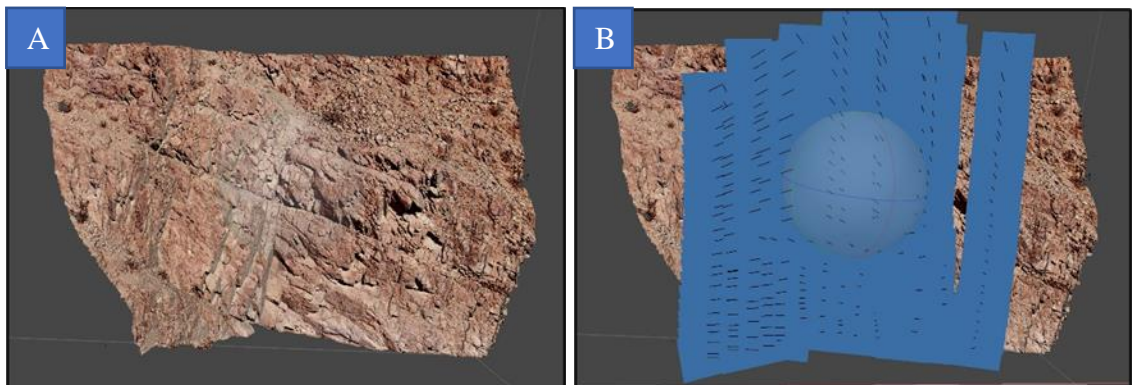


Figura 14: Ejemplo del conjunto de imágenes obtenidas con dron, en A se observa el modelo sin las imágenes y en B con las imágenes.

4.3. Postproceso de imágenes

Para el procesamiento de los datos se utilizó la metodología SfM, en esta se identifican y mapean las principales estructuras geológicas que están presentes en el macizo rocoso. Para efectos prácticos de este trabajo, se realizó el paso a paso ejemplificando para 1 de los 4 puntos de análisis, luego iremos explorando los resultados de para cada uno de ellos.

4.3.1 Creación y exportación del modelo 3D en Agisoft Metashape

Para comenzar con el postproceso, primero, se ingresó al software Agisoft Metashape, una serie de imágenes georreferenciadas tomadas con el dron. Para cada punto de interés, se creó un proyecto distinto y se importan el número de imágenes que corresponda a cada uno, según indica la tabla 8. Se ejemplificará este **postproceso** utilizando la información obtenida del punto 1, en la figura 15 se observa una vista frontal del modelo 3D creado (50x20 m) a través del postproceso de las imágenes para esto se usaron los siguientes pasos en el software Agisoft Metashape:

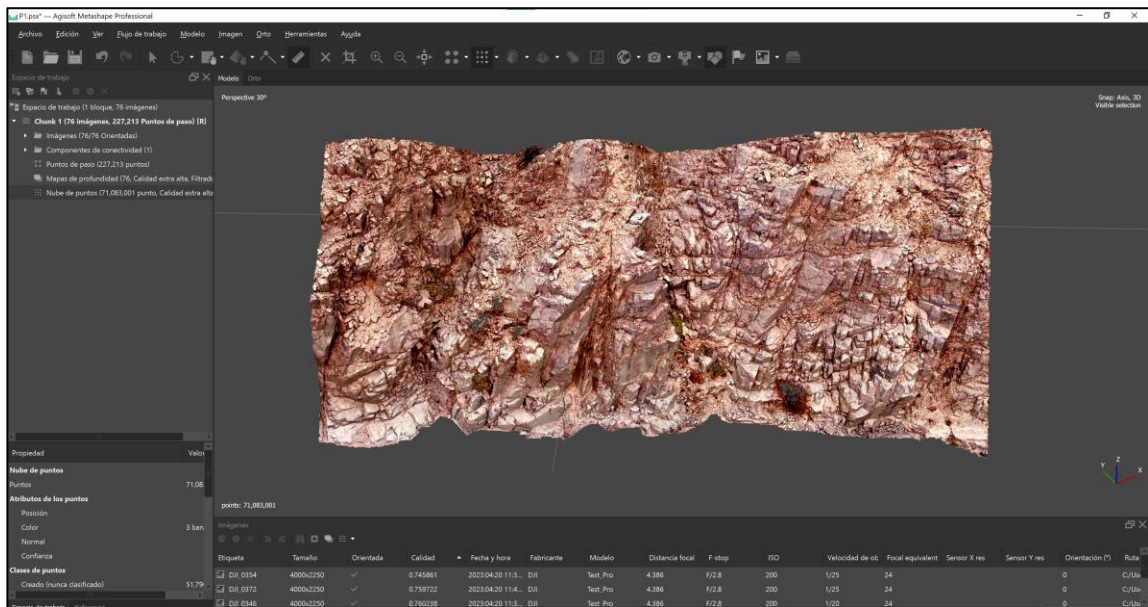
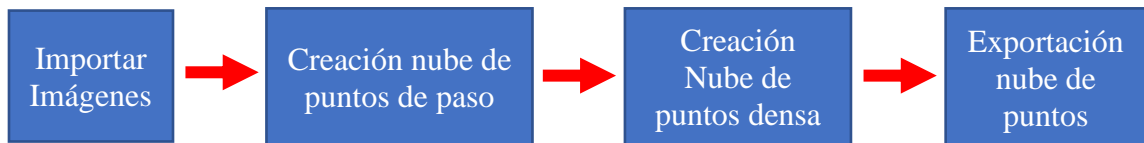


Figura 15: Ejemplo de nube de puntos densa obtenida del punto 1.

Una vez creados los modelos 3D estos se exportaron en formato .las para poder ser importados en el software Cloud Compare.

4.3.2 Importación, submuestreo y exportación del modelo en Cloud Compare

Compare

Una vez creada la nube de puntos densa, ésta se importó en el software Cloud Compare y posteriormente se submuestreo (figura 16) para que el análisis de los datos sea más fácil realizar en el software DSE.

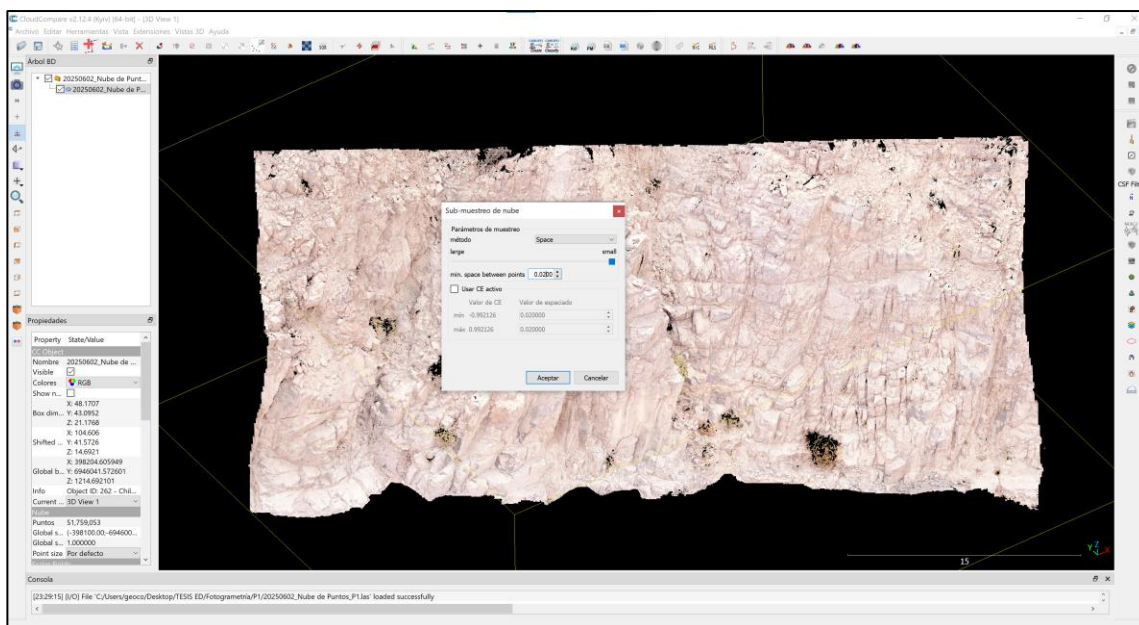


Figura 16: Proceso de submuestreo en el software Cloud Compare a 2 cm.

Este submuestreo se realizó con una densidad de 2 cm (figura17) para todos los modelos, según la tabla 8 existe una densidad distinta de fotografías por metro cuadrado, por lo que al crear las nubes de puntos estas concentraron mayor cantidad de puntos según mayor fuera la cantidad de fotografías por m^2 para cada nube de puntos creada dependiendo del punto de análisis. La cantidad de puntos para cada sector y su posterior submuestreo se representa en la tabla 9:

Sector de análisis	Densidad Fotografías (foto/ m^2)	Resolución (mm/pix)	Densidad de Puntos de la Nube	Densidad de puntos submuestreados
P1	0.07	6.6	51.759.053	2.839.176
P2	0.11	5.8	53.687.530	2.479.608
P3	0.40	4.51	107.719.536	2.828.619
P4	0.60	3.76	54.472.403	1.039.294

Tabla 9: Información relevante para el procesamiento de la nube de puntos en el software DSE.

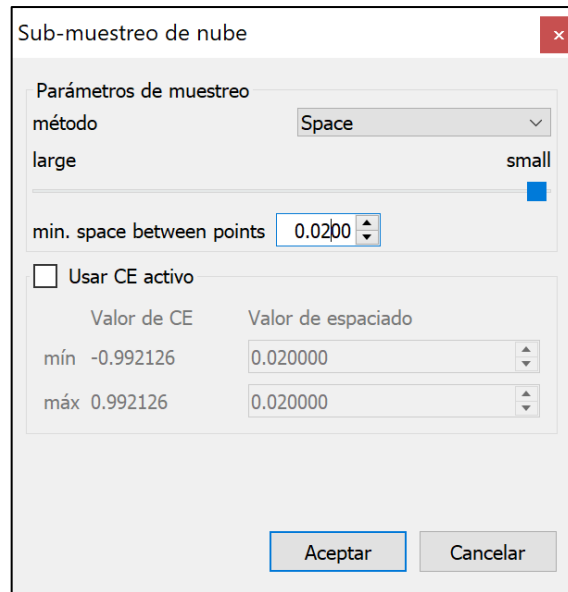


Figura 17: Parámetros de submuestreo de la nube de puntos densa en Cloud Compare.

Una vez submuestreada la nube de puntos, se exportó en formato .ASCII cloud, ya que, este es el formato con el que se importó la nube al software Discontinuity Set Stractor (DSE) para su análisis.

4.3.3 Importación y análisis de la nube de puntos en DSE

Una vez importado el modelo 3D en el software DSE, se comenzó el análisis utilizando algunos parámetros de control geométrico, tales como las normales, test de coplanaridad y función de densidad para realizar el reconocimiento de las estructuras principales.

Se utilizó un ángulo de 30° para la clasificación de las estructuras, esto quiere decir, que cada 30 grados de rumbo habrá una familia distinta. A modo de ejemplo, en la figura 18, se observa la clasificación obtenida por el software DSE, en el que se identificaron 6 familias de estructuras. En la figura 19 se observa el diagrama de polos entregado por el software DSE.

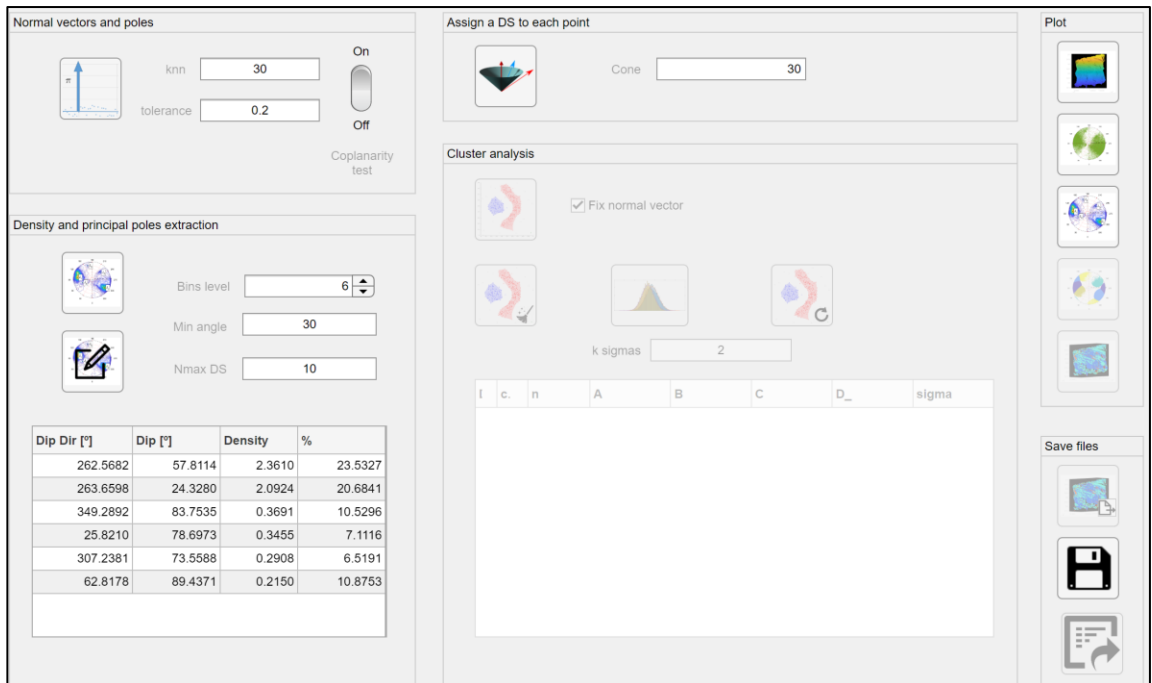


Figura 18: Clasificación de familias de estructuras obtenidas con DSE.

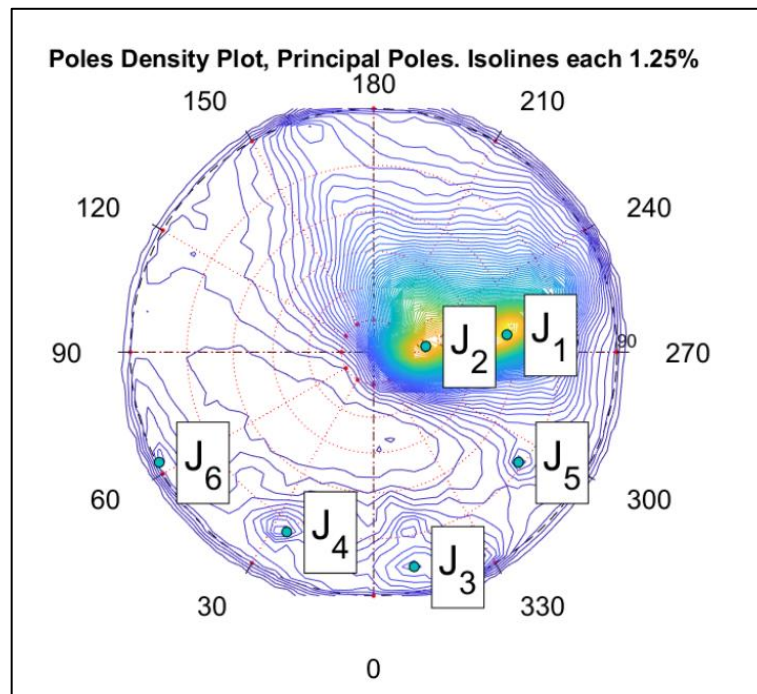


Figura 19: Diagrama de polos donde se muestra la clasificación de las 6 familias de estructuras.

Para la clasificación automática, el software empleó un sistema de preasignación de colores con el fin de identificar y diferenciar las seis familias de estructuras detectadas, tal como se muestra en la Figura 20.

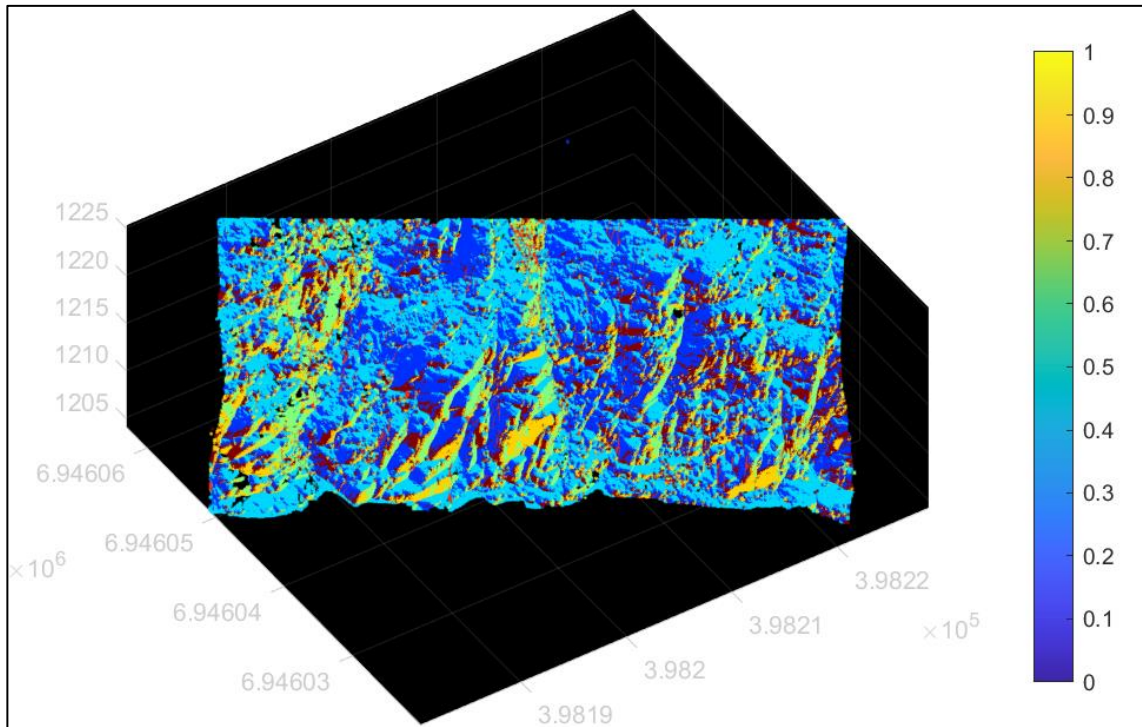


Figura 20: Preasignación de colores para cada una de las familias de estructuras identificadas.

Posteriormente, se aplicó una configuración adicional destinada a la filtración, creación y unión de los clústeres más próximos, con el propósito de obtener la nube de puntos final clasificada según las estructuras, tal como se presenta en las figuras 21, 22 y 23.

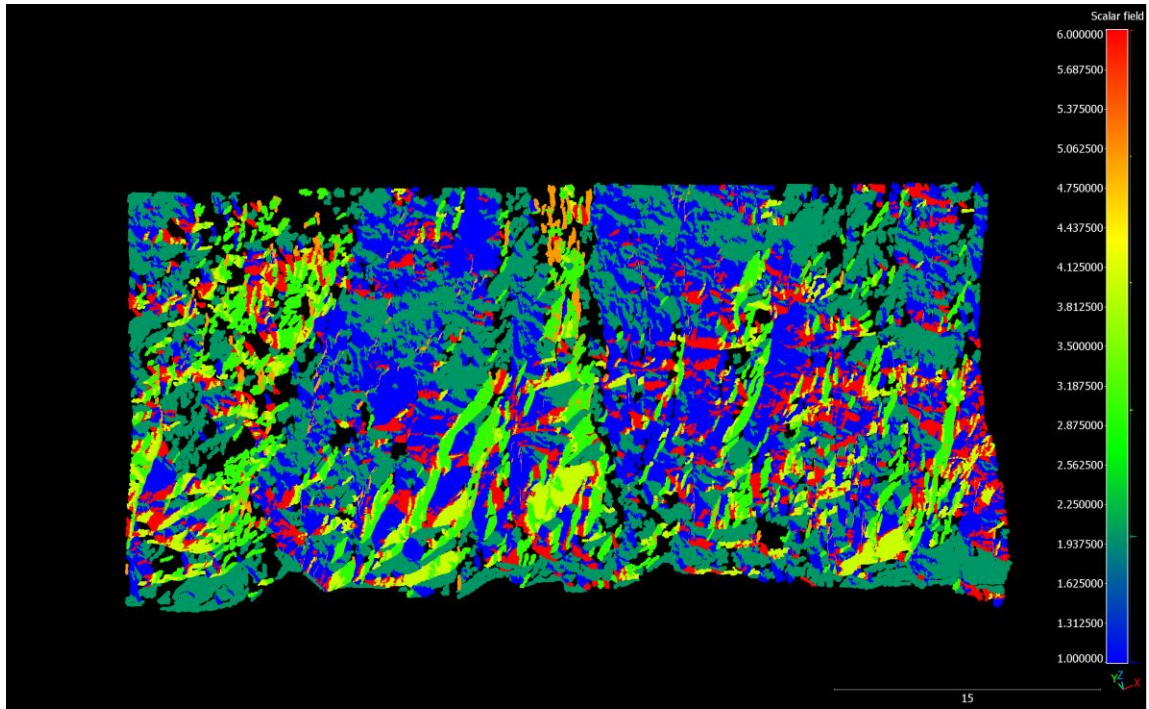


Figura 21: Resultado final de la clasificación de las estructuras del punto 1.



Figura 22: Nube de puntos densa en RGB.

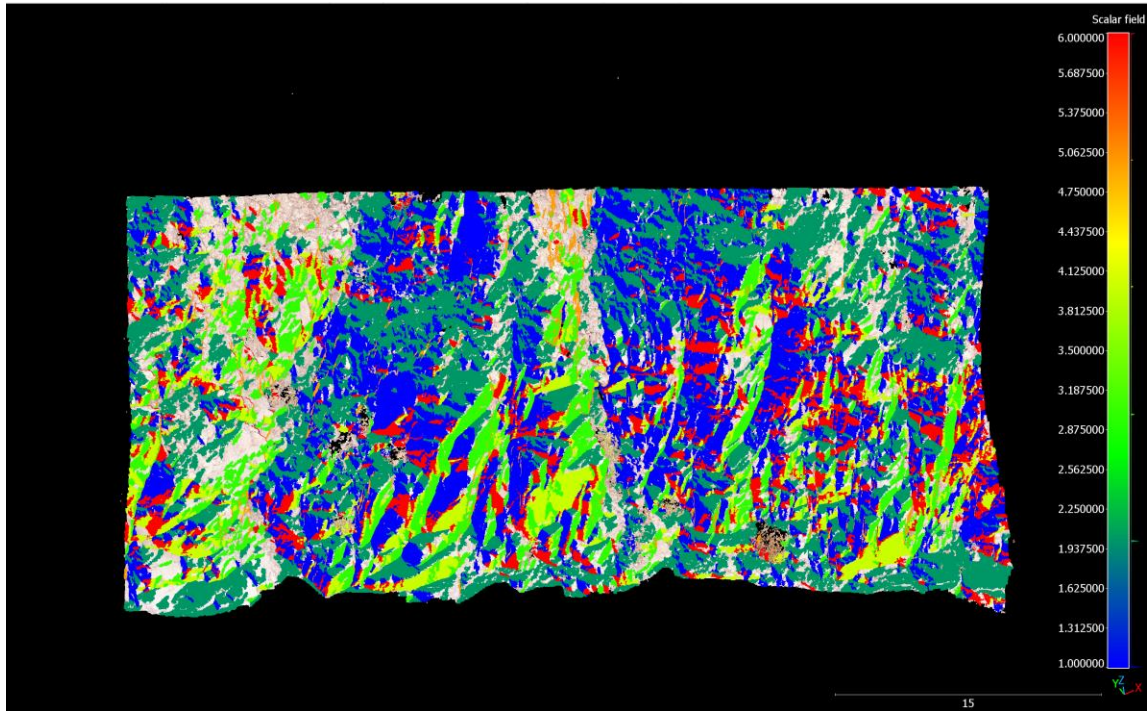


Figura 23: Sobreposición de los clústeres ya clasificados y con asignación de colores sobre la nube de puntos RGB.

De esta forma, se procedió a realizar el análisis de espaciamiento mediante la herramienta Normal Spacing del software DSE, con el objetivo de obtener este parámetro para cada set de estructuras. En la figura 24 se presenta el procedimiento utilizado, mientras que la figura 26 ilustra, a modo de ejemplo, la aplicación del análisis para el primer set (J_1).

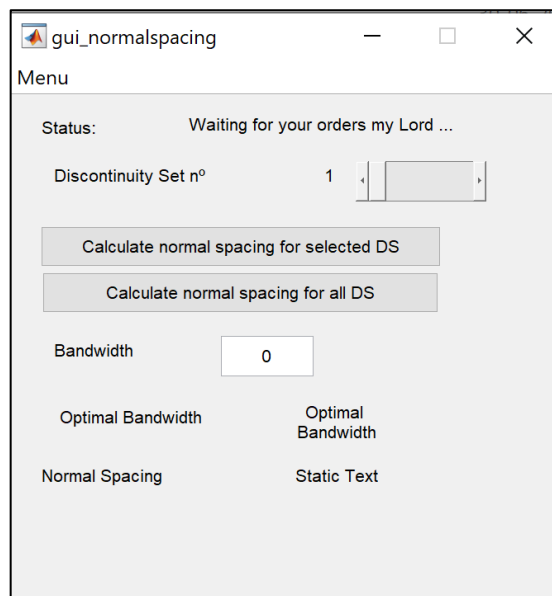


Figura 24: Parámetros para la caracterización automática del espaciamiento para las familias de estructuras.

Se elaboró la representación gráfica del análisis de espaciamiento para el primer set de estructuras mediante el software DSE (Figura 25). En este procedimiento, el eje X del gráfico corresponde al espaciamiento y el eje Y a la función de densidad, considerando tanto las estructuras persistentes como las no persistentes de la familia evaluada.

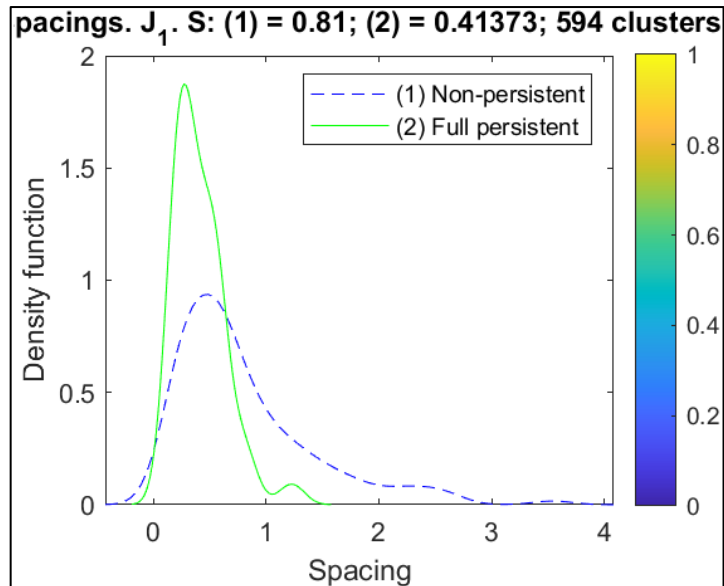


Figura 25: Gráfico que representa el espaciamiento por la función de densidad de las estructuras persistentes y no persistentes.

a) Espaciamiento para el set J_1

El análisis de espaciamiento se realizó considerando dos escenarios de persistencia de las discontinuidades: no persistente (NFP) y completamente persistente (FP).

En el caso NFP, se trabajó con la geometría real de las superficies, que no son continuas e infinitas, sino finitas y distribuidas de manera irregular. Para el caso FP, se asumió que las discontinuidades son completamente continuas e infinitas, lo que genera un mayor número de intersecciones y un espaciamiento menor.

Este parámetro se determinó utilizando la herramienta *Normal Spacing* del software DSE, y su cálculo se basó en la ecuación:

$$S = \frac{L}{n}$$

Donde:

- S es el espaciamiento medio,
- L es la longitud total evaluada,
- n es el número de intersecciones registradas.

b) Cálculo de frecuencia de fractura (JF)

La frecuencia lineal de fractura (JF) se calculó mediante la siguiente relación:

$$JF = \frac{1}{S}$$

Donde:

- S corresponde al espaciamiento medio obtenido para cada escenario de persistencia.

Este cálculo se aplicó para ambos escenarios (NFP y FP) con el fin de comparar la variación de la frecuencia de fractura en función de la persistencia asumida.

c) Cálculo de densidad volumétrica (Jv)

La **densidad volumétrica (Jv)** se obtuvo como la suma de las frecuencias de fractura de todas las familias identificadas:

$$Jv = JF_{\text{set1}} + JF_{\text{set2}} + \dots + JF_{\text{setN}}$$

En este apartado se presentó el cálculo para un set específico como ejemplo metodológico, quedando el valor final de Jv definido una vez incorporados los resultados de todas las familias.

d) Estimación de RQD

La estimación del índice de calidad de la roca (RQD) se realizó siguiendo la fórmula empírica propuesta por Priest & Hudson (1981):

$$RQD = 100 \cdot e^{-0.1 \cdot Jv}$$

Donde:

- Jv es la densidad volumétrica calculada previamente.

Este cálculo se efectuó para ambos escenarios (NFP y FP) con el objetivo de evaluar la influencia de la persistencia en la estimación de la calidad del macizo rocoso.

Para que los resultados se ajusten más a la realidad, el análisis de los datos se realizará usando el espaciamiento completamente persistente (FP).

La metodología descrita se aplicó de manera sistemática a todas las familias de discontinuidades presentes en los cuatro sectores analizados. Para cada set, se identificaron las familias de diaclasas, se determinó el espaciamiento, la frecuencia de fractura, la densidad volumétrica y el RQD, considerando los dos escenarios de persistencia.

Estos parámetros constituyen la base para la evaluación geomecánica del macizo, permitiendo estimar el potencial de canterabilidad y la factibilidad de extracción de bloques con valor comercial.

5. Resultados

5.1.Desarrollo de un modelo digital de terreno (MDT) a partir de datos fotogramétricos

A continuación, se presentan para cada uno de los sectores en estudio, los modelos digitales de terreno obtenidos a través del procesamiento fotogramétrico con imágenes obtenidas a través de dron:

5.2.Sector 1

Para el sector 1, representado en la figura 26, el MDT que contiene 76 fotografías tomadas a una altura promedio de 15.8 m, con una resolución de 6.6 mm/pix, en un área de 1110 m² y una densidad de 0.07 fotografías/ m².

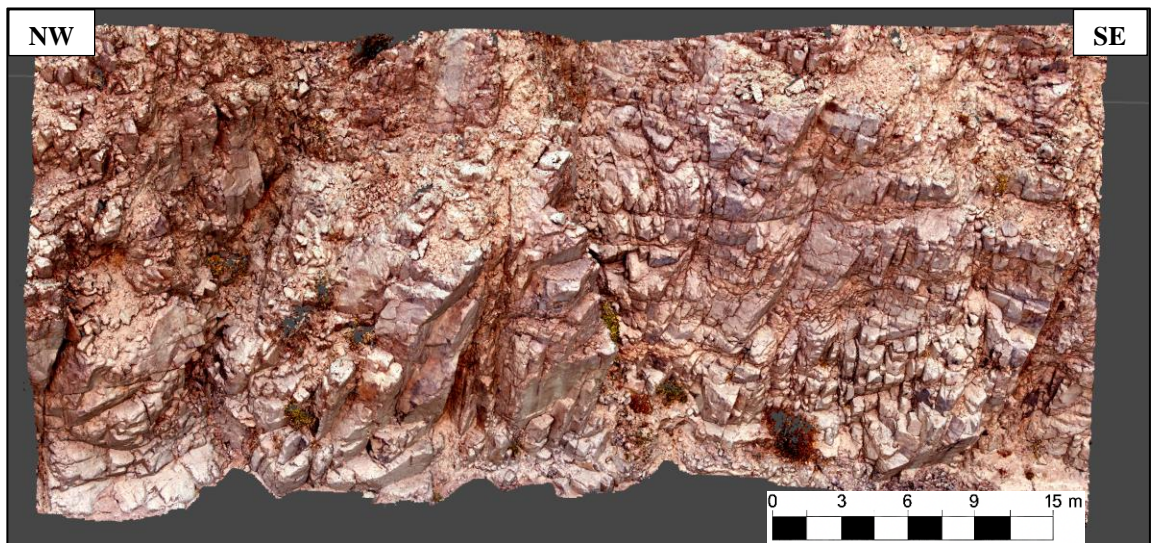


Figura 26: MDT construido a través de fotogrametría para el sector 1 de estudio. La orientación de la vista del modelo 3D es NW-SE.

5.2.1 Clasificación de estructuras sector 1

A continuación, en las imágenes 27, 28 y 29, se puede observar la clasificación realizada a los planos presentes en el MDT. La clasificación realizada permite poder diferenciar 6 familias de estructuras para el sector 1.

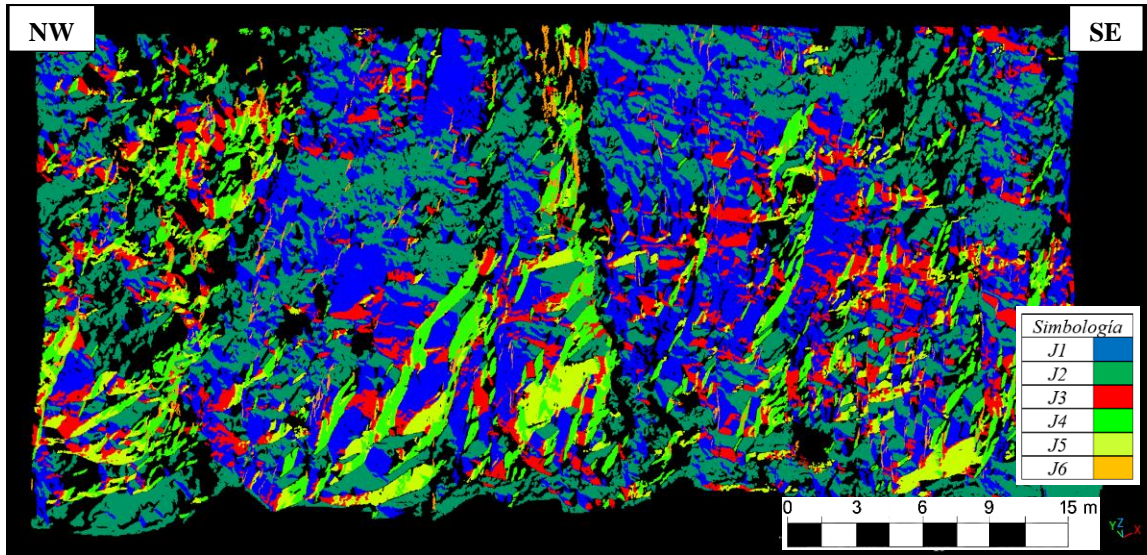


Figura 27: Vista frontal del modelo 3D con la clasificación de las 6 familias de estructuras para el sector 1, se observan los siguientes colores: verde claro(J4), amarillo(J5), rojo(J3), azul(J1), verde oscuro(J2) y anaranjado(J6). La orientación de la vista del modelo 3D es NW-SE.

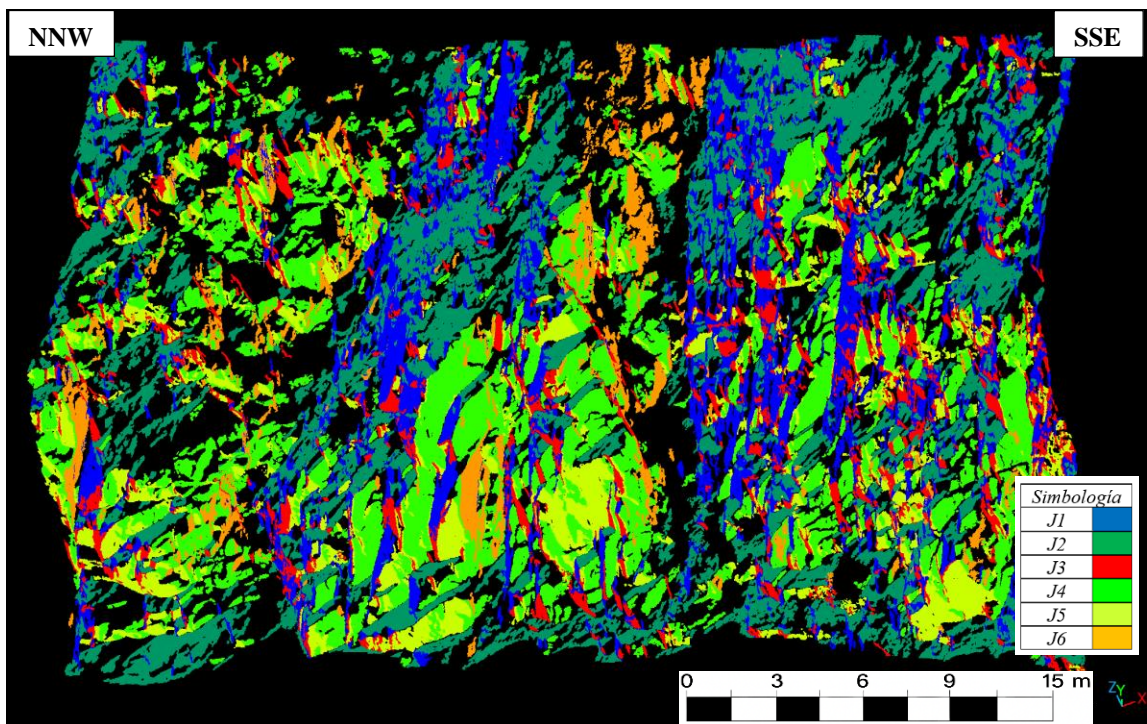


Figura 28: Vista frontal derecha del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es NNW-SSE.

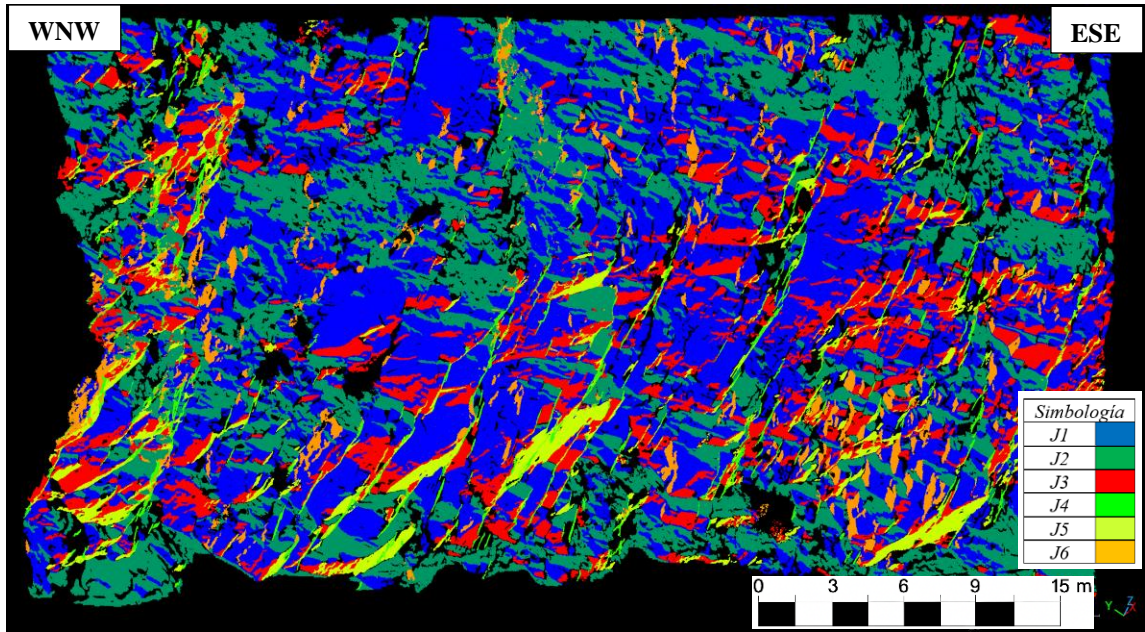


Figura 29: Vista frontal izquierda del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es WNW-ESE.

5.3.Sector 2

Para el sector 2, se representa en la figura 30, el MDT que contiene 146 fotografías tomadas a una altura promedio de 15.4 m, con una resolución de 5.8 mm/pix, en un área de 1340 m² y una densidad de 0.11 fotografías/ m².

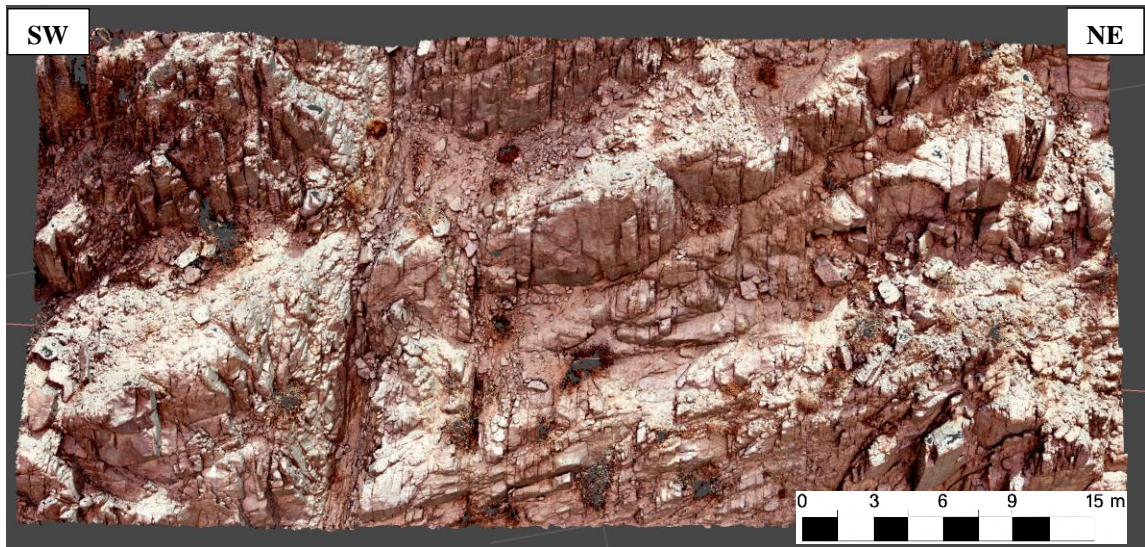


Figura 30: MDT construida a través de fotogrametría para el sector 2 de estudio. La orientación de la vista del modelo 3D es SW-NE.

5.3.1 Clasificación de estructuras sector 2

A continuación, en las imágenes 31, 32 y 33, se puede observar la clasificación realizada a los planos presentes en el MDT. La clasificación realizada permite poder diferenciar 3 familias de estructuras para el sector 2.

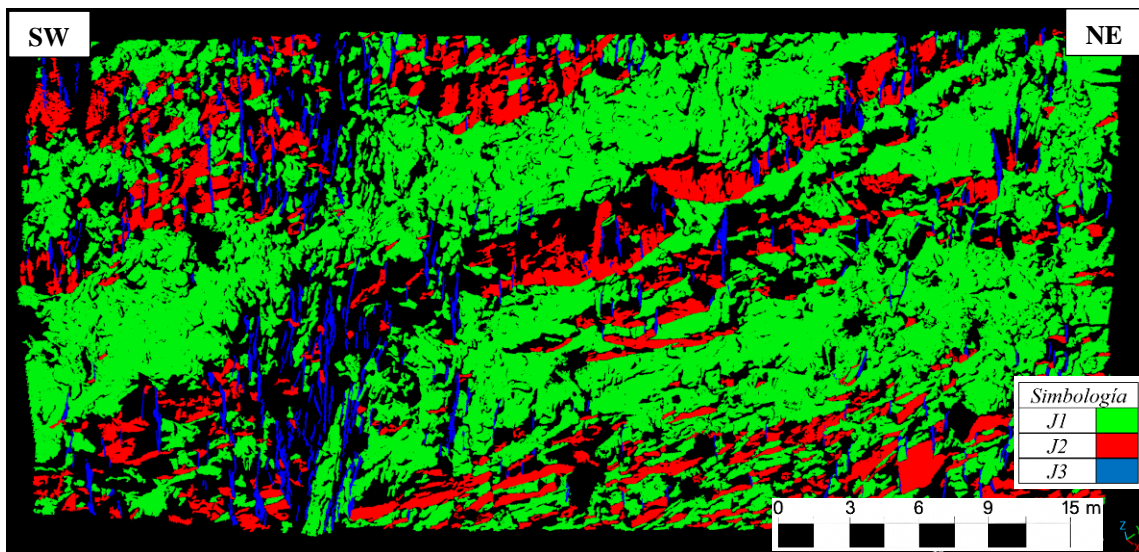


Figura 31: Vista frontal del modelo 3D con la clasificación de las 3 familias de estructuras para el sector 2, se observan los siguientes colores: verde claro (J1), rojo (J2) y azul (J3). La orientación de la vista del modelo 3D es SW-NE.

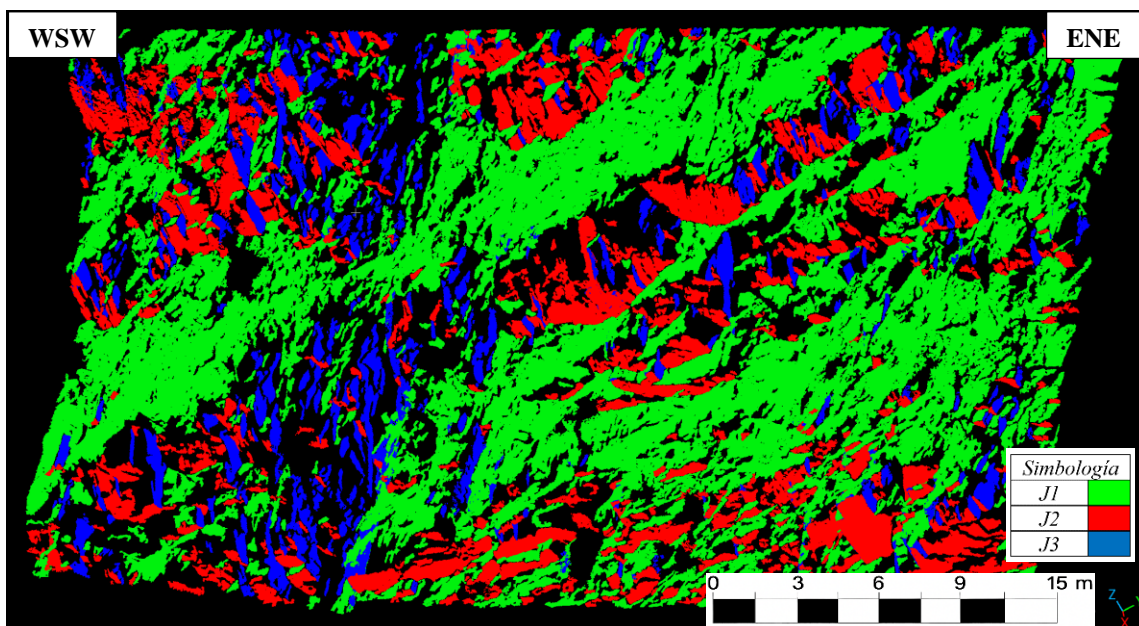


Figura 32: Vista frontal derecha del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es WSW-ENE.

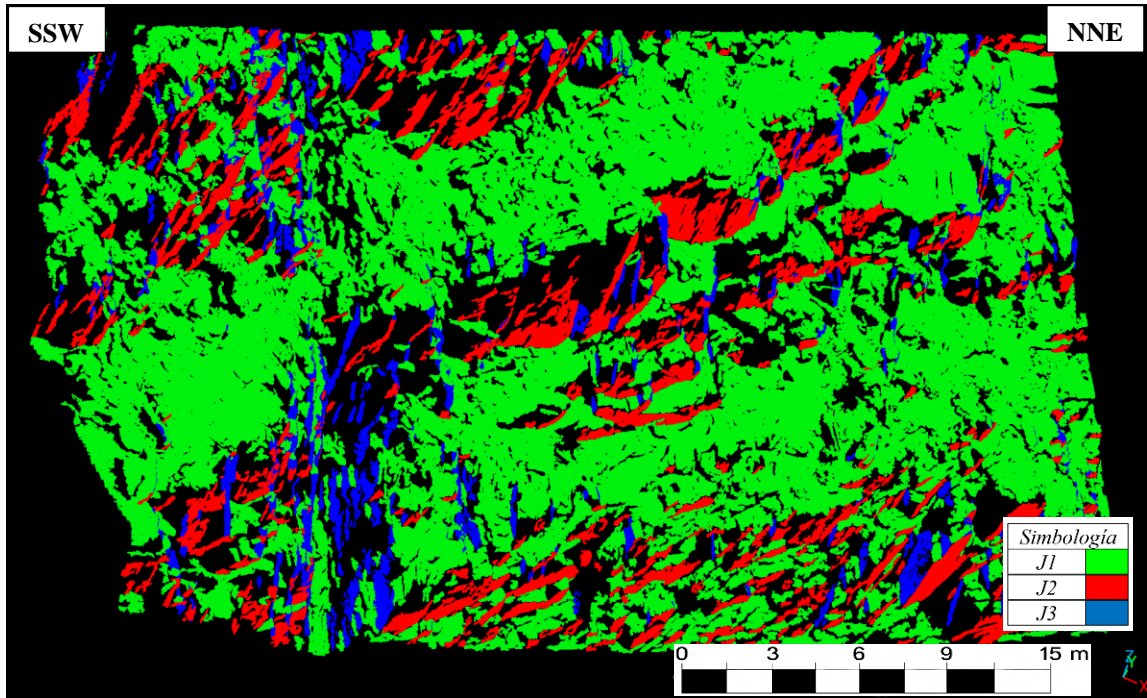


Figura 33: Vista frontal izquierda del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es SSW-NNE.

5.4.Sector 3

Para el sector 3, se representa en la figura 34, el MDT que contiene 341 fotografías tomadas a una altura promedio de 11.4 m, con una resolución de 4.51 mm/pix, en un área de 839 m² y una densidad de 0.40 fotografías/ m².

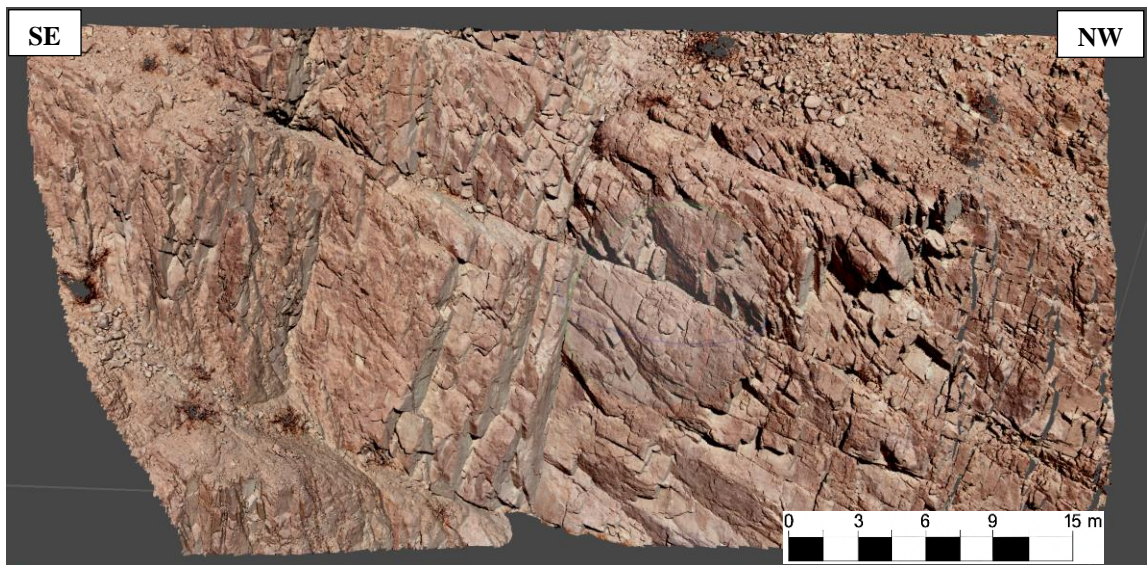


Figura 34: MDT construido a través de fotogrametría para el sector 3 de estudio. La orientación de la vista del modelo 3D es SE-NW.

5.4.1 Clasificación de estructuras sector 3

A continuación, en las imágenes 35, 36 y 37, se puede observar la clasificación realizada a los planos presentes en el MDT. La clasificación realizada permite poder diferenciar 4 familias de estructuras para el sector 3.

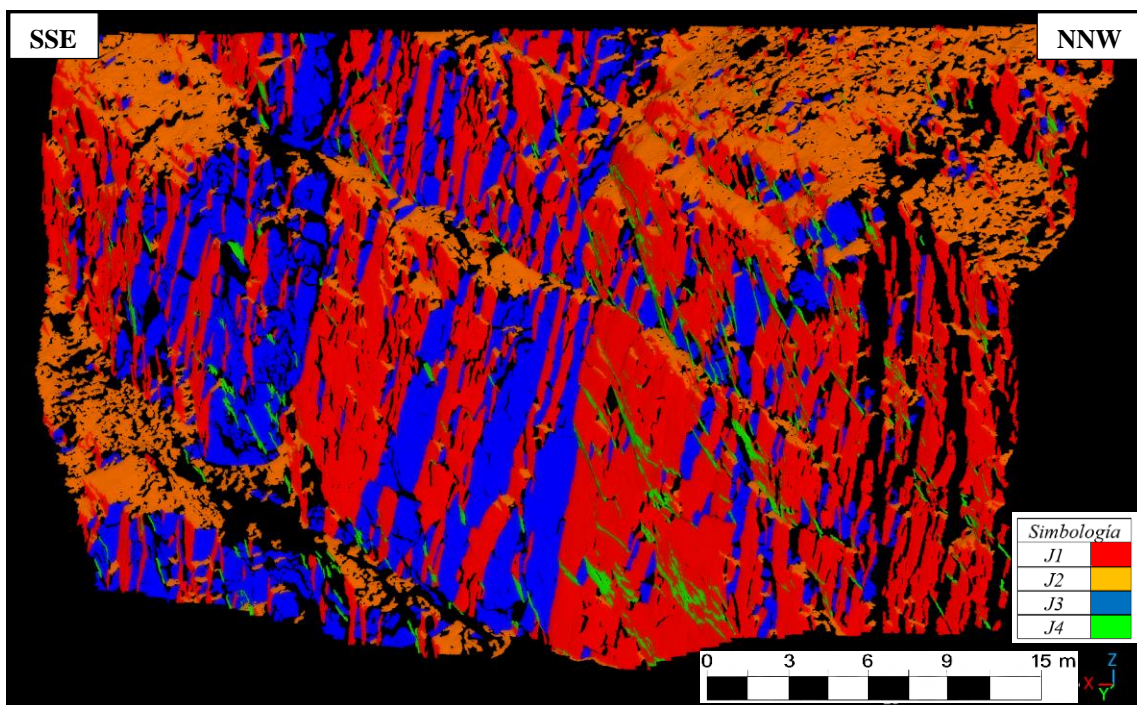
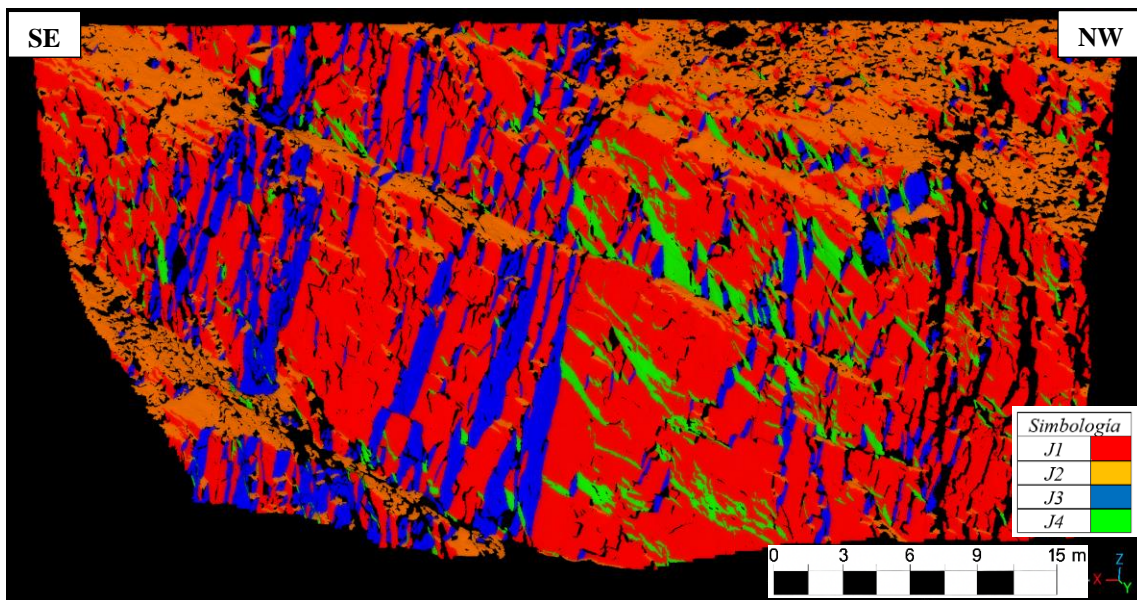


Figura 36: Vista frontal derecha del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es SSE-NNW.

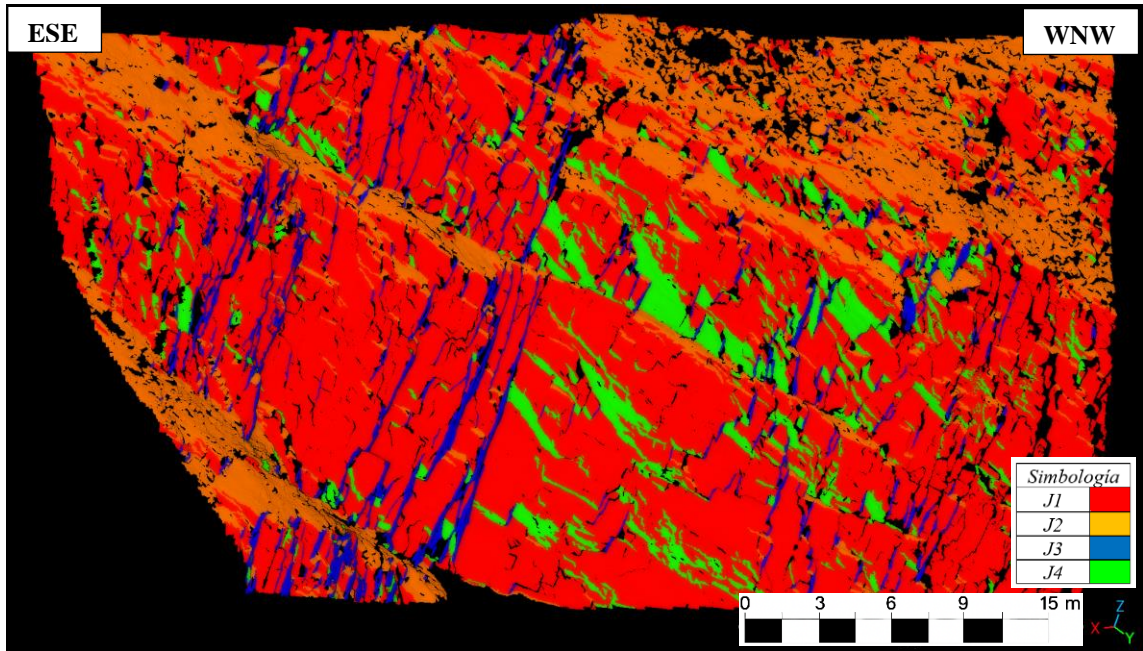


Figura 37: Vista frontal izquierda del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es **ESE-WNW**.

5.5.Sector 4

Para el sector 4, se representa en la figura 38, el MDT que contiene 176 fotografías tomadas a una altura promedio de 10.1 m, con una resolución de 3.76 mm/pix, en un área de 289 m² y una densidad de 0.60 fotografías/ m².

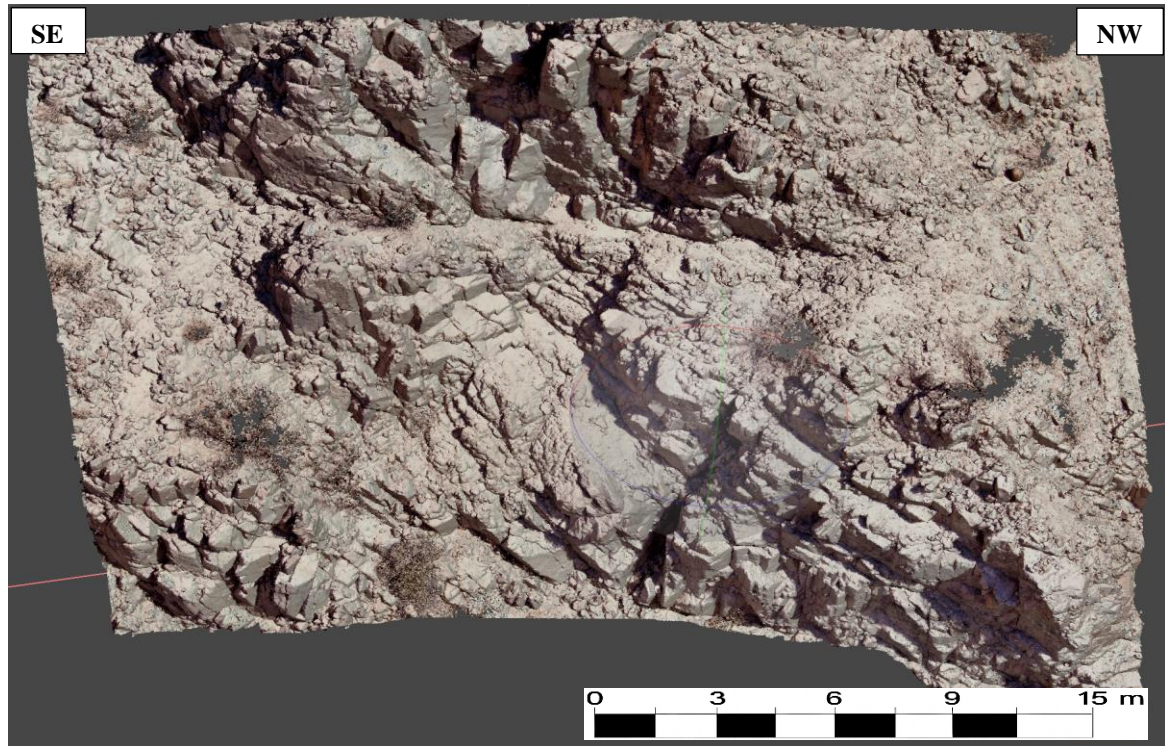


Figura 38: MDT construida a través de fotogrametría para el sector 4 de estudio. La orientación de la vista del modelo 3D es SE-NW.

5.5.1 Clasificación de estructuras sector 4

A continuación, en las imágenes 39, 40 y 41, se puede observar la clasificación realizada a los planos presentes en el MDT. La clasificación realizada permite poder diferenciar 3 familias de estructuras para el sector 4.

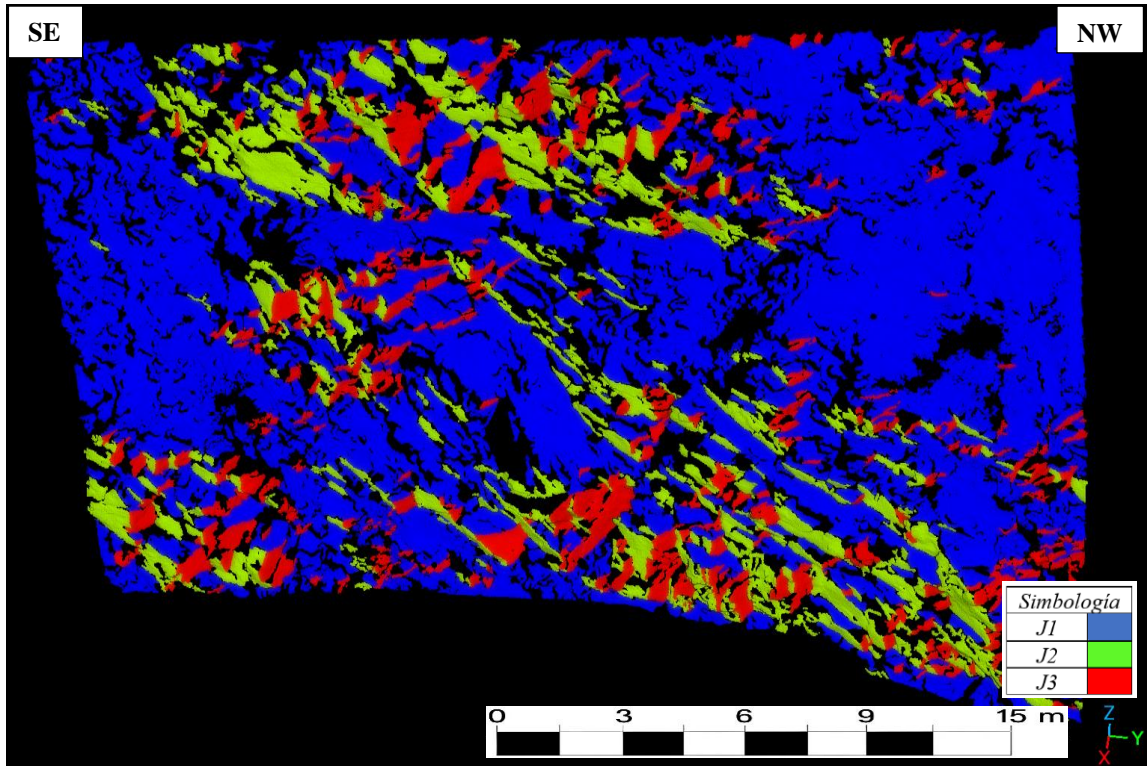


Figura 39: Vista frontal del modelo 3D con la clasificación de las 3 familias de estructuras para el sector 4, se observan los siguientes colores: verde claro(J2), rojo(J3) y azul(J1). La orientación de la vista del modelo 3D es SE-NW.

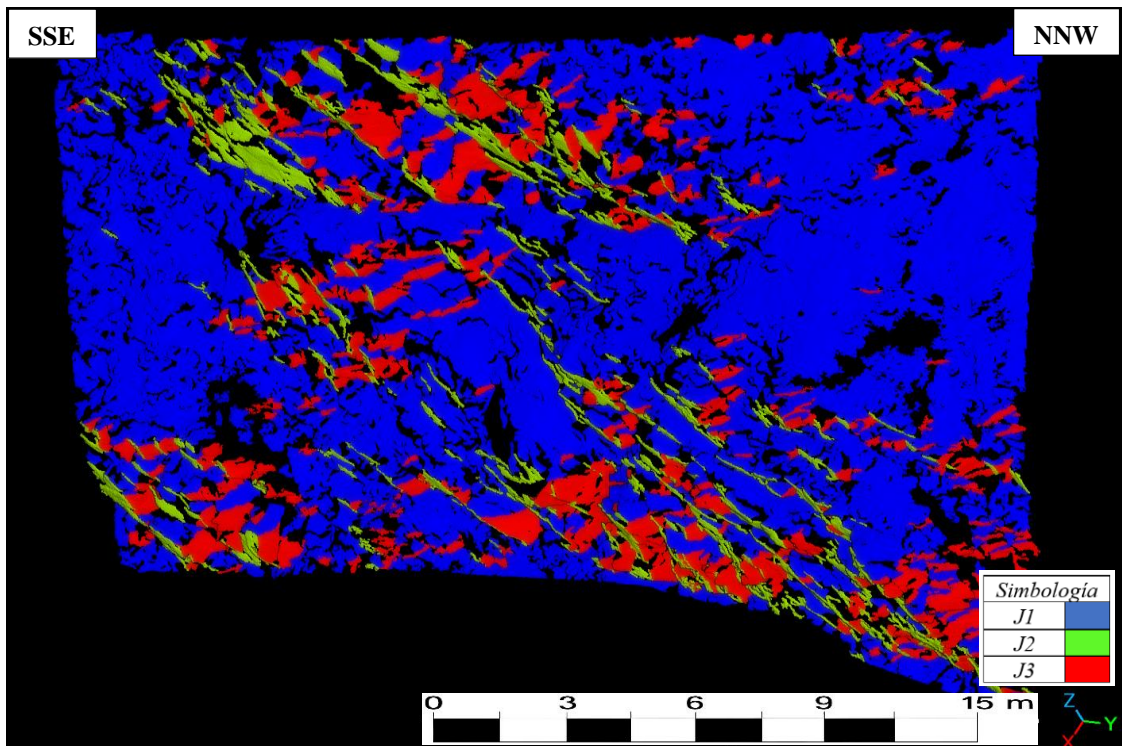


Figura 40: Vista frontal derecha del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es SSE-NNW.

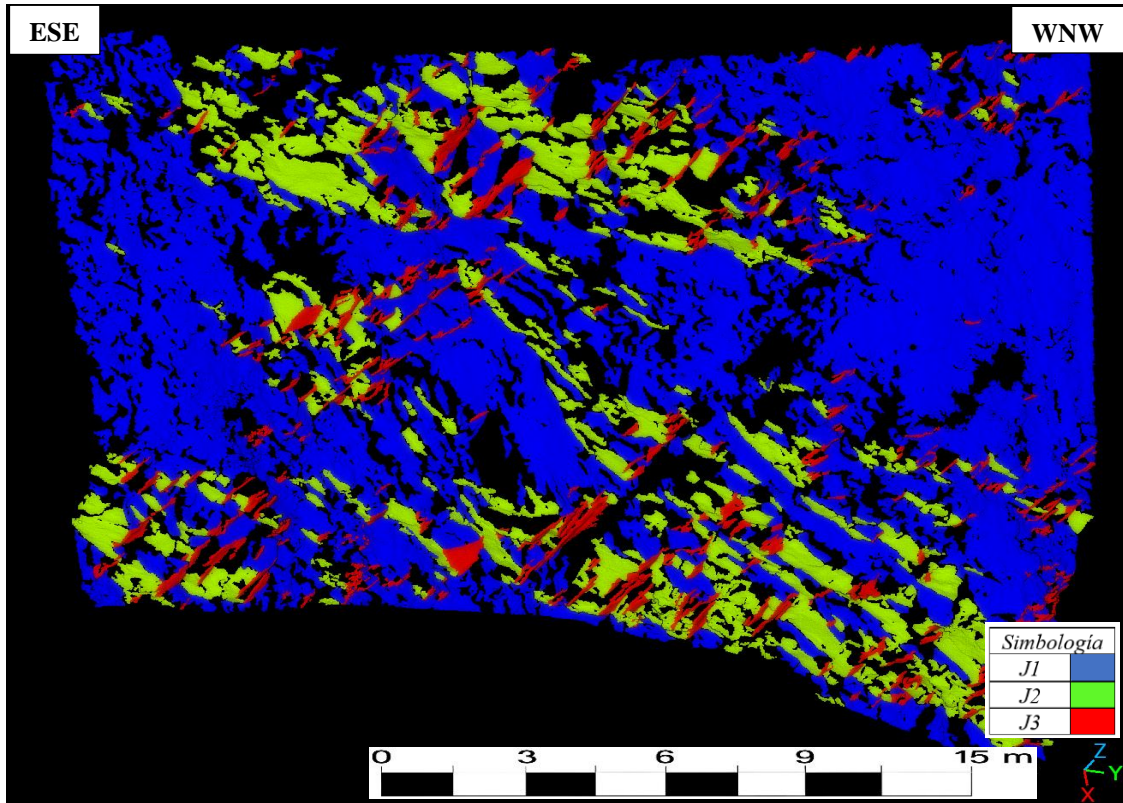


Figura 41: Vista frontal izquierda del modelo 3D con las familias de estructuras clasificado. La orientación de la vista del modelo 3D es **ESE-WNW**.

5.6. Análisis estructurales para cada sector

Las familias de las estructuras identificadas son representadas mediante sus orientaciones medias con notación de dirección de buzamiento y buzamiento, diagrama de polos y de rosetas, además, estos fueron divididos por sector para una mejor observación de los resultados, estos se representan a continuación:

5.6.1 Sector 1

5.6.1.1 Determinación de la orientación de estructuras aflorantes en el macizo rocoso

En el Sector 1 del área de estudio, se identificaron seis familias estructurales principales (J1 a J6). Las orientaciones medias de estas estructuras fueron representadas en un diagrama de polos y en un diagrama de rosetas para su interpretación visual (figuras 42, 43 y 44).

La Tabla 10, resume los resultados obtenidos para cada familia estructural, indicando su dirección de buzamiento, buzamiento, clasificación geométrica y densidad de fracturas.

Familia	Dip dir	Dip	Clasificación	Densidad (%)
J1	262.57°	57.81°	subvertical	29.69
J2	263.66°	24.33°	subhorizontal	26.10
J3	62.82°	89.44°	vertical	13.72
J4	349.29°	83.75°	vertical	13.29
J5	25.82°	78.70°	subvertical	8.97
J6	307.24°	73.56°	subvertical	8.23

Tabla 10: Resultados obtenidos para las 6 familias de estructuras para el sector 1.

El patrón estructural del sector revela una familia subvertical dominante (J1) con rumbo W-SW ($\sim 262,6^\circ$) y buzamiento de $57,8^\circ$, que concentra casi un tercio de los puntos analizados. La familia subhorizontal J2 (buzamiento $24,3^\circ$) constituye el segundo aporte en densidad de puntos (26,10 %). Las familias J3 y J6 presentan buzamientos superiores a 80° y se clasifican como verticales, mientras que J5 y J6 son subverticales con buzamientos entre 73° y 79° . En conjunto, las familias muy inclinadas (J3 al J6) suman cerca del 36 % de los puntos, generando un sistema de fracturamiento vertical que intercepta a las juntas subverticales y subhorizontales.

A continuación, en la figura 42 se representa un diagrama de polos que concentra la totalidad de las estructuras presentes en el sector 1, mientras que las figuras 43 y 44 representan los valores promedios para cada familia de fractura.

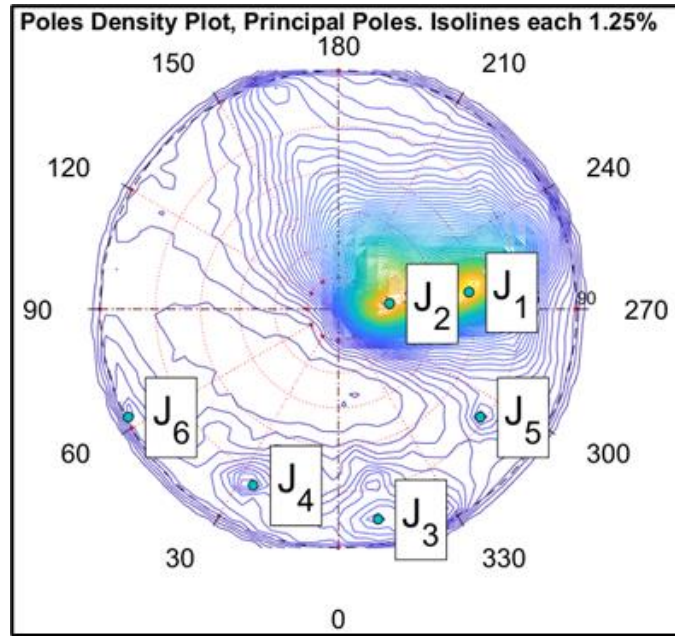


Figura 42: Diagrama de polos que contiene todas las estructuras del sector 1 obtenida del software DSE. Se observa a J1 y J2 como las principales familias, mientras que J3, J4, J5 y J6 como estructuras secundarias.

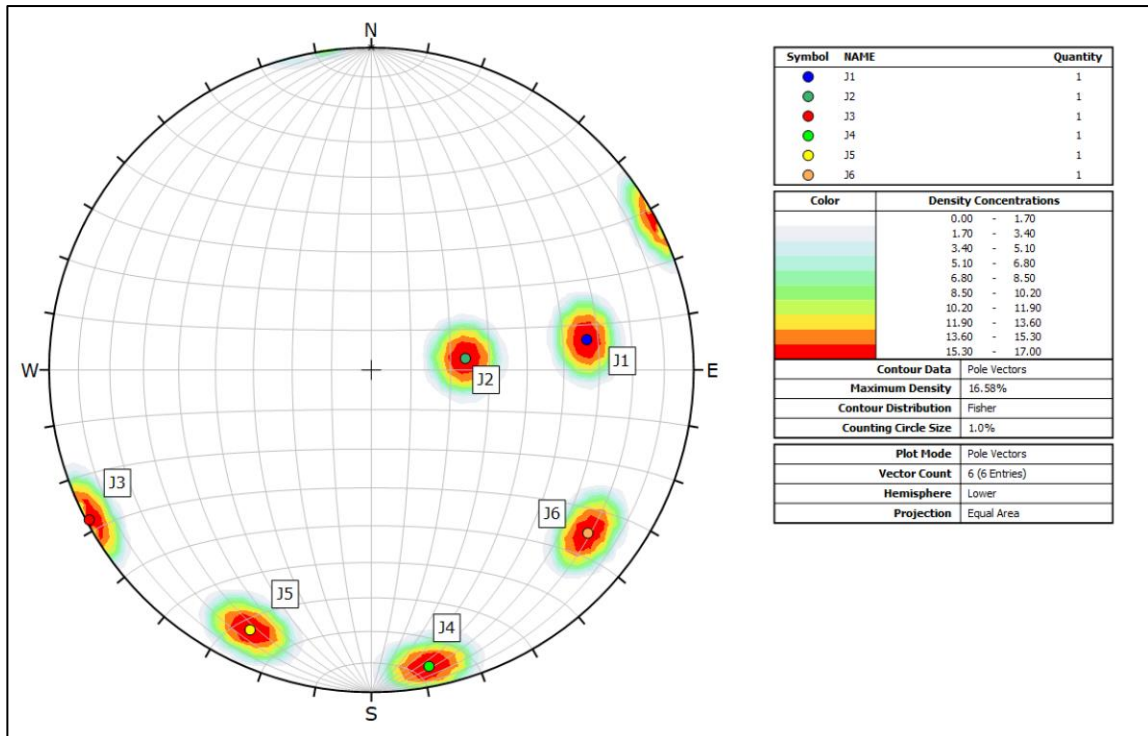


Figura 43: Diagrama de polos de las 6 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 1.

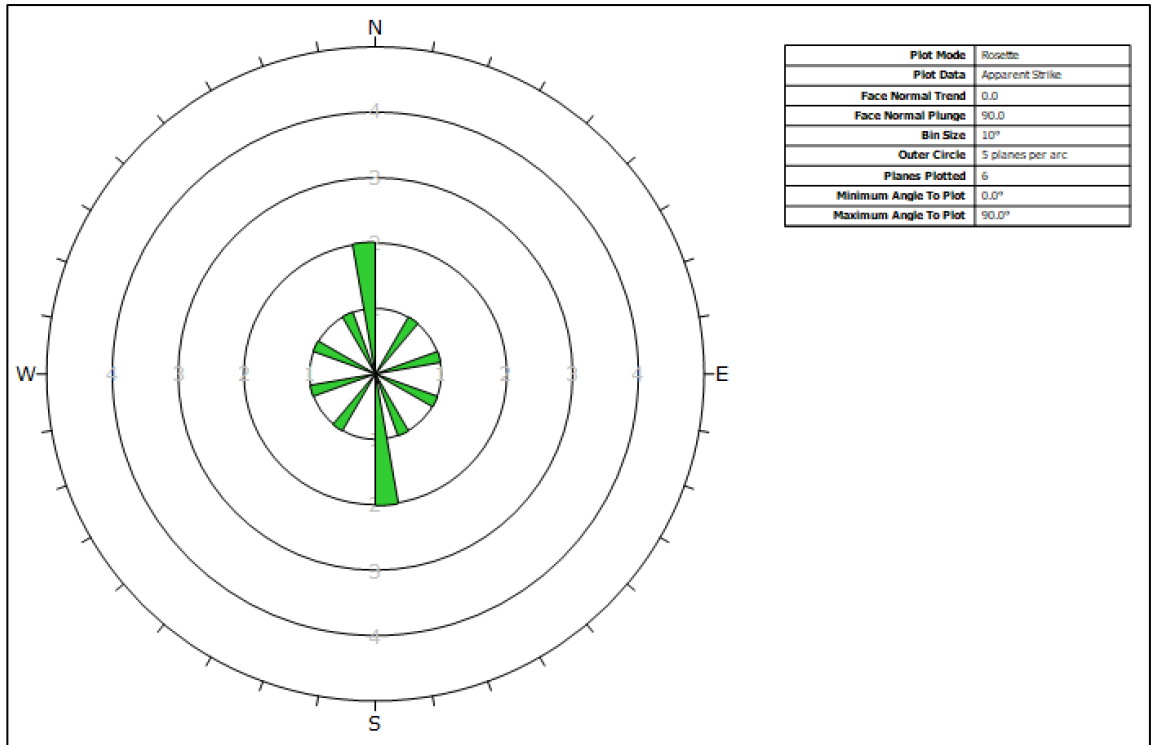


Figura 44: Diagrama de rosetas de las 6 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector I.

5.6.1.2 Caracterización de las propiedades geomecánicas

Se calcularon los valores de espaciamiento, frecuencia lineal (JF), densidad volumétrica de fracturas (Jv) y RQD a partir del análisis de clústeres completamente persistentes (FP).

Los resultados son los siguientes:

Familia	Espaciamiento (m)	JF (1/m)	Jv (1/m ³)	RQD (%)	% Puntos
J1	0.41373	2.417	2.417	78.5	29.69
J2	0.65493	1.527	1.527	85.8	26.10
J3	0.48810	2.049	2.049	81.5	13.72
J4	0.42589	2.348	2.348	79.1	13.29
J5	0.53989	1.852	1.852	83.1	8.97
J6	0.46578	2.147	2.147	80.7	8.23
Total	—	—	12.3399	29.1	100

Tabla 11: Resumen de las principales propiedades geomecánicas de las 6 familias de estructuras del sector I.

Los espaciamientos promedian entre 0,41 m (J1) y 0,65 m (J2). Las familias verticales y subverticales (J1, J3 al J6) presentan espaciamientos más reducidos ($S \approx 0,41-0,54$ m) y, por consiguiente, frecuencias lineales de fractura mayores ($JF \approx 1,85-2,42$ fracturas/m). La familia subhorizontal J2 tiene el espaciamiento medio más alto y la menor intensidad lineal ($JF \approx 1,53$ fracturas/m). Los RQD individuales oscilan entre 78 % y 86 %, esto

representa una roca de calidad moderada si se considera cada set por separado. Sin embargo, al sumar la densidad volumétrica de todas las familias ($J_v \approx 12,34 \text{ m}^{-3}$), el RQD total se reduce a $\sim 29 \%$, evidenciando un macizo muy fracturado cuando se contemplan simultáneamente todas las juntas.

Para entender el espaciamiento de cada familia de estructuras, a continuación, en la figura 45, se observa la representación para cada una de las familias obtenidas a través del software DSE. La línea verde representa el espaciamiento con las estructuras Full persistencia, para un gráfico de espaciamiento vs densidad, en el que la media está representada por la cúspide de la curva, estos espaciamientos se mencionan en la tabla 11.

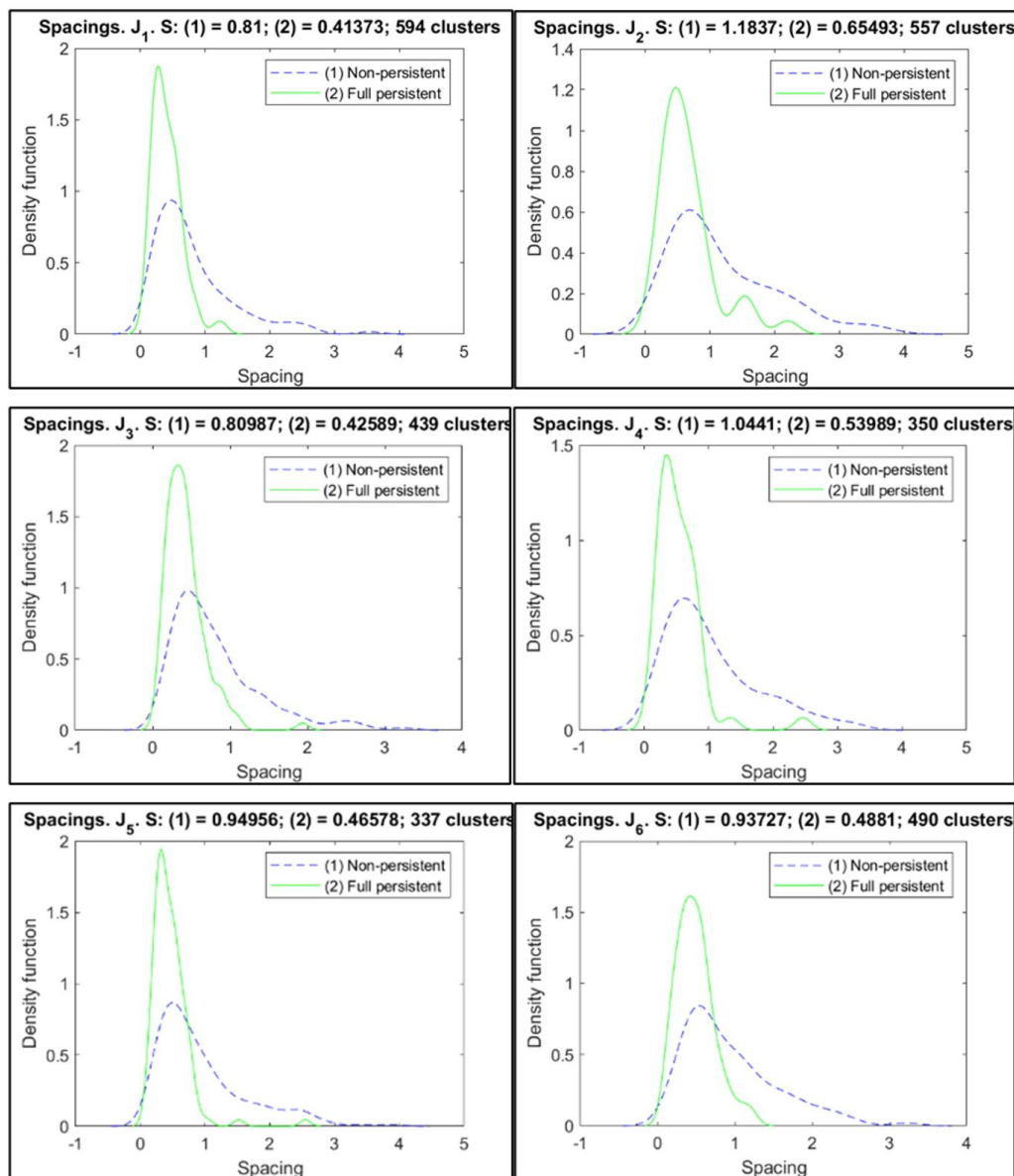


Figura 45: Representación gráfica del espaciamiento para las 6 familia de estructuras del sector 1.

5.6.2 Sector 2

5.6.2.1 Determinación de la orientación de estructuras aflorantes en el macizo rocoso

El análisis de la orientación estructural del Sector 2 revela la presencia de tres familias principales de discontinuidades: J1, J2 y J3. Las orientaciones medias de estas estructuras fueron representadas en un diagrama de polos y en un diagrama de rosetas para su interpretación visual (figura 48 y 49).

La Tabla 12, resume los resultados obtenidos para cada familia estructural, indicando su dirección de buzamiento, buzamiento, clasificación geométrica y densidad de fracturas.

Familia	Dip dir	Dip	Clasificación	Densidad (%)
J1	135.04°	26.53°	Subhorizontal	64.29
J2	297.33°	75.71°	subvertical	22.27
J3	227.20°	82.44°	Vertical	13.44

Tabla 12: Resultados obtenidos para las 3 familias de estructuras del sector 2.

La familia J1 domina el patrón estructural del Sector 2: presenta un buzamiento suave ($\approx 26^\circ$) y concentra más de 64 % de los puntos clasificados. Su orientación subhorizontal sugiere un sistema de fracturas principalmente concordantes con los planos subhorizontales del plutón. Por el contrario, las familias J2 y J3 presentan buzamientos muy altos ($\approx 76^\circ$ y 82° , respectivamente) y se clasifican como vertical y subvertical. Sus densidades ($\approx 22\%$ y 13%) indican que constituyen estructuras secundarias, asociadas a fracturas de corte o diaclasas que cortan el sistema dominante.

A continuación, en la figura 46 se representa un diagrama de polos que concentra la totalidad de las estructuras presentes en el sector 2, mientras que las figuras 47 y 48 representan los valores promedios para cada set de fractura.

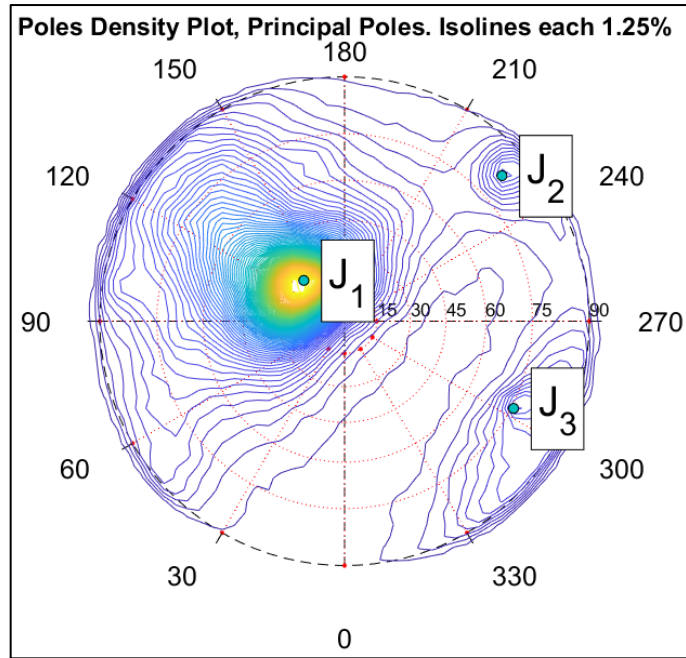


Figura 46: Diagrama de polos que contiene todas las estructuras del sector 2 obtenida del software DSE. Se observa a J1 como la principal familia, mientras que J2 y J3 como estructuras secundarias.

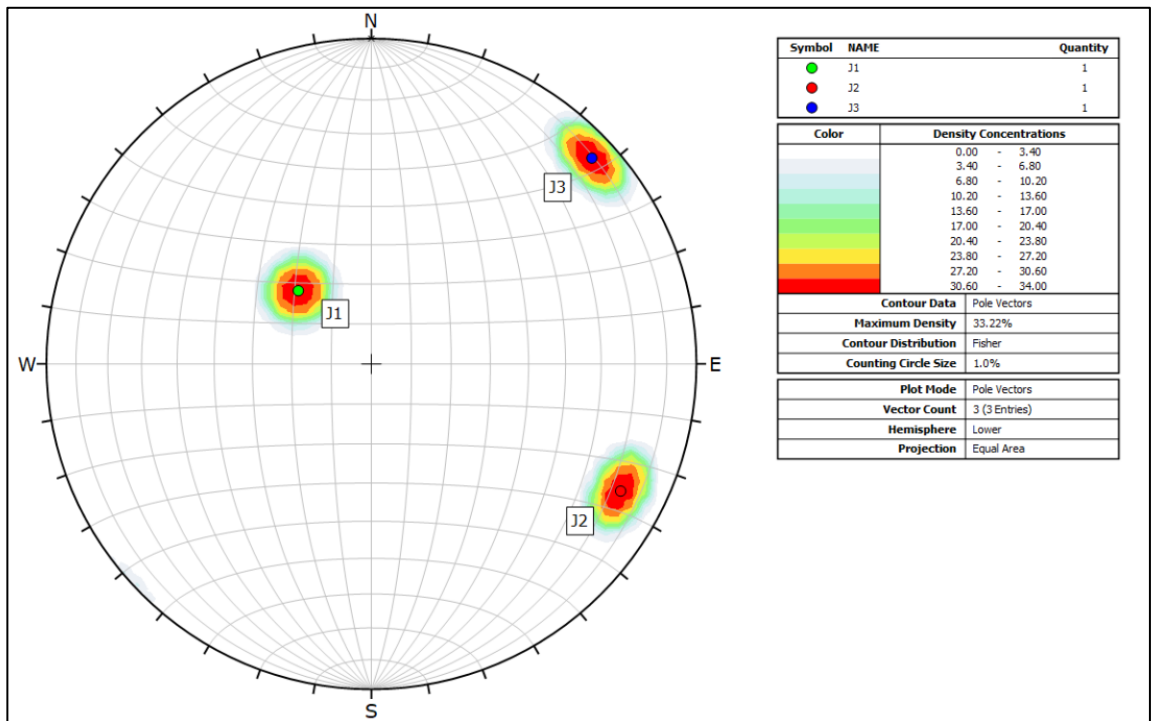


Figura 47: Diagrama de polos de las 3 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 2.

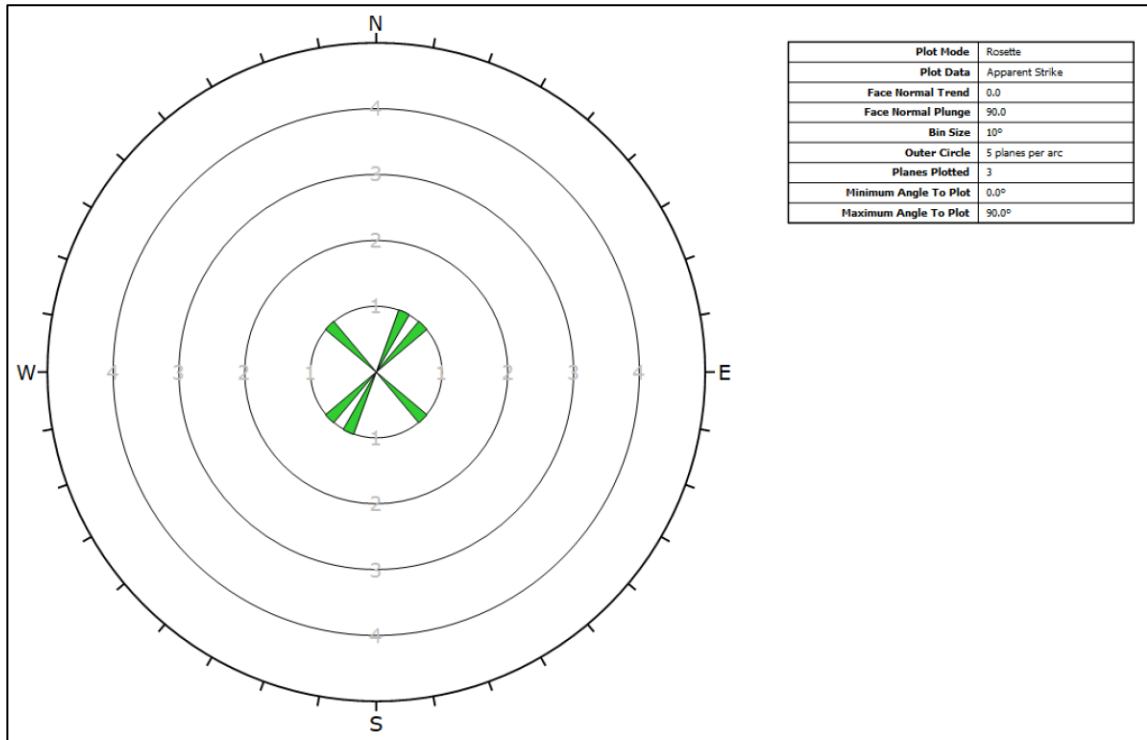


Figura 48: Diagrama de rosetas de las 3 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 2.

5.6.2.2 Caracterización de las propiedades geomecánicas

Se calcularon los valores de espaciamiento, frecuencia lineal (JF), densidad volumétrica de fracturas (Jv) y RQD a partir del análisis de clústeres de full persistencia. Los resultados son los siguientes:

Set	Espaciamiento (m)	JF (1/m)	Jv (1/m ³)	RQD (%)	% Puntos
J1	0.58596	1.707	1.707	84.3	64.29
J2	0.49556	2.018	2.018	81.7	22.27
J3	0.34902	2.865	2.865	75.1	13.44
Total	–	–	6.590	51.7	100.00

Tabla 13: Resumen de las principales propiedades geomecánicas de las 3 familias de estructuras del sector 2.

La familia J3 exhibe el espaciamiento más bajo ($S \approx 0.349$ m) y, en consecuencia, la mayor frecuencia lineal de fracturas ($JF \approx 2.87$ fracturas/m), a pesar de su baja densidad de puntos. Esto se representa como un set de diaclasas muy juntas, pero con menor representatividad superficial. J2 presenta un espaciamiento intermedio (≈ 0.496 m) y una frecuencia de fracturas de ≈ 2.02 fracturas/m. La familia J1, pese a su alta densidad de

puntos, muestra un espaciamiento más amplio (≈ 0.586 m) y una frecuencia lineal de ≈ 1.71 fracturas/m. La densidad volumétrica de fracturas total del macizo ($J_v \approx 6.59$ fracturas/m³) refleja un sistema fracturado moderadamente intenso. La estimación de RQD ≈ 51.7 % (utilizando el J_v total) indica que el macizo rocoso del sector 2 se clasifica dentro de una calidad regular y los bloques resultantes presentarán dimensiones moderadas.

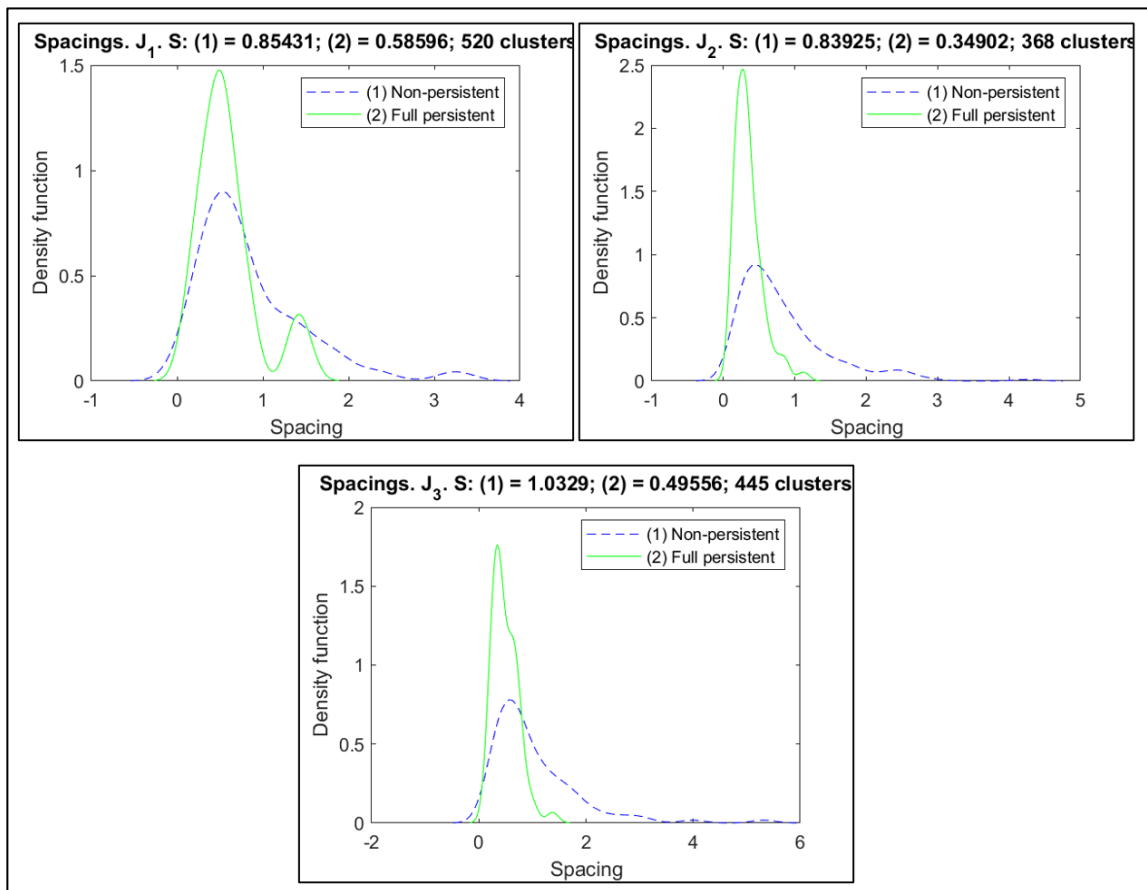


Figura 49: Representación gráfica del espaciamiento para las 3 familia de estructuras del sector 2. La figura muestra las funciones de densidad de espaciamiento obtenidas para cada familia. La curva verde corresponde al espaciamiento calculado con clústeres de full persistencia; la curva azul corresponde al escenario no persistente (NFP). Se observa que las distribuciones son sesgadas a la derecha con modas en valores bajos de espaciamiento.

5.6.3 Sector 3

5.6.3.1 Determinación de la orientación de estructuras aflorantes en el macizo rocoso

El análisis estructural del Sector 3 reveló la presencia de cuatro familias principales de discontinuidades (J1 a J4). Las orientaciones medias de estas estructuras fueron representadas en un diagrama de polos y en un diagrama de rosetas para su interpretación visual (figuras 50, 51 y 52).

La Tabla 14, resume los resultados obtenidos para cada familia estructural, indicando su dirección de buzamiento, buzamiento, clasificación geométrica y densidad de fracturas.

Familia	Dip dir	Dip	Clasificación	Densidad (%)
J1	49.97	75.70	Subvertical	49.19
J2	29.06	27.54	Subhorizontal	24.35
J3	151.51	86.95	Vertical	15.94
J4	250.45	76.11	Subvertical	10.52

Tabla 14: Resultados obtenidos para las 4 familias de estructuras para el sector 3.

La familia J1 domina la estructura del sector con casi la mitad de los puntos clasificados. Su rumbo NE-SO ($\sim 50^\circ$) y su buzamiento de 75.7° la posicionan como una discontinuidad subvertical bien definida y de gran continuidad. J2 presenta un buzamiento de 27.5° , lo que la clasifica como subhorizontal; agrupa un 24.35 % de los puntos y representa la principal familia de planos de baja inclinación. J4 exhibe un rumbo O-SO ($\sim 250^\circ$) y buzamiento de 76.1° , similar a J1 pero de menor densidad (10.52 %); se considera también subvertical. Finalmente, J3 es la familia más inclinada, con buzamiento de 86.9° , clasificándose como vertical y representando un 15.94 % de los puntos.

A continuación, en la figura 50 se representa un diagrama de polos que concentra la totalidad de las estructuras presentes en el sector 3, mientras que las figuras 51 y 52 representan los valores promedios para cada set de fractura.

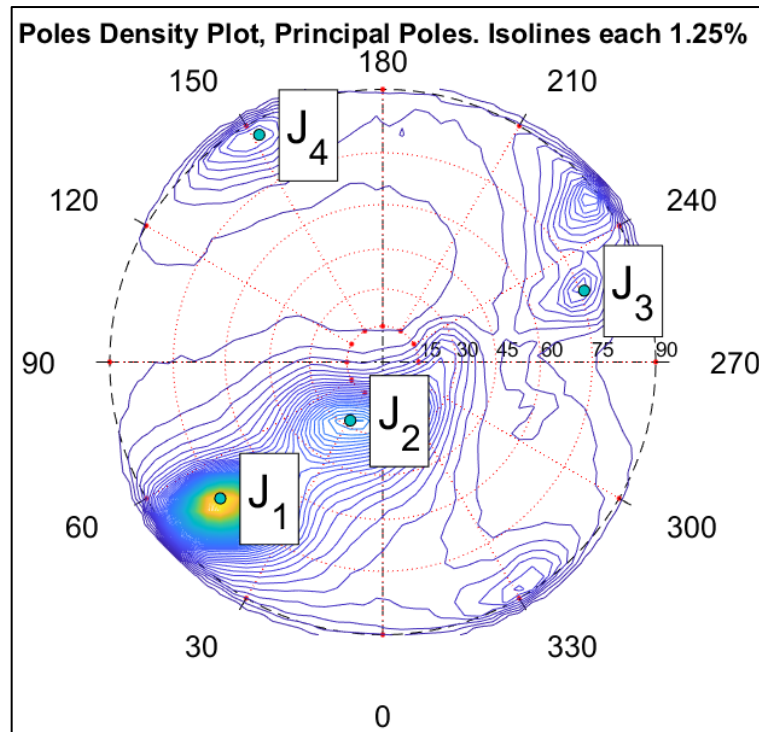


Figura 50: Diagrama de polos que contiene todas las estructuras del sector 3 obtenida del software DSE. Se observa a J1 como la principal familia, mientras que J2, J3 y J4 como estructuras secundarias.

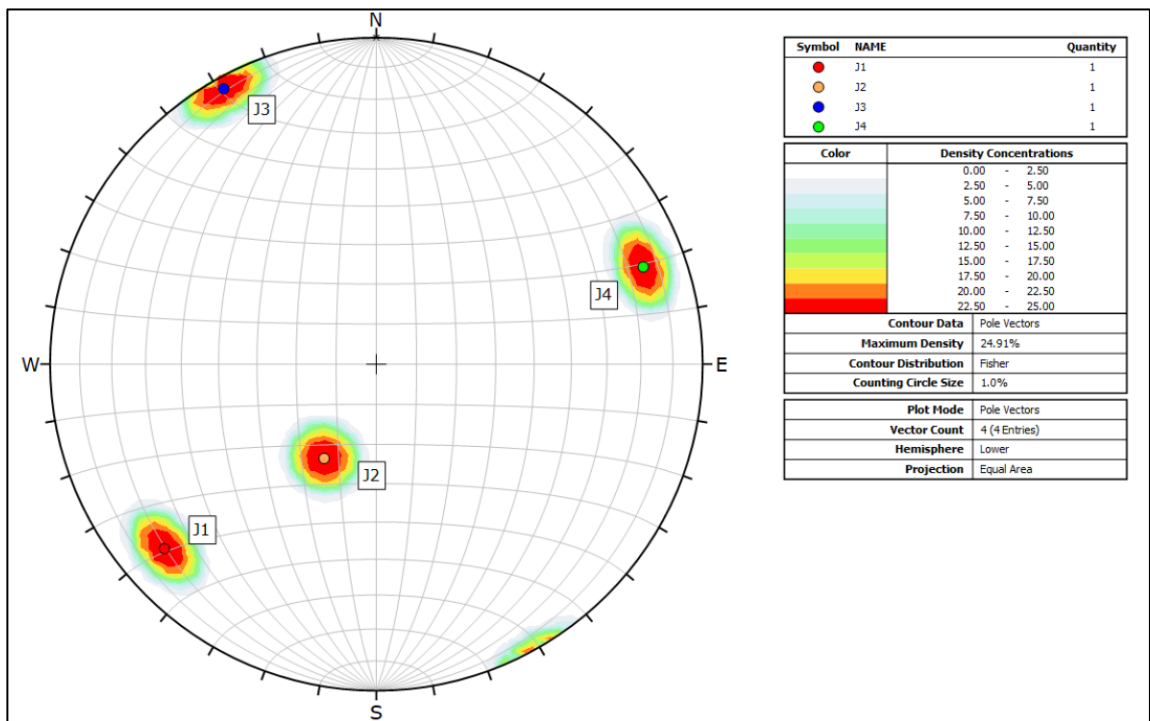


Figura 51: Diagrama de polos de las 4 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 3.

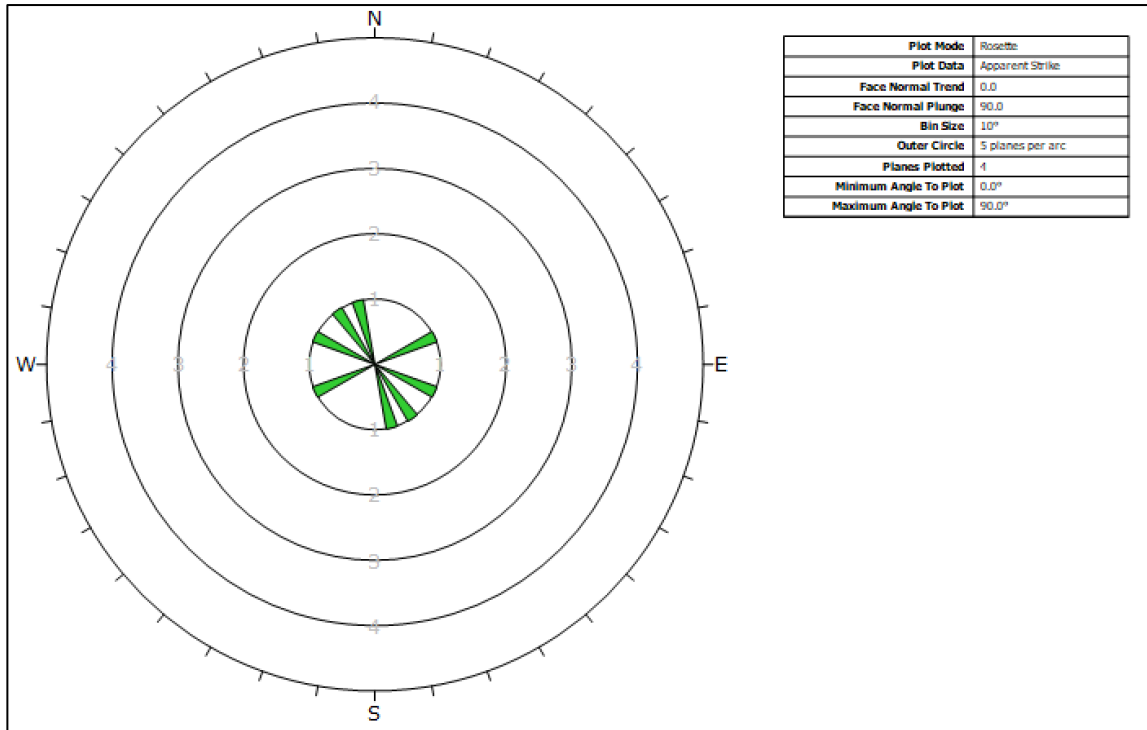


Figura 52: Diagrama de rosetas de las 4 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 3.

5.6.3.2 Caracterización de las propiedades geomecánicas

Se calcularon los valores de espaciamiento, frecuencia lineal (JF), densidad volumétrica de fracturas (Jv) y RQD a partir del análisis de clústeres de full persistencia. Los resultados son los siguientes:

Familia	Espaciamiento (m)	JF (1/m)	Jv (1/m ³)	RQD (%)	% Puntos
J1	0.37093	2.6959	2.6959	76.3	49.19
J2	0.52036	1.9218	1.9218	82.6	24.35
J3	0.40424	2.4738	2.4738	78.1	15.94
J4	0.47373	2.1109	2.1109	80.8	10.52
Total	—	—	9.2023	39.8	100

Tabla 15: Resumen de las principales propiedades geomecánicas de las 4 familias de estructuras del sector 3.

El espaciamiento medio varía entre 0.37 m (J1) y 0.52 m (J2). La familia J1 presenta el espaciamiento más reducido y, por ende, la frecuencia lineal más alta, mientras que J2, con espaciamientos más amplios, muestra la menor intensidad. J3 y J4 tienen espaciamientos intermedios (0.40 m y 0.47 m) y sus intensidades lineales se sitúan en torno a 2.47 y 2.11 fracturas/m, respectivamente.

En cuanto al RQD, los valores calculados mediante la formulación de Priest & Hudson (1981) se sitúan entre 76 % y 83 % para las familias individuales, lo que sugiere una calidad de macizo moderada a buena. No obstante, al considerar la suma de las densidades volumétricas, el RQD total estimado se reduce a ~39.8 %, reflejando que la presencia simultánea de todas las familias degrada significativamente la calidad del macizo. A continuación, en la figura 53, se observa la representación del espaciamiento para cada una de las familias obtenidos a través del software DSE.

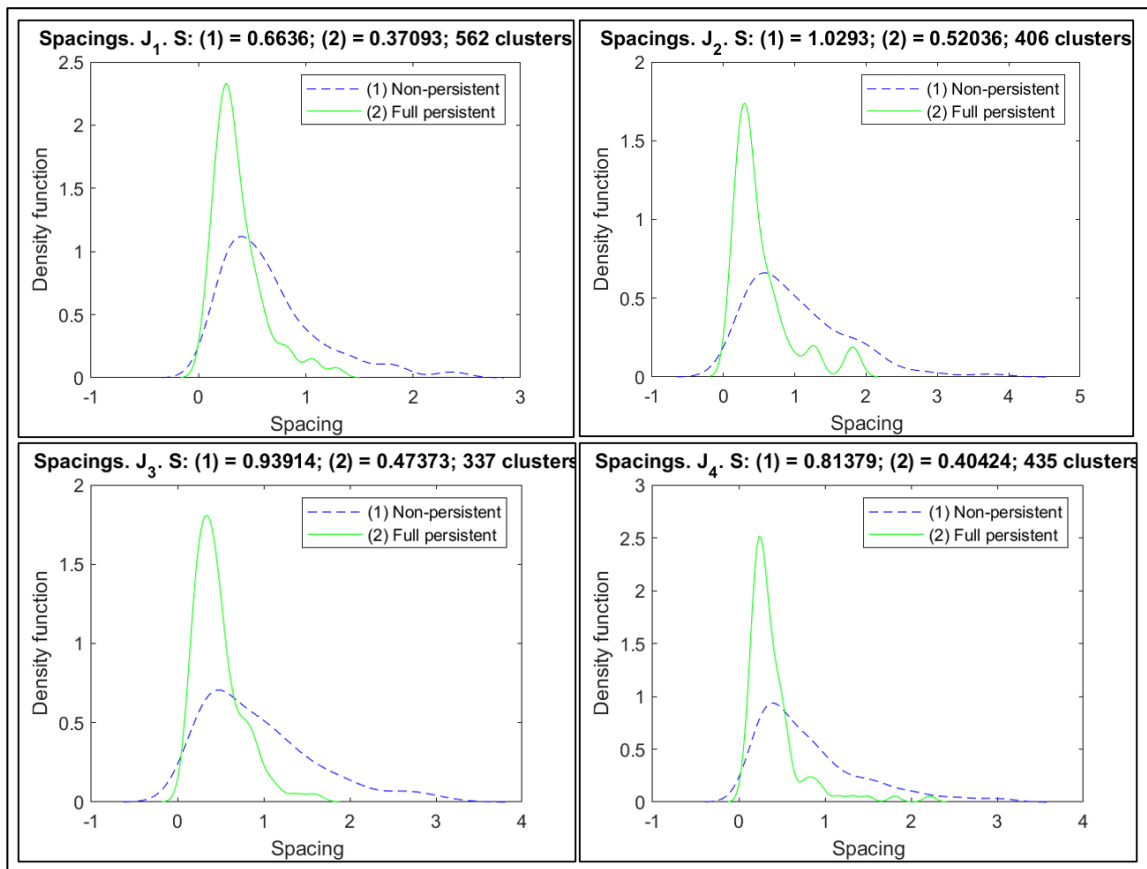


Figura 53: Representación gráfica del espaciamiento para las 4 familia de estructuras del sector 3.

5.6.4 Sector 4

5.6.4.1 Determinación de la orientación de estructuras aflorantes en el macizo rocoso

En el Sector 4 se identificaron tres familias principales de discontinuidades estructurales (J1 a J3). Las orientaciones medias de estas estructuras fueron representadas en un diagrama de polos y en un diagrama de rosetas para su interpretación visual (figuras 55, 56 y 57).

La Tabla 16, resume los resultados obtenidos para cada familia estructural, indicando su dirección de buzamiento, buzamiento, clasificación geométrica y densidad de fracturas.

Familia	Dip dir	Dip	Clasificación	Densidad (%)
J1	60.95	27.52	Subhorizontal	58.45
J2	295.90	85.62	Vertical	21.64
J3	53.43	85.15	Vertical	19.91

Tabla 16: Resultados obtenidos para las 3 familias de estructuras para el sector 4.

La familia J1 tiene rumbo NE-E ($\sim 61^\circ$) y un buzamiento de 27.5° , lo que la sitúa en el rango subhorizontal; concentra la mayor parte de los puntos (58.45 %) y corresponde al sistema de planos de poca inclinación que controla la geometría principal del sector. J2 y J3 presentan buzamientos de 85.6° y 85.1° respectivamente, clasificándose como verticales. J3, con rumbo ENE (53.4°), agrupa un 19.91 % de los puntos, mientras que J2, orientada hacia el noroeste (295.9°), reúne el 21.64 %. Estas familias verticales forman sistemas de juntas dominantes y de menor densidad relativa respecto de J1.

A continuación, en la figura 54 se representa un diagrama de polos que concentra la totalidad de las estructuras presentes en el sector 4, mientras que las figuras 55 y 56 representan los valores promedios para cada set de fractura.

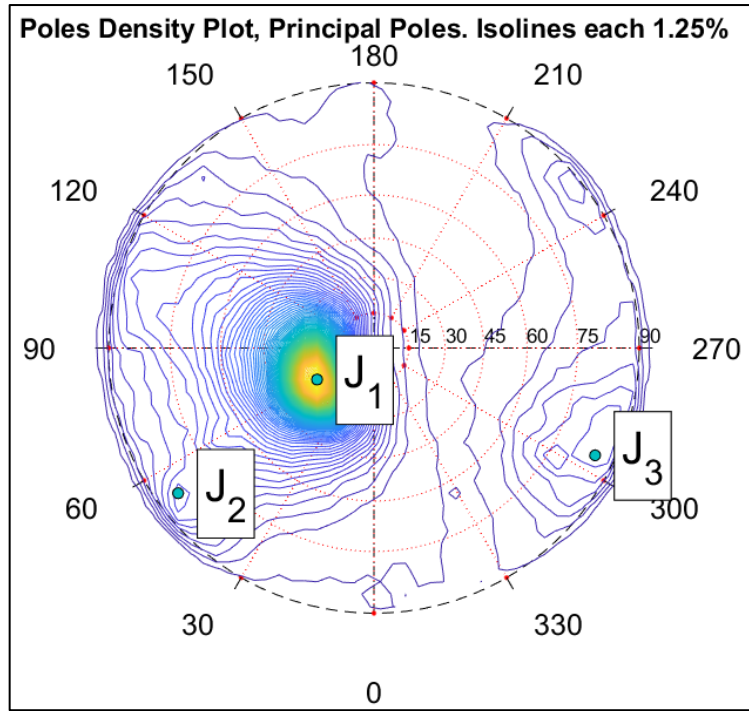


Figura 54: Diagrama de polos que contiene todas las estructuras del sector 4 obtenida del software DSE. Se observa a J1 como la principal familia, mientras que J2 y J3 como estructuras secundarias.

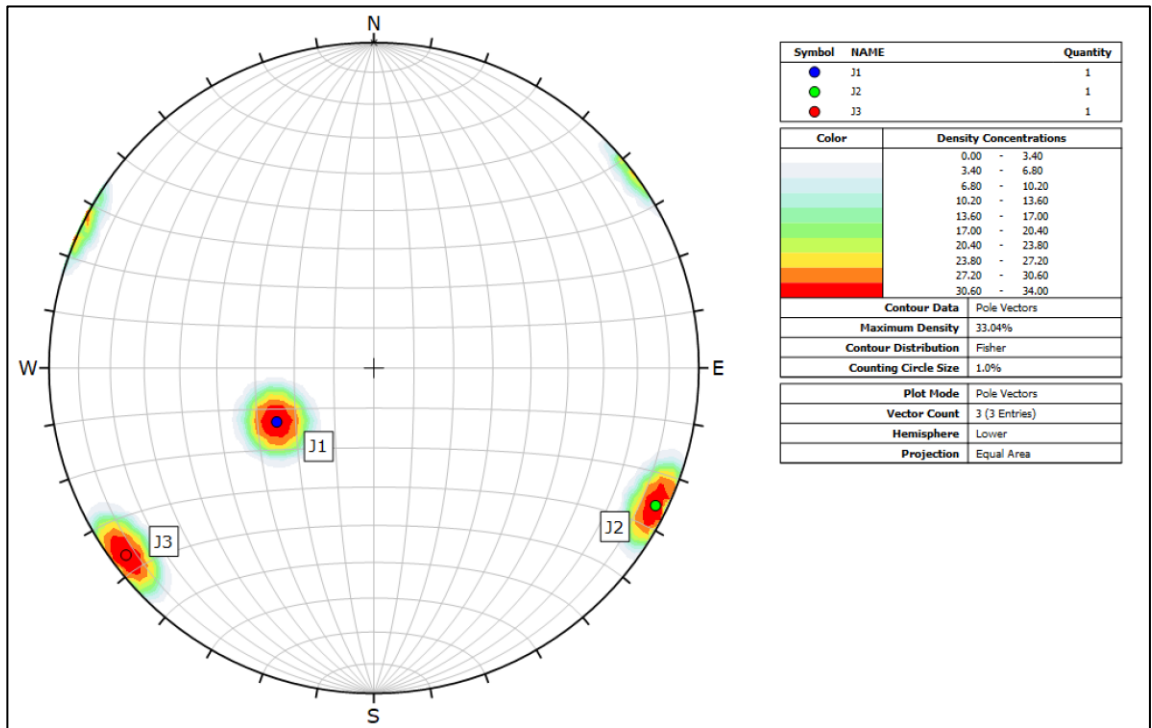


Figura 55: Diagrama de polos de las 3 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 4.

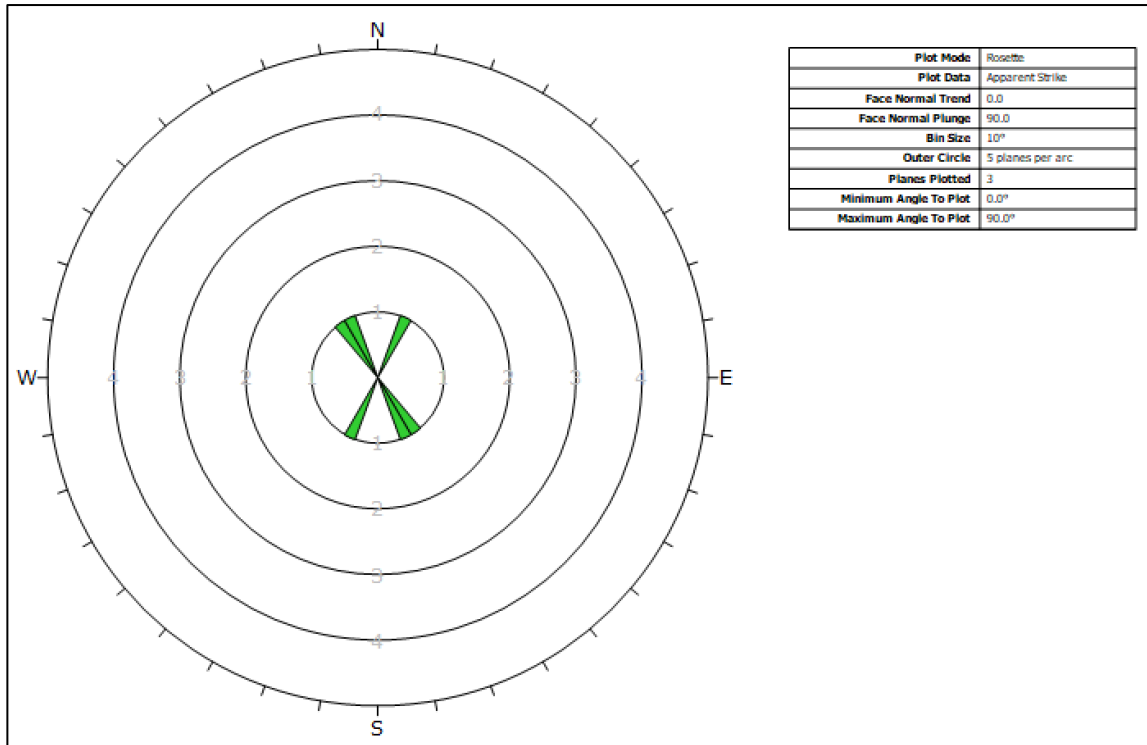


Figura 56: Diagrama de rosetas de las 3 familias de estructuras, para esto se utilizaron las orientaciones medias de cada una para el sector 4.

5.6.4.2 Caracterización de las propiedades geomecánicas

Se calcularon los valores de espaciamiento, frecuencia lineal (JF), densidad volumétrica de fracturas (Jv) y RQD a partir del análisis de clústeres de full persistencia. Los resultados son los siguientes:

Familia	Espaciamiento (m)	JF (1/m)	Jv (1/m ³)	RQD (%)	% Puntos
J1	0.65801	1.5197	1.5197	85.9	58.45
J2	0.48293	2.0707	2.0707	81.3	21.64
J3	0.34876	2.8673	2.8673	75.1	19.91
Total	–	–	6.4577	52.4	100

Tabla 17: Resumen de las principales propiedades geomecánicas de las 3 familias de estructuras del sector 4.

Los espaciamientos muestran una variabilidad moderada. La familia J1, de carácter subhorizontal, presenta un espaciamiento medio de 0.658 m y la menor frecuencia y densidad lineal. Las familias J2 y J3, al ser verticales, muestran espaciamientos más reducidos (0.483 m y 0.349 m).

Los valores de RQD obtenidos individualmente varían entre 75 % (J3) y 86 % (J1), indicando que, si se consideran de manera aislada, las familias verticales reducen ligeramente la calidad. Sin embargo, al combinar todas las familias, el RQD total baja a

aproximadamente 52 %, reflejando un macizo con fracturamiento intenso cuando se superponen todas las familias.

A continuación, en la figura 57, se observa la representación del espaciamiento para cada una de las familias obtenidas a través del software DSE.

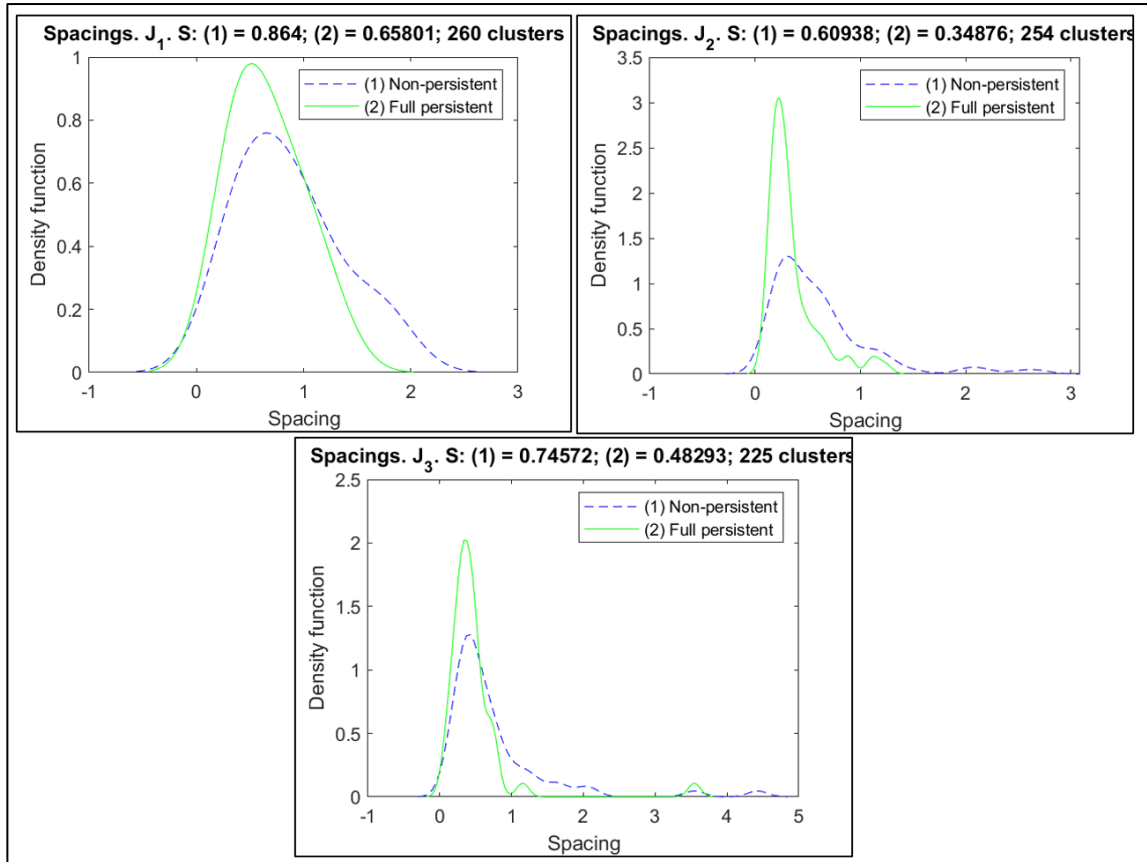


Figura 57: Representación gráfica del espaciamiento para las 3 familia de estructuras del sector 4.

5.7.Relación entre densidad volumétrica y RQD estimado

La relación entre la densidad volumétrica de fracturas (J_v) y el índice de calidad de la roca (RQD) evidencia diferencias significativas entre los sectores evaluados. Al aplicar la expresión empírica de Priest & Hudson (1981), se confirma que los sectores con menor J_v presentan mayores valores de RQD, lo que implica una mejor calidad del macizo rocoso y mayor potencial para la obtención de bloques de mayor tamaño. En contraste, valores altos de J_v se asocian a macizos intensamente fracturados y, por ende, a una canterabilidad más desfavorable. Este patrón se observa en los resultados obtenidos para los cuatro sectores analizados (tabla 18), donde los sectores 2 y 4 exhiben valores moderados de

fracturación y mayor RQD, mientras que los sectores 1 y 3 presentan una fracturación más intensa y, en consecuencia, menor calidad de roca ornamental.

Sector	Jv (fracturas/m³)	RQD estimado (%)	Clasificación de fracturación	Potencial canterable
1	≈ 12.34	≈ 29	Intensamente fracturado	Pobre
2	≈ 6.59	≈ 52	Moderadamente fracturado	Moderado
3	≈ 9.20	≈ 40	Deficientemente fracturado	Limitado
4	≈ 6.46	≈ 52	Moderadamente fracturado	Moderado

Tabla 18: relación entre Jv y RQD para los 4 sectores analizados.

6. Discusión

6.1. Metodología y validación de herramientas

El estudio partió del uso de drones para capturar imágenes de alta resolución en cuatro sectores representativos del plutón Cabeza de Vaca. Mediante Structure from Motion (SfM) se generaron modelos 3D con el software Agisoft Metashape que luego se procesaron con el algoritmo Discontinuity Set Extractor (DSE). Este programa, clasifica automáticamente las discontinuidades a partir de la densidad de polos y agrupa los puntos de la nube según su orientación. Los parámetros utilizados permitieron balancear la sensibilidad del análisis y evitar tanto la sobre-segmentación como la pérdida de discontinuidades importantes Riquelme *et al.* (2014). Esta combinación de fotogrametría UAV + DSE resultó eficaz para caracterizar afloramientos inaccesibles, aunque la calidad de los resultados depende de una buena planificación de vuelo, de la densidad de puntos y de la correcta elección de parámetros en DSE.

6.2. Evaluación de parámetros de vuelo

Los vuelos se realizaron a alturas entre 10,1 y 15,8 m, alcanzando resoluciones entre 3,76 y 6,6 mm/pixel, con densidad de fotografías que van entre 0.07 y 0.60 fotografías/ m² (tabla 8 del capítulo 4). Estas configuraciones permitieron una nube de puntos lo suficientemente densa como para detectar discontinuidades de pocos centímetros de abertura y hasta decímetros de espaciamiento. Volar a alturas cercanas al macizo mejora la resolución en afloramientos muy fracturados como el sector 1, aunque a costa de un mayor número de imágenes y tiempo de procesamiento. Asimismo, en zonas de alta topografía y fuertes sombras se redujo la calidad de la reconstrucción; por ello se recomienda planificar vuelos en condiciones de iluminación homogénea y, de ser posible, realizar pasadas desde diferentes ángulos para minimizar las zonas ocluidas.

6.3. Conexión con el MDT

El modelo digital de terreno (MDT) fue un insumo clave: proporcionó una base topográfica georreferenciada sobre la cual se proyectaron las orientaciones y espaciamientos de las discontinuidades. Además, permitió estimar las alturas relativas y la inclinación de cada familia, y facilitó la visualización tridimensional de los sectores para evaluar accesos y zonas potenciales de explotación. En particular, la integración del

MDT con los diagramas de polos y rosetas favorece la interpretación espacial de las familias de fracturas y su relación con la morfología de los afloramientos.

6.4. Análisis estructural por sector

6.4.1 Sector 1

El DSE identificó seis familias con las siguientes orientaciones y porcentajes de puntos asignados (datos obtenidos de la sección 5.6.1 tabla 10, figuras 42 y 43):

- DS1: dirección de buzamiento $262,57^\circ$, buzamiento $57,81^\circ$ (29,69 % de los puntos), clasificado como subvertical.
- DS2: $263.66^\circ/24,33^\circ$ (26.10 %, subhorizontal).
- DS3: $62.82^\circ/89,44^\circ$ (13.72 %, vertical).
- DS4: $349.29^\circ/83,75^\circ$ (13.29 %, vertical).
- DS5: $25.82^\circ/78,70^\circ$ (8.97 %, subvertical).
- DS6: $307.24^\circ/73,56^\circ$ (8.23 %, subvertical).

Los espaciamientos medios calculados con la nube de FP fueron: 0.41373 m (J1), 0.65493 m (J2), 0.48810 m (J3), 0.42589 m (J4), 0.53989 m (J5) y 0.46578 m (J6) y De estos se obtuvieron las frecuencias lineales (JF): 2.417; 1.527; 2.049; 2.348; 1.852 y 2.147 fracturas/m, respectivamente. La densidad volumétrica total (J_v) es la suma de las JF de todas las familias, resultando $J_v \approx 12.34$ fracturas/m³, y el RQD, calculado mediante la relación de Priest & Hudson *et al.*, (1981) ($RQD = 100 \cdot e^{-0.1 \cdot J_v}$), es ≈ 29 %. Este valor evidencia un macizo muy fracturado; según Muñoz de la Nava *et al.*, (1989), un RQD menor al 50 % corresponde a rocas de calidad deficiente para cantería, por lo que el sector 1 presenta un bajo potencial para obtener bloques de dimensiones comerciales.

6.4.2 Sector 2

Se reconocieron tres familias con estas orientaciones (datos obtenidos de la sección 5.6.2 tabla 12, figura 46 y 47):

- DS1: $135.04^\circ/26.53^\circ$ (64.29 %; subhorizontal).
- DS2: $297.33^\circ/75.71^\circ$ (22.27 %; subvertical).
- DS3: $227.20^\circ/82.44^\circ$ (13.44 %; vertical).

Los espaciamientos de FP fueron: 0.58596 m (J1), 0.49556 m (J2) y 0.34902 m (J3), que corresponden a JF de 1.707, 2.018 y 2.865 fracturas/m. La J_v total es 6.59 fracturas/m³ y

el RQD calculado es $\approx 52\%$. En consecuencia, el sector 2 se clasifica como moderadamente fracturado, con bloques de tamaño medio; por tanto, tiene un potencial moderado para explotación ornamental.

6.4.3 Sector 3

El DSE delimitó cuatro familias con las orientaciones (datos obtenidos de la sección 5.6.3 tabla 14, figuras 50 y 51):

- DS1: $49.97^\circ/75.70^\circ$ (49.19 %; subvertical).
- DS2: $29.06^\circ/27.54^\circ$ (24.35 %; subhorizontal).
- DS3: $151.51^\circ/86.95^\circ$ (15.94 %; vertical).
- DS4: $250.45^\circ/76.11^\circ$ (10.52 %; subvertical).

Los espaciamientos medios utilizados (tomados de los gráficos de densidad) son: 0.37093 m, 0.52036 m, 0.40424 m y 0.47373 m. De estos se derivan JF de 2.696; 1.922; 2.474 y 2.111 fracturas/m, respectivamente. La J_v total resulta 9.20 fracturas/m³, produciendo un RQD de aproximadamente 40 %. Estos valores indican un macizo más fracturado que el sector 2 y menos que el sector 1; los bloques esperables serían de tamaño medio-pequeño y la canterabilidad es limitada.

6.4.4 Sector 4

En el sector 4 se distinguieron tres familias con estas orientaciones (datos obtenidos de la sección 5.6.4 tabla 16, figuras 54 y 55):

- DS1: $60.95^\circ/27.52^\circ$ (58.45 %; subhorizontal a moderada).
- DS3: $295.90^\circ/85.62^\circ$ (21.64 %; vertical).
- DS2: $53.43^\circ/85.15^\circ$ (19.91 %; vertical).

Los espaciamientos (basados en los datos de FP disponibles) fueron 0.65801 m, 0.48293 m y 0.34876 m, con JF de 1.5197; 2.0707 y 2.8673 fracturas/m. El J_v total es 6.46 fracturas/m³ y el RQD calculado es $\approx 52\%$, similar al del sector 2. Esto implica una fracturación moderada y un potencial aceptable para bloques de tamaño medio.

6.5. Evaluación geomecánica y potencial de canterabilidad

En la tabla 19 se representan los resultados de la evaluación geomecánica para la relación de J_v y RQD y como esto incide en el potencial de canterabilidad para cada sector según Muñoz de la Nava *et al.* (1989):

Sector	Jv (fracturas/m ³)	RQD (%)	Clasificación de fracturación	Canterabilidad	Potencial de bloques
1	≈ 12.34	≈ 29	Intensamente fracturado	Pobre	Muy bajo (bloques pequeños, no comerciales)
2	≈ 6.59	≈ 52	Moderadamente fracturado	Moderada	Bloques de tamaño medio
3	≈ 9.20	≈ 40	Deficientemente fracturado	Limitada	Bloques reducidos, difícil explotación
4	≈ 6.46	≈ 52	Moderadamente fracturado	Moderada	Bloques de tamaño medio

Tabla 19: resultados de la evaluación geomecánica y el potencial de canterabilidad para cada sector.

Para visualizar mejor la distribución espacial del potencial ornamental, se elaboró un mapa (figura 58) de la zona de estudio en el que se delimitaron los cuatro sectores y se asignaron colores que reflejen el nivel de fracturación: tonos morados para valores altos de Jv y pobre canterabilidad (sector 1), tonos amarillos para niveles intermedios de Jv y limitada canterabilidad (sector 3) y tonos verdes para densidades más bajas de Jv y moderada canterabilidad (sectores 2 y 4). Esta síntesis gráfica, junto con la tabla 19, muestra claramente que los sectores 2 y 4 concentran el mayor interés porque presentan fracturación moderada y RQD superiores al 50 %, mientras que el sector 1 debe descartarse y el sector 3 podría considerarse sólo de forma restringida.

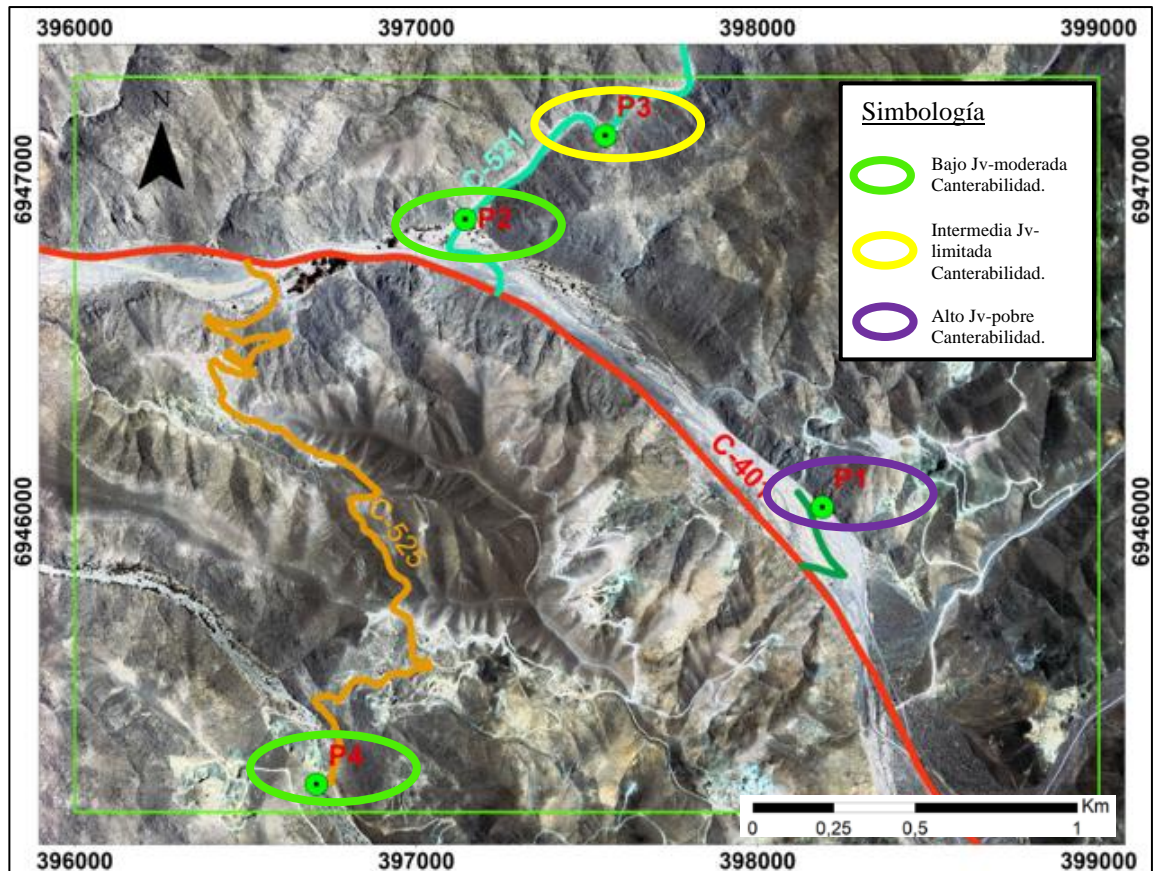


Figura 58: Mapa donde se representan la relación del Jv y la canterabilidad.

6.6. Comparación con metodologías de referencia

El cálculo del RQD, planteada por Priest & Hudson (1981), permitió estimar la calidad de los macizos a partir de las densidades volumétricas de discontinuidades estimadas. Este enfoque complementa la metodología de Muñoz de la Nava *et al.* (1989), que se centra en la evaluación de rocas ornamentales considerando la orientación, la persistencia y el espaciamiento de las discontinuidades. La comparación muestra que los sectores con menores Jv y RQD más altos son más favorables para la explotación, según lo analizado en la sección 5.7 de este trabajo y resumido en la tabla 18. Asimismo, el uso de DSE y de nubes de puntos obtenidas con drones se alinea con la propuesta de Riquelme *et al.* (2014) para la caracterización estructural, ampliando el alcance de las metodologías tradicionales y mejorando la eficiencia del mapeo.

6.7. Replicabilidad de la metodología

El procedimiento aplicado (vuelos con drones, reconstrucción 3D mediante Structure from Motion y clasificación con DSE) es altamente replicable y ofrece una base para

estandarizar el mapeo geomecánico con UAV en la región. La metodología puede adaptarse a otros plutones y unidades de roca ornamental de Atacama, permitiendo comparar sistemáticamente parámetros como orientación, espaciamiento y J_v entre yacimientos. Se recomienda definir protocolos de vuelo (altura, solape, resolución), parámetros de DSE (knn, cone, anglevppal) y formatos de salida (tablas y diagramas normalizados) para construir un inventario regional de recursos ornamentales.

7. Conclusiones

La aplicación de técnicas de fotogrametría con UAV, combinadas con procesamiento SfM y clasificación automática de discontinuidades mediante DSE, permitió obtener una caracterización estructural y geomecánica de alta resolución del Plutón Cabeza de Vaca. Este enfoque resultó eficaz para cuantificar la densidad, orientación y distribución espacial de las diaclasas en afloramientos graníticos de difícil acceso, reduciendo tiempos de campo y mejorando la seguridad del personal.

El análisis sectorial reveló una marcada variación en la intensidad de fracturamiento. El sector 1 se clasificó como macizo extremadamente fracturado, con un volumen de juntas J_v de $\approx 12,34$ fracturas/ m^3 y un RQD de ≈ 29 %, lo que indica un macizo de calidad muy pobre y la imposibilidad de obtener bloques comerciales. Los sectores 2 y 4 presentan condiciones de fracturamiento moderadas ($J_v \approx 6,59$ y $6,46$ fracturas/ m^3 ; RQD ≈ 52 %), lo que corresponde a rocas de calidad media y sugiere la posibilidad de extraer bloques de tamaño medio. El sector 3 exhibe un nivel intermedio de fracturación ($J_v \approx 9,20$ fracturas/ m^3 ; RQD ≈ 40 %), ubicándose entre los extremos de los demás sectores. Estas diferencias se reflejan directamente en la dimensión esperable de los bloques: densidades volumétricas altas reducen el tamaño de los bloques, mientras que densidades moderadas permiten la extracción de bloques de dimensiones comerciales.

Desde un punto de vista estructural, en todos los sectores se identificó al menos un set de discontinuidades subhorizontal o de inclinación moderada, acompañado de varias familias subverticales y verticales. Esta anisotropía de fracturación controla la geometría de los bloques extraíbles: en los sectores 1 y 3, la predominancia de planos subverticales favorece la formación de bloques prismáticos de altura limitada; en los sectores 2 y 4, la presencia de planos subhorizontales posibilita bloques más voluminosos. La relación de Priest & Hudson *et al.*, (1981), utilizada para clasificar la roca, complementa adecuadamente los criterios de Muñoz de la Nava *et al.*, (1989) para determinar la canterabilidad del macizo.

Para los 4 sectores, el modelo 3D fue óptimo, considerando que la resolución fue de entre 3.76 a 6.6 mm/pix, esto generó una clara identificación de estructuras para el software DSE, pero, así como una mayor cantidad de puntos requiere mayores tiempos de procesamiento y submuestreo, por lo que finalmente es importante mencionar que una

resolución de entre 4-6 mm/pix es lo más preciso, considerando siempre una buena planificación de vuelo para evitar la oclusión

Finalmente, la aplicación de esta metodología a otros intrusivos de la región contribuirá a la construcción de un inventario regional de recursos ornamentales y a definir parámetros comparativos que orienten la planificación de explotaciones sostenibles.

8. Recomendaciones

Persistencia y tamaño de bloques: Los parámetros calculados se basan en espaciamientos medios; no se midió directamente la longitud de las discontinuidades ni su persistencia, lo que podría afectar la estimación del tamaño real de los bloques. Es recomendable realizar perfiles de scanline para obtener dicha información.

Asignación de familias: La identificación de familias mediante DSE depende de la densidad de puntos y de la selección de parámetros (figura 18) como son los vectores normales y polos, ángulo de extracción de estructuras y el ángulo de asignación de DS; estas variaciones leves pueden modificar el número de familias y su representatividad.

Factores económicos y ambientales: Este trabajo no considera accesos, infraestructura, costes de explotación ni restricciones ambientales, solo se enfoca en un análisis desde el punto de vista geotécnico, por lo que se recomienda tener una evaluación integral de estos parámetros para tener un índice de canterabilidad más robusto que permita evaluar un yacimiento ornamental.

Calidad petrográfica-mineralógica de las rocas: El presente estudio se centró exclusivamente en los aspectos estructurales y de dimensionamiento para definir la canterabilidad de las rocas, sin considerar si su calidad petrográfica y mineralógica resulta adecuada para estos fines. En este sentido, sería conveniente evaluar si dichas rocas reúnen las características petrográficas y mineralógicas requeridas para su explotación. Una metodología aplicable a este objetivo es la determinación del índice de degradación de rocas plutónicas propuesto por Ordaz *et al.*, (1978), por lo que se recomienda la toma de muestras orientadas a un posterior análisis microscópico.

Calidad planificación de vuelo: Para que los resultados de la fotogrametría sean óptimos, se recomienda realizar una buena planificación del plan de vuelo, para evitar la oclusión y pérdida de información del macizo rocoso, esto quiere decir un traslape sobre el 70% y un vuelo oblicuo por todo el macizo rocoso

9. Referencias

- ADAM Technology home page. ADAM Technology. Recuperado 25 de septiembre de 2023, de <https://www.adamtech.com.au/Albertz, J.>
- Albertz, J. (2002). Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/C7), 19-25.
- Arévalo, C. (1994). La Cuenca Hornitos: un hemigraben extensional del Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó, Chile. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas, Vol. I, p. 397-401.
- Arévalo, C. (2005). Carta los Loros, región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Arévalo, C., Grocott, J., Martin, W., Pringle, M., & Taylor, G. (2006). Structural Setting of the Candelaria Fe Oxide Cu-Au Deposit, Chilean Andes (27° 30'S). *Economic Geology*, 101(4), 819-841.
- Arévalo, C.; Rivera, O; Iriarte, S. & Mpodozis, C. (1994). Cuencas extensionales y campos de calderas del Cretácico Superior-Terciario Inferior en la precordillera de Copiapó (27°-28°S), Chile. 7° Congreso Geológico Chileno, Vol. II, p. 1288-1292.
- Bahlburg, H., & Hervé, F. (1997). Geodynamic evolution and tectonostratigraphic terranes of northwestern Argentina and northern Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 109(7), 869-884.
- Belousov, V. V. (1977). *Structural Geology* (A. Gurevich, Trans.). Moscow: MIR Publishers.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Biese, W. (1950). Traventino y mármol, una nueva industria en Chile. *Bol. Minero*(598), 89-99.

- Birch, J. S. (2006). Using 3DM Analyst mine mapping suite for rock face characterization. *Laser and photogrammetric methods for rock face characterization*, 15.
- Bitelli, G., Dubbini, M., & Zanutta, A. (2004). Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5), 246-251.
- Bonneval, H. (1972). *Photogrammétrie générale* (Collection scientifique de l'Institut géographique national, 4 vols.). Paris: Eyrolles.
- Bravo Yuraszcek, S. (1999). Potencialidades de producción de rocas ornamentales en Chile. Estudio preparado para la Sociedad Nacional de Minería, Santiago.
- Brady, B. H., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics: for underground mining*. Springer science & business media.
- Camus, F. (2003). Geología de los depósitos metálicos de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica N°4.
- Cereceda, P., Larraín, H., Osses, P., Farías, M., & Egaña, I. (2008). The climate of the coast and fog zone in the Tarapacá Region, Atacama Desert, Chile. *Atmospheric Research*, 87(3-4), 301-311.
- Chandler, J. H., & Moore, R. (1989). Analytical photogrammetry: a method for monitoring slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 22(2), 97-110.
- Chávez Aguirre, J. M., Arvizu Lara, G., & Maza Álvarez, J. A. (2006). *Geotecnia*. Comisión Federal de Electricidad, México.
- Coelho, L., & Brito J., 2007. *Fotogrametría digital*. Río de Janeiro, EdUERJ, 196p.
- Cooke, D. R., Hollings, P., & Walshe, J. L. (2005). Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(7), 801-818.
- Cornejo, P., Mpodozis, C., Ramírez, C. & Tomlinson, A. (1993). Estudio geológico en la región El Salvador y Potrerillos. Servicio nacional de geología y minería-CODELCO. Informe registrado IR-93-01, 258p.

- Cornejo, P., Mpodozis, C.; Kay, S. y Tomlinson, A. (1994). Volcanismo bimodal en régimen extensional del Cretácico Superior-Eoceno, El Salvador, Chile. 7° Congreso Geológico Chileno, actas Vol. II, p. 1306-1310.
- Datamine. (2023). Geology Software - Datamine. Recuperado 25 de septiembre de 2023.
- Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores for engineering purpose. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1), 17-22.
- Deere, D. U. (1968). Geological considerations. In K. H. Stagg & D. U. Deere (Eds.), *Rock mechanics in engineering practice*. New York: Wiley.
- Deere, D. U., & Deere, D. W. (1989). Rock quality designation (RQD) after twenty years (No. 89). US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- del Real, I., Thompson, J. F. H., & Carriedo, J. (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. *Ore Geology Reviews*, 102, 106–153.
- Doyle, F. (1964). The historical development of analytical photogrammetry. *Photogrammetric Engineering*, 30(2), 259-265.
- Duelis, C., (2015). Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de Structure From Motion: Aplicação em mina a céu aberto. Tesis Mag. São Paulo, Universidad de São Paulo, Instituto de Geociências, 158 p.
- Duque-Escobar, G., & Escobar, C. E. (2016) Geomecánica. Universidad Nacional de Colombia.
- Díaz, A. (2000). Chimeneas de Brecha Mesotermiales Paleocenas y Epitermales Eocenas en la Precordillera de Copiapó. IX Congreso Geológico Chileno. 194p. Puerto Varas, Chile.
- Egels, Y., & Kasser, M. (2001). *Digital photogrammetry*. CRC Press.
- Elachi, C., & Van Zyl, J. J. (2021). *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*. John Wiley & Sons.
- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2008). *Risk assessment in geotechnical engineering* (Vol. 461). New York: John Wiley & Sons.
- Fernández, S. (2016). Influencia de los puntos de control sobre el terreno en la precisión de los modelos digitales obtenidos por fotogrametría aérea. Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid.

- Fernández-Landa, A., et al. (2021). Aplicación de la fotogrametría con drones y Structure from Motion para la generación de modelos 3D precisos. *Revista XYZ*.
- Fossen, H. (2016). *Structural Geology*. Cambridge university press.
- Gajardo, A., & Carrasco, R. (2006). Rocas para construcción y ornamentación en Chile: geología, distribución y aplicaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 117(2-4), 675.
- Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2010). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180-195.
- Gerding, V. F. (2020). Petrología de los depósitos asociados a la Megacaldera Carrizalillo en la pre-cordillera de Copiapó, región de Atacama. [Título Profesional, Universidad de Atacama]. Repositorio Académico de la Universidad de Atacama.
- Giussani, A., & Scaioni, M. (2004). Application of TLS to support landslides study: survey planning, operational issues and data processing. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(8/W2), 318-323.
- Godoy, E. & Lara, L. (1998). Mapa Geológico de las Cartas Chañaral-Diego de Almagro. Servicio Nacional de Geología y Minería, 1 mapa escala 1:100.000.
- Godoy, E., Marquardt, C., & Blanco, N. (2003). Carta Caldera, región de Atacama. Serie Geología Básica, No. 76. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago.
- Gustafson, L. B., & Hunt, J. P. (1975). The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70(5), 857–912.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 34(8), 1165-1186.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (2010). *TC Sheahan An Introduction to Geotechnical Engineering* (1st ed.). Pearson.
- Horenstein, H., & Carroll, A. (2011). *Digital Photography: A Basic Manual*. Atlantic/Little, Brown.
- Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 26(15), 2181-2198.
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997). *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Pergamon Press.

- Jaeger, C. (1979). *Rock mechanics and engineering*. Cambridge University Press.
- James, M. R., & Robson, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), 1413-1420.
- Jordan, T. E., Isacks, B. L., Allmendinger, R. W., Brewer, J. A., Ramos, V. A., & Ando, C. J. (1983). Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin*, 94(3), 341-361.
- Knyaz, V. A., & Gaboutchian, A. V. (2016). Photogrammetry-based automated measurements for tooth shape and occlusion analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 849-855.
- Lato, M. J., Diederichs, M. S., & Hutchinson, D. J. (2012). Bias correction for view-limited LiDAR scanning of rock outcrops for structural characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(5), 735-748.
- Linder, W. (2009). *Digital photogrammetry (Vol. 1)*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- Linder, W. (2013). *Digital photogrammetry: theory and applications*. Springer Science & Business Media.
- Lipman, P. W. (1984). The roots of ash flow calderas in western North America: windows into the tops of granitic batholiths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B10), 8801-8841.
- Lucassen, F., Fowler, C. M. R., & Franz, G. (1996). Formation of magmatic crust at the Andean continental margin during early Mesozoic: a geological and thermal model of the North Chilean Coast Range. *Tectonophysics*, 262(1-4), 263-279.
- López, G., Tapia, M., & Espinoza, L. (2010). Evaluación del potencial de rocas ornamentales en la región de Atacama. *Revista Minera Chilena*, 34(2), 45-58.
- Marchán Sanz, C., Regueiro González-Barros, M. M., & Delgado Arenas, P. (2017). *La piedra natural en España: evolución y perspectivas*.
- Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In *ISRM international symposium (pp. ISRM-IS)*. ISRM.

- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). Introduction to modern photogrammetry. John Wiley & Sons.
- Mpodozis, C., Arriagada, C., Basso, M., Roperch, P., Cobbold, P., & Reich, M. (2005). Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: implications for the tectonic evolution of the Central Andes. *Tectonophysics*, 399(1-4), 125-154.
- MRRPB. (2023, 19 Mayo). Global Decorative Rock Market Research Report 2023. Market Research Reports® Inc. Recuperado 27 de septiembre de 2023 de <https://www.marketresearchreports.com/mrrpb5/global-decorative-rock-market-research-report-2023>
- Muñoz de la Nava, P., Romero Escudero, J. A., Rodríguez Suárez, I., García Romero, E., Crespo Rosa, A., Carrión Moles, F., & Garbayo Martínez, M. P. (1989). Metodología de investigación de Rocas Ornamentales: Granitos.
- Museo Chileno de Arte Precolombino. (2021). Arte precolombino chileno: Documentos y estudios sobre patrimonio arqueológico. Recuperado de <https://museo.precolombino.cl/wp-content/uploads/2020/10/Arte-precolombino-chileno.pdf>
- Niemeyer, H. (2010). New kinematic data from the Sierra Castillo Fault at Quebrada del Carrizo, Precordillera of Atacama Region, Chile. *Andean Geology*, 26(2), 159-174.
- Novoa Gallegos, C. P. (2021). Distribución y ocurrencia de alteración hidrotermal y mineralización asociada al Plutón Cabeza de Vaca, sector Quebrada Carrizalillo, III región de Atacama, Chile. [Título profesional de la Universidad Andrés Bello]. Repositorio Académico de la Universidad de Atacama.
- Núñez, L. (1999). La minería prehispánica en el norte de Chile: Una perspectiva arqueológica. *Estudios Atacameños*, 18, 45-62.
- Ordaz, J, Esbert. R.M., Suárez del Río LM (1978) A proposed petrographical index to define mineral and rock deterioration in granitic rocks. *Colloque International Alteration et Protection des Monuments en Pierre (RILEM)*, 2.6, Paris

- Priest, S. D. (1980). The use of inclined hemisphere projection methods for the determination of kinematic feasibility, slide direction and volume of rock blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 17(1), 1-23.
- Priest, S.D. & Hudson, J.A. (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18(3), 183-197.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media.
- Ragan, D. M., (1985). *Structural Geology, an Introduction to Geometrical Techniques*. John Wiley & Sons.
- Razak, K. A., Straatsma, M. W., Van Westen, C. J., Malet, J. P., & De Jong, S. M. (2011). Airborne laser scanning of forested landslides characterization: Terrain model quality and visualization. *Geomorphology*, 126(1-2), 186-200.
- Rengers, N. (1967). Terrestrial Photogrammetry: A valuable tool for engineering geological purposes. *Journal of Intl. Soc. of Rock Mech*, 5(2-3), 150-154.
- Reich, M., Parada, M. A., Palacios, C., Dietrich, A., Schultz, F., & Lehmann, B. (2009). Adularia–sericite epithermal mineralization in the El Salvador district, northern Chile: Structural, mineralogical, and geochronological evidence for a late Miocene porphyry–epithermal transition. *Economic Geology*, 104(2), 255–273.
- Riquelme, A., 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.
- Rivera, O. (1992). El complejo volcano-plutónico Paleoceno-Eoceno del Cerro Durazno Alto: las calderas El Durazno y Lomas Bayas, región de Atacama, Chile. Tesis. Depto de Geología de la Universidad de Chile, 242p.
- Rivera, O. M., & Falcón, M. F. (2000). Calderas tipo colapso-resurgentes del Tercario inferior en la Pre-Cordillera de la región de Atacama: Emplazamiento de complejos volcano-plutonicos en las cuencas volcano-tectonicas extensionales Hornitos e Indio Muerto, IX Congreso Geológico Chileno. Soc. Geol. de Chile, Puerto Varas.

- Rivera, O. & Mpodozis, C. (1991). Volcanismo explosivo del Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó, región de Atacama, Chile: Las calderas Lomas Bayas y El Durazno. 6° Congreso Geológico Chileno. Actas, p. 213-216, Viña del Mar
- Rivera, O. & Mpodozis, C. (1994). La megacaldera Carrizalillo y sus Calderas anidadas: Volcanismo Sinextensional Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó. 7° Congreso Geológico Chileno. Actas Vol. 1, p. 149-153
- Rojas Campos, C. A. (2022). Mineralogía y geoquímica de cristales de turmalina en el Plutón de Cabeza de Vaca, región de Atacama. [Título Profesional, Universidad de Atacama]. Repositorio Académico de la Universidad de Atacama.
- Rosser, N. J., Petley, D. N., Lim, M., Dunning, S. A., & Allison, R. J. (2005). Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38(4), 363-375.
- Salvini, R., Vanneschi, C., Coggan, J. S., & Mastrococco, G. (2020). Evaluation of the use of UAV photogrammetry for rock discontinuity roughness characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 3699-3720.
- Santibáñez, F., Santibáñez, P., & Uribe, J. M. (2012). Atlas climático de Chile: región de Atacama. Universidad de Chile, Santiago.
- Scheuber, E., & González, G. (1999). Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22–26 S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics*, 18(5), 895-910.
- Segerstrom, K., & Parker, R. L. (1959). Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama: Santiago, Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, v. 1, no. 2, 33 p.
- Segerstrom, K.; Ruiz, C. (1962). Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 6: 42 p., escala 1:50.000.
- SERNAGEOMIN (2003). Mapa Geológico de Chile: escala 1:1.000.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Sillitoe, R. H. (2005). Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. *Economic Geology*, 100(5), 723–768.

- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology 105th Anniversary Volume*, 3–41.
- Snaveley, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International journal of computer vision*, 80, 189-210.
- Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009a). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106(3-4), 163-182.
- Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009b). Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 267-287.
- Taylor, G. K., Grocott, J., Dashwood, B., Gipson, M., & Arévalo, C. (2007). Implications for crustal rotation and tectonic evolution in the central Andes fore arc: New paleomagnetic results from the Copiapó region of northern Chile, 26–28 S. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B1).
- Taylor, P., Asner, G., Dahlin, K., Anderson, C., Knapp, D., Martin, R., & Townsend, A. (2015). Landscape-scale controls on aboveground forest carbon stocks on the Osa Peninsula, Costa Rica. *PLoS One*, 10(6).
- Thompson, M. M., Eller, R. C., Radlinski, W. A., & Speert, J. L. (Eds.). (1966). *Manual of photogrammetry* (Vol. 1, p. 61). Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22-36.
- Vicente, J. C. (2005). *Historia de la minería en la región de Atacama: Desde la colonia hasta el siglo XX*. Editorial Universitaria, Santiago.
- Vintró, C., Sanmiquel, L., & Freijo, M. (2014). Environmental sustainability in the mining sector: evidence from Catalan companies. *Journal of cleaner production*, 84, 155-163.
- Vosselman, G., & Maas, H. G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. CRC Press (Taylor & Francis).

- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. McGraw-Hill Education.
- Yari, M., Bagherpour, R., Khoshouei, M., & Pedram, H. (2020). Investigating a comprehensive model for evaluating occupational and environmental risks of dimensional stone mining. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 35(1).
- Yuraszeck, S. B. (1996). *Potencialidad de Producción de Rocas Ornamentales en Chile*. Sociedad Nacional de Minería.
- Zentilli, M. (1974). *Geological evolution and metallogenic relationship in the Andes of Northern Chile between 26° and 29°*. Ph.D. Thesis (Unpublished). Queen's University, 446 p., Kingston, Canada.
- Zhang, L., & Einstein, H. H. (2000). Estimating the intensity of rock discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(5), 819-837.
- Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Cambridge university press.
- Zúñiga González, J. L. (2016). *Generación de modelos tridimensionales a partir de fotogrametría y su aplicación en geología estructural*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.