



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN GEOTECNIA Y GEOMECÁNICA MINERA



TESIS

**IMPLEMENTACIÓN DE STRUCTURE FROM MOTION EN MINERÍA
SUBTERRÁNEA PARA MEJORAR EL PROCESO DE MAPEOS
GEOMECÁNICOS Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – UNIDAD MINERA
POMASI – CIEMSA**

PRESENTADA POR:

JULIAN APAZA CHINO

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN GEOTECNIA Y GEOMECÁNICA MINERA

PUNO, PERÚ

2024

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

IMPLEMENTACIÓN DE STRUCTURE FROM MOTION EN MINERÍA SUBTERRÁNEA PARA MEJORAR EL PROCESO DE MAPEOS GEOMECÁNICOS Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – UNIDAD MINERA POMASI – CIEMSA

AUTOR

JULIAN APAZA CHINO

RECuento DE PALABRAS

30872 Words

RECuento DE CARACTERES

158105 Characters

RECuento DE PÁGINAS

178 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

17.3MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 7, 2024 12:00 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Aug 7, 2024 12:02 PM GMT-5

● 8% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



Ing. Lucky Quea Gutierrez
C.I.F. 128622



Ingeniero Jared Luque Coyá
ING. ESTADÍSTICO E INFORMATICO
C.I.F. 116625

Resumen



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN GEOTECNIA Y GEOMECÁNICA MINERA

TESIS
IMPLEMENTACIÓN DE STRUCTURE FROM MOTION EN MINERÍA
SUBTERRÁNEA PARA MEJORAR EL PROCESO DE MAPEOS
GEOMECÁNICOS Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – UNIDAD MINERA
POMASI – CIEMSA



PRESENTADA POR:
JULIAN APAZA CHINO
PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN GEOTECNIA Y GEOMECÁNICA MINERA

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE


.....
M.Sc. HENRY ARNALDO TAPIA VALENCIA

PRIMER MIEMBRO


.....
M.Sc. AMILCAR GIOVANNY TERAN DIANDERAS

SEGUNDO MIEMBRO


.....
D.Sc. FIDEL HUISA MAMANI

ASESOR DE TESIS


.....
M.Sc. LUCIO QUEA GUTIERREZ

Puno, 02 de julio de 2024.

ÁREA: Especialidad.
TEMA: Geomecánica minera.
LÍNEA: Estabilidad de excavaciones subterráneas.



DEDICATORIA

A mis padres Jorge Apaza Ticona y Lucia Chino Guevara que me alentaron a seguir mis sueños y alcanzar mis metas y objetivos, junto a su paciencia y consejos.

A mi amada Valkiria, mi compañera de vida quien me apoya a cumplir mis metas y propósitos, por estar conmigo en los momentos difíciles y noches de desvelo, por apoyarme en concluir esta investigación sin rendirme en el proceso.

Julian Apaza Chino



AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano y a su Escuela de Posgrado, por haberme impartido el conocimiento necesario para concluir mi proceso de especialización, a través de su plana docente que me brindo los conocimientos necesarios en la mención de geotécnica y geomecánica minera.

A mi asesor, el M.Sc. Lucio Quea Gutierrez por su orientación, consejos y apoyo incondicional durante el desarrollo del este presente trabajo de investigación.

Al Dr. Luis Jordá Bordehore por brindar sus amplios conocimientos en las clases impartidas en temas de geomecánica minera, motivo por el cual me incliné a escoger el presente tema de investigación.

A la Unidad Minera Pomasi.

Julian Apaza Chino



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
ACRÓNIMOS	xv
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1	Marco teórico	4
1.1.1	Teledetección	4
1.1.2	Fotogrametría - aplicación	6
1.1.3	Metodología y fundamentos de la técnica	9
1.1.4	Aplicaciones de SFM en minería	19
1.1.5	Geomecánica en minería subterránea	20
1.1.6	Fotogrametría en geomecánica	21
1.1.7	Elaboración de modelos digitales de terrenos	26
1.1.8	Detección de cambios en morfología de terrenos	31
1.1.9	Clasificación de macizos rocosos	32
1.1.10	Caracterización de macizos rocosos con SFM	39
1.2	Antecedentes	46
1.2.1	Internacionales	46
1.2.2	Nacionales	53

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Identificación del problema	55
2.2	Enunciados del problema	56
2.2.1	Pregunta general	56



2.2.2	Preguntas específicas	56
2.3	Justificación	56
2.4	Objetivos	58
2.4.1	Objetivo general	58
2.4.2	Objetivos específicos	58
2.5	Hipótesis	58
2.5.1	Hipótesis general	58
2.5.2	Hipótesis específicas	58

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Lugar de estudio	59
3.2	Población	59
3.3	Muestra	59
3.4	Método de investigación	60
3.4.1	Enfoque de la investigación	60
3.4.2	Nivel de investigación	60
3.4.3	Diseño de la investigación	60
3.4.4	Método de la investigación	60
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	61
3.5.1	Técnicas de recolección de datos	63
3.5.2	Técnicas de análisis de datos	63
3.5.3	Materiales	64
3.5.4	Definición de las variables de la investigación	64

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Resultados	66
4.1.1	Mapeo de la estación geomecánica N°01	66
4.1.2	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°01	73
4.1.3	Mapeo de la estación geomecánica N°02	75
4.1.4	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°02	81
4.1.5	Mapeo de la estación geomecánica N°03	84
4.1.6	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°03	89
4.1.7	Mapeo de la estación geomecánica N°04	92
4.1.8	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°04	94



4.1.9	Mapeo de la estación geomecánica N°05	96
4.1.10	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°05	98
4.1.11	Mapeo de la estación geomecánica N°06	100
4.1.12	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°06	102
4.1.13	Mapeo de la estación geomecánica N°07	104
4.1.14	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°07	106
4.1.15	Mapeo de la estación geomecánica N°08	108
4.1.16	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°08	110
4.1.17	Mapeo de la estación geomecánica N°09	112
4.1.18	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°09	114
4.1.19	Mapeo de la estación geomecánica N°10	116
4.1.20	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°10	118
4.1.21	Mapeo de la estación geomecánica N°11	120
4.1.22	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°11	122
4.1.23	Mapeo de la estación geomecánica N°12	124
4.1.24	Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°12	126
4.1.25	Comparación de los datos obtenidos con ambos métodos	128
4.1.26	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°01	131
4.1.27	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°02	132
4.1.28	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°03	133
4.1.29	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°04	134
4.1.30	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°05	134
4.1.31	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°06	135
4.1.32	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°07	136
4.1.33	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°08	137
4.1.34	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°09	137
4.1.35	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°10	138
4.1.36	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°11	139
4.1.37	Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°12	140
4.1.38	Comparación de los F.S. obtenidos con ambos métodos	140
4.2	Discusión	142
	CONCLUSIONES	143
	RECOMENDACIONES	144
	BIBLIOGRAFÍA	145





ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Valoración de los parámetros del RMR89	34
2. Corrección por la orientación de discontinuidades	35
3. Orientación de las discontinuidades en un túnel	36
4. Clasificación de macizos rocosos - RMR89	36
5. Métodos de cálculo del RQD	38
6. Clasificación de macizos rocosos - Índice de calidad Q	39
7. Parámetros de espaciamiento del RMR89	42
8. Parámetros de persistencia del RMR89	43
9. Extracción de familias de discontinuidades – comparación	128
10. Comparación de variación en grados y porcentajes de las discontinuidades	130
11. Comparación de cuñas con F.S.	141

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Modelamiento subterráneo con escáner laser	5
2. Triangulación de foco utilizando fotogrametría	7
3. Modelamiento con densidad de puntos de una pieza aeroespacial.	8
4. Punto de estudio en un talud rocoso	8
5. Modelamiento de la imagen anterior en densidad de puntos	8
6. Proyección de una cámara	11
7. Reproyección y retroproyección	13
8. Estimación de un punto en una superficie triangulada	14
9. Correspondencia de áreas	15
10. Relación sistema de coordenadas - orientación interna	17
11. Posiciones ideales de toma de imágenes de un cuerpo en 360°	23
12. Cámara fotográfica recomendable para la realización del método SFM	26
13. Macizo – vista lateral	27
14. Macizo - vista frontal	27
15. Vista planta del modelo del macizo	27
16. Vista frontal del modelo del macizo	28
17. Vista iso der. del modelo del macizo	28
18. Densidad de puntos de un macizo	29
19. Vista iso. de la densidad de puntos de un macizo	29
20. Modelo suavizado de la densidad de puntos	29
21. Vista iso. del modelo suavizado de la densidad de puntos	30
22. Modelo del enmallado de texturas de un macizo	30
23. Vista iso. del modelo del enmallado de texturas de un macizo	30
24. Radar de monitoreo para estabilidad de taludes	32
25. Ábaco GSI en macizos rocosos fracturados a partir del índice RMI	33
26. Vista frontal del macizo para determinar sus valores	40
27. Determinación de Dip/DipDir de las discontinuidades más resaltantes	40
28. Orientación de los planos de Dip/DipDir con respecto a los puntos de control	40
29. Determinación de la orientación de discontinuidades en todo el macizo	41
30. Planos de discontinuidades espacialmente georreferenciados	41
31. Planos de discontinuidades para la determinación del RQD	42



32.	Separación entre diaclasas	43
33.	Longitud de las discontinuidades - vista iso. izq.	44
34.	Longitud de las discontinuidades - vista iso. der.	44
35.	Determinación de la rugosidad de una superficie	45
36.	Rugosidad de una superficie de discontinuidad	45
37.	Ubicación de la U.M.	59
38.	Referencia fotográfica de la estación 01	67
39.	Vista lateral derecha de la estación 01	67
40.	Fotografías tomadas de la estación 01	68
41.	Procesamiento de las 51 imágenes de la estación 01	68
42.	Densidad de puntos de la estación 01	69
43.	Vista iso a 30° de densidad de puntos de la estación 01	69
44.	Modelo de estructuras de la estación 01	69
45.	Modelo del solido de la estación 01	70
46.	Modelo de mapa de profundidad de la estación 01	70
47.	Modelos de mapas de profundidad de las imágenes de la estación 01	71
48.	Modelo de texturas de la estación 01	71
49.	Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 01	71
50.	Cartilla de mapeo estación 01	72
51.	Interpretación estereográfica estación 01	73
52.	Determinación de orientación de discontinuidades con software	74
53.	Determinación de orientación de discontinuidades - vista iso der.	74
54.	Interpretación estereográfica con SFM estación 01	75
55.	Referencia fotográfica de la estación 02	76
56.	Vista lateral derecha de la estación 02	76
57.	Fotografías tomadas de la estación 02	77
58.	Procesamiento de las 50 imágenes de la estación 02	77
59.	Densidad de puntos de la estación 02	78
60.	Vista iso a 30° de densidad de puntos de la estación 02	78
61.	Modelo de estructuras de la estación 02	78
62.	Modelo del solido de la estación 02	79
63.	Modelo de mapa de profundidad de la estación 02	79
64.	Modelos de mapas de profundidad de las imágenes de la estación 02	80
65.	Modelo de texturas de la estación 02	80



66.	Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 02	80
67.	Cartilla de mapeo estación 02	81
68.	Interpretación estereográfica estación 02	82
69.	Determinación de orientación de discontinuidades con software	82
70.	Determinación de orientación de discontinuidades - vista iso izq.	83
71.	Interpretación estereográfica con SFM estación 02	83
72.	Referencia fotográfica de la estación 03	84
73.	Vista lateral derecha de la estación 03	84
74.	Fotografías tomadas de la estación 03	85
75.	Procesamiento de las 52 imágenes de la estación 03	85
76.	Densidad de puntos de la estación 03	86
77.	Vista iso a 30° de densidad de puntos de la estación 03	86
78.	Modelo de estructuras de la estación 03	86
79.	Modelo del solido de la estación 03	87
80.	Modelo de mapa de profundidad de la estación 03	87
81.	Modelos de mapas de profundidad de las imágenes de la estación 03	88
82.	Modelo de texturas de la estación 03	88
83.	Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 03	88
84.	Cartilla de mapeo estación 03	89
85.	Interpretación estereográfica estación 03	90
86.	Determinación de orientación de discontinuidades con software	90
87.	Determinación de orientación de discontinuidades - vista iso izq.	91
88.	Interpretación estereográfica con SFM estación 03	91
89.	Referencia fotográfica de la estación 04.	92
90.	Vista lateral derecha de la estación 04	92
91.	Procesamiento de las 34 imágenes de la estación 04	93
92.	Modelo de texturas de la estación 04.	93
93.	Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 04	93
94.	Cartilla de mapeo estación 04	94
95.	Interpretación estereográfica estación 04	95
96.	Interpretación estereográfica con SFM estación 04	95
97.	Referencia fotográfica de la estación 05	96
98.	Vista lateral izquierda de la estación 05	96
99.	Procesamiento de las 59 imágenes de la estación 05	97



100.	Modelo de texturas de la estación 05	97
101.	Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 05	97
102.	Cartilla de mapeo estación 05	98
103.	Interpretación estereográfica estación 05	99
104.	Interpretación estereográfica con SFM estación 05	99
105.	Referencia fotográfica de la estación 06	100
106.	Vista lateral derecha de la estación 06	100
107.	Procesamiento de las 40 imágenes de la estación 06	101
108.	Modelo de texturas de la estación 06	101
109.	Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 06	101
110.	Cartilla de mapeo estación 06	102
111.	Interpretación estereográfica estación 06	103
112.	Interpretación estereográfica con SFM estación 06	103
113.	Referencia fotográfica de la estación 07	104
114.	Vista lateral derecha de la estación 07	104
115.	Procesamiento de las 50 imágenes de la estación 07	105
116.	Modelo de texturas de la estación 07	105
117.	Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 07	105
118.	Cartilla de mapeo estación 07	106
119.	Interpretación estereográfica estación 07	107
120.	Interpretación estereográfica con SFM estación 07	107
121.	Referencia fotográfica de la estación 08	108
122.	Vista lateral izquierda de la estación 08	108
123.	Procesamiento de las 41 imágenes de la estación 08	109
124.	Modelo de texturas de la estación 08	109
125.	Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 08	109
126.	Cartilla de mapeo estación 08	110
127.	Interpretación estereográfica estación 08	111
128.	Interpretación estereográfica con SFM estación 08	111
129.	Referencia fotográfica de la estación 09	112
130.	Vista lateral izquierda - derecha de la estación 09	112
131.	Procesamiento de las 55 imágenes de la estación 09	113
132.	Modelo de texturas de la estación 09	113
133.	Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 09	113



134.	Cartilla de mapeo estación 09	114
135.	Interpretación estereográfica estación 09	115
136.	Interpretación estereográfica con SFM estación 09	115
137.	Referencia fotográfica de la estación 10	116
138.	Vista lateral derecha de la estación 10	116
139.	Procesamiento de las 38 imágenes de la estación 10	117
140.	Modelo de texturas de la estación 10	117
141.	Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 10	117
142.	Cartilla de mapeo estación 10	118
143.	Interpretación estereográfica estación 10	119
144.	Interpretación estereográfica con SFM estación 10	119
145.	Referencia fotográfica de la estación 11	120
146.	Vista lateral izquierda de la estación 11	120
147.	Procesamiento de las 32 imágenes de la estación 11	121
148.	Modelo de texturas de la estación 11	121
149.	Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 11	121
150.	Cartilla de mapeo estación 11	122
151.	Interpretación estereográfica estación 11	123
152.	Interpretación estereográfica con SFM estación 11	123
153.	Referencia fotográfica de la estación 12	124
154.	Vista lateral derecha de la estación 12	124
155.	Procesamiento de las 43 imágenes de la estación 12	125
156.	Modelo de texturas de la estación 12	125
157.	Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 12	125
158.	Cartilla de mapeo estación 12	126
159.	Interpretación estereográfica estación 12	127
160.	Interpretación estereográfica con SFM estación 12	127
161.	Comparativa de densidad, puntos y tiempo de ambos métodos	129
162.	Diferencias de las mediciones en grados y porcentajes	131
163.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 01 - manual	131
164.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 01 - SFM	132
165.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 02 - manual	132
166.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 02 - SFM	133
167.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 03 - manual	133



168.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 03 - SFM	133
169.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 04 - manual	134
170.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 04 - SFM	134
171.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 05 - manual	135
172.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 05 - SFM	135
173.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 06 - manual	135
174.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 06 - SFM	136
175.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 07 - manual	136
176.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 07 - SFM	136
177.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 08 - manual	137
178.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 08 - SFM	137
179.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 09 - manual	138
180.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 09 - SFM	138
181.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 10 - manual	138
182.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 10 - SFM	139
183.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 11 - manual	139
184.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 11 - SFM	139
185.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 12 - manual	140
186.	Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 12 - SFM	140



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Matriz de consistencia	153
2. Implementos y herramientas necesarias para realizar los mapeos	154
3. Medición de dirección de buzamiento de discontinuidades y plano de control	154
4. Medición del buzamiento de discontinuidades y punto de control	155
5. Medición de la orientación de la galería	155
6. Direccionamiento de los puntos de control para toma de imágenes de las E.G.	156
7. Direccionamiento de los puntos de control con el norte.	156
8. Estimación de UCS con la medición de los I.R. del martillo Schmidt	157
9. Procesamiento de imágenes para el modelamiento 3D de la E.G.N°01	157
10. Parámetros de configuración de las imágenes de la E.G.N°01	158
11. Declaración jurada de autenticidad de tesis	158
12. Autorización para el depósito de tesis en el repositorio institucional	160



ACRÓNIMOS

CAI	: Correlación automática de imágenes
Dens. (%)	: Densidad de puntos en porcentaje
DenseCloud	: Densidad de puntos
Dip	: Buzamiento
Dip_Dir	: Dirección de buzamiento
DSE	: Discontinuity set extractor
EG	: Estación geomecánica
F.S.	: Factor de seguridad
GSI	: Geological strength index
LiDAR	: Light detection and ranging
NCC	: Correlación cruzada normalizada
Octree	: Técnica de modelado de sólidos
RMI	: Rock mass index
RMR	: Rock mass rating
RQD	: Rock quality designation
SFM	: Structure from motion
SLAM	: Simultaneous localization and mapping
SRF	: Stress reduction factor
TLS	: Escaneo láser terrestre
Var. %	: Porcentaje de variación
Vista iso.	: Vista isométrica

RESUMEN

La investigación aborda el problema en la pequeña minería cuando existen muchas labores continuas, la realización de un análisis geomecánico detallado en cada una implica inversión y tiempo. La investigación fue mejorar el proceso de mapeos geomecánicos con la metodología Structure From Motion, compara los tiempos de ejecución, exactitud y resultados de análisis de estabilidad con el Factor de Seguridad respecto a la metodología de mapeo geomecánico tradicional. La metodología utilizada fue de enfoque cuantitativo, nivel exploratorio-correlacional con diseño no experimental, mediante análisis de datos comparativo, las imágenes fueron tomadas en la galería del Nivel 4970 de la Unidad Minera Pomasi, estos datos fueron analizados con los softwares CloudCompare, Dips y Unwedge; del mismo modo se realizó el mapeo tradicional (brújula) para ambos métodos se realizó la comparación en identificación de discontinuidades (buzamiento), análisis cinemático y factor de seguridad. Los resultados obtenidos demostraron que los mapeos realizados con SFM fueron más rápidos, con un total de tiempo promedio de 12.54 min de ejecución por estación, en comparación al método de mapeo tradicional que tuvo en promedio 24.12 min. La variación promedio encontrada en la determinación y dirección de buzamiento fue de 12.87% y 15.96% respectivamente, esto a causa de la superficie de algunas discontinuidades en forma de plegamiento flexural. Se concluyó que los resultados fueron similares en análisis estereográfico.

Palabras clave: Análisis de estabilidad, fotogrametría, mapeo geomecánico, modelamiento 3D, structure from motion.

ABSTRACT

The research addresses the problem in small scale mining when there are many continuous workings, performing a detailed geomechanical analysis in each one involves investment and time. The research was to improve the geomechanical mapping process with the Structure from Motion methodology, comparing execution times, accuracy and stability analysis results with the Factor of Safety with respect to the traditional geomechanical mapping methodology. The methodology used was of quantitative approach, exploratory-correlational level with non-experimental design, through comparative data analysis, the images were taken in the gallery of Level 4970 of the Pomasi Mining Unit, these data were analyzed with CloudCompare, Dips and Unwedge software; in the same way the traditional mapping (compass) was performed for both methods the comparison was made in discontinuity identification (dip), kinematic analysis and safety factor. The results obtained showed that the mappings performed with SFM were faster, with an average total execution time of 12.54 min per station, compared to the traditional mapping method which had an average of 24.12 min. The average variation found in dip determination and dip direction was 12.87% and 15.96% respectively, due to the surface of some discontinuities in the form of flexural folding. It was concluded that the results were similar in stereo analysis.

Keywords: 3D modeling, geomechanical mapping, photogrammetry, stability analysis, structure from motion.



Dra. Ing. Ruth Maza Duman
CIP. 20603

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo mejorar el proceso de realización de mapeos geomecánicos en minería subterránea implementando la técnica fotogramétrica structure from motion (SFM). Se tiene conocimiento de la existencia de métodos tecnológicos de precisión para la caracterización de macizos rocosos en excavaciones subterráneas, técnicas de escaneo remoto 3D láser, sin embargo, estas opciones no están al alcance de la pequeña minería a causa de los costos. Se desarrollo una comparación de la técnica SFM con la técnica convencional, brindando resultados en detalle equivalentes a los escaneos laser, dependiendo principalmente de la técnica e interpretación de resultados. La presente investigación es de enfoque cuantitativo e implican la recolección y análisis de datos, nivel: exploratorio-correlacional, diseño: no experimental descriptivo, debido a que el estudio se realizó analizando datos de un fenómeno en un contexto natural en un único momento. La población a estudio fue la galería de acceso principal del nivel 4970 – veta Jesús María de la U.M. Pomasi, tomando como muestra puntos determinados donde la formación geológica cambió a lo largo de la galería, se realizaron mapeos en estaciones geomecánicas de promedio de sección de 2.5x1.7m, empleando el análisis comparativo con respecto al método de mapeo tradicional. Llegando a obtener resultados reducidos con respecto al tiempo de ejecución de los mapeos y mejora en la exactitud con respecto a los modelamientos 3D realizados a fin de obtener un mejor cálculo del F.S. de las fallas generadas.

Esta investigación está conformada por el capítulo I, donde se realizó una revisión de literatura referente al tema de estudio de manera rigurosa, estudiando la técnica SFM, su funcionamiento y metodología de utilización; haciendo referencia también a los principales antecedentes internacionales, autores pioneros en la realización de esta técnica. En el capítulo II se presenta el planteamiento del problema, describiendo los objetivos, hipótesis y justificación de la investigación. El capítulo III muestra la metodología utilizada, materiales, métodos, así como también las técnicas de recolección de datos y su procesamiento para la realización y cumplimiento de los objetivos de esta investigación. En el capítulo IV, se muestran los resultados obtenidos en la realización de la investigación por objetivo específico. Y por último se muestran las conclusiones y recomendaciones de la investigación en capítulos finales.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico

La automatización de procesos en minería superficial y subterránea avanza considerablemente, tomando en cuenta los procesos del área de geomecánica en minería subterránea, se vienen implementando diferentes métodos basados en la determinación de la orientación de discontinuidades en macizos rocosos para un análisis geomecánico más preciso y con menor tiempo de ejecución, en el cual se toma como punto de partida métodos y técnicas remotas.

1.1.1 Teledetección

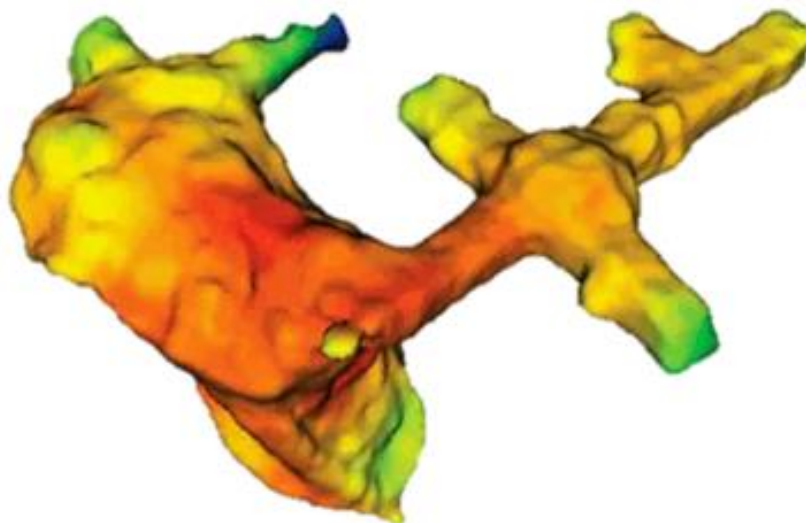
Según Neria (2010) la teledetección o detección remota, engloba a un conjunto de técnicas que permiten el análisis de un objeto, área o fenómeno, sin necesidad de que exista contacto físico o contacto directo entre el sensor y la zona de estudio. La información es extraída desde un lugar apartado de la escena donde se sitúa el dispositivo de medida, el cual puede estar instalado sobre la superficie terrestre, en plataforma aerotransportada o plataforma espacial; para que sea posible esta observación y medición, es necesaria la interacción de algún tipo entre los objetos y el sensor, en este caso la interacción es un flujo de radiación por parte del objeto dirigido hacia el sensor y dependiendo de su origen existen 3 tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado).
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico).
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar).

Estas técnicas también son conocidas como técnicas de teledetección o sistemas pasivos y activos, además dependiendo de su naturaleza estas pueden utilizar luz visible, infrarrojo reflejado, infrarrojo térmico o radares. Sus usos más comunes son en la elaboración de mapas topográficos, mapas de reflectancia y modelos de elevaciones entre otros.

Figura 1

Modelamiento subterráneo con escáner laser



Nota. Aerosar (2024).

A. Sistemas activos

Los sistemas activos de teledetección proporcionan información del objeto de estudio a partir del análisis de la señal emitida/recibida. Como radares con sensor que ayuda a la localización con señales de radio; el “LiDAR” que es un escáner laser 3D que determina la distancia con la luz; el “altímetro láser”; la “sonda” que estudia las condiciones meteorológicas emitiendo impulsos, en caso de que se encuentre en la categoría de activo; el “difusómetro” para medir la radiación rebotada (retrodispersada) y el “InSAR” que a la vez destaca entre las técnicas remotas más empleadas utilizando la interferometría de radar de apertura sintética (Roberto et al., 2017).

B. Sistemas pasivos

Los sistemas pasivos de teledetección proporcionan información del objeto de estudio a partir del análisis de la energía electromagnética radiante. Como el “espectrómetro” que distingue y analiza las bandas espectrales; el “radiómetro” para determinar la potencia de la radiación emitida por el objeto en determinados rangos de banda; el “radiómetro hiperspectral” (tipo de sensor pasivo más preciso que se utiliza en

teledetección). El “radiómetro de imágenes” (escanea el objeto o superficie para reproducir la imagen). La “sonda” (detecta las condiciones atmosféricas en sentido vertical). El “acelerómetro” (detecta los cambios de velocidad por unidad de tiempo). Y por último la “Fotogrametría SFM” (escanea el objeto a reproducir desde fotografías bidimensionales sobre la geometría de un objeto (Roberto et al., 2017).

1.1.2 Fotogrametría - aplicación

La fotogrametría Structure From Motion encontró diferentes campos de aplicación en la actualidad, considerando que de acuerdo con NASA ARSET (2020) desde la postulación de la funcionalidad de las técnicas fotogramétricas por Bonneval en 1972, la fotogrametría fue introducida en diversas ramas de la ingeniería, además del diseño y modelamiento 3D con fines aparte.

Diaz (2019) también indica que los campos modernos más relevantes donde la fotogrametría tomo desarrollo son:

A. Fotogrametría terrestre

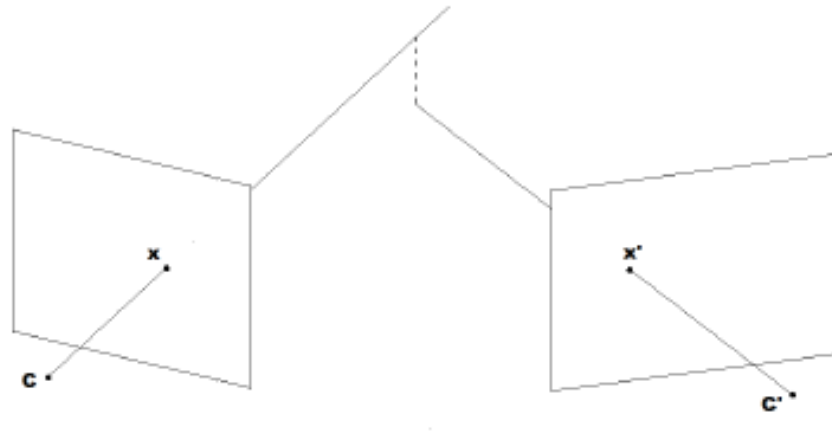
Técnica que se realiza tomando fotografías desde el suelo utilizando cámaras tradicionales o escáneres láser de barrido completo. Como ejemplificación de SFM se tiene la aplicación en la geomorfología fluvial, donde su utilización abarca la obtención de información espacial utilizada para el análisis de cambios geomorfológicos fluviales (Carrillo, 2022; Mattie, 2020; Wingtra, 2024).

Los principios del análisis SFM en un terreno son los mismos, realizando un levantamiento o mapeo con un vehículo aéreo no tripulado o dron, la variante presente en la densidad de puntos es el error en el eje z dependiendo de la precisión de los equipos utilizados, con el que se puede tener una variación al realizar el cálculo de distancias, profundidad y volumen de un tramo de un río o cuenca que se desea mapear. Los resultados finales tras la aplicación de la metodología SFM-MVS suelen ser ortomosaicos según Llena et al. (2017), y contar con un error medio cuadrático (RMSE) entre 0.5 y 1 m, y nubes de puntos con un error entre 1 y 2m en su aplicación en un estudio; reduciendo la anchura activa de

áreas en movimiento en un 52% dependiendo de su análisis inicial respecto al final, teniendo una clara simplificación en el patrón disperso.

Figura 2

Triangulación de foco utilizando fotogrametría



Nota. De Matías (2013); Wingtra (2024).

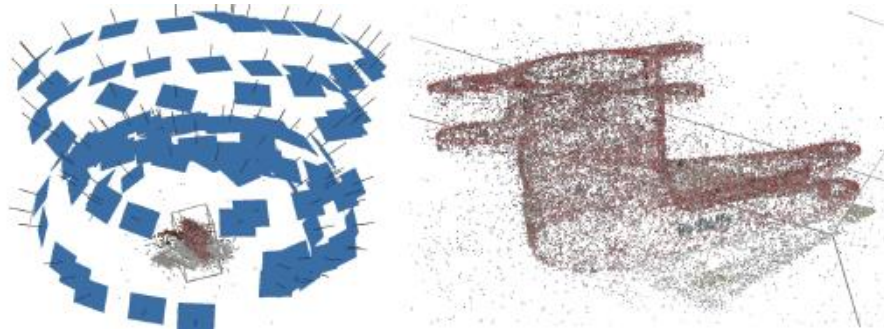
B. Fotogrametría en la tecnología móvil

En este campo, la fotogrametría SFM se puede utilizar desde piezas muy pequeñas, como en la modelización de piezas industriales, para la réplica de estructuras para su representación tridimensional en escala real 1 a 1, hasta taludes de alturas considerables en el campo minero.

Espejo (2018) realizó un estudio de esta metodología utilizando el software PhotoScan de Agisoft mediante técnicas de escaneo laser con brazo articulado para mayor estabilidad, demostrando que los modelos finales mediante la solidificación de las piezas en mallado completo con triangulación de puntos con Fusion360 ofrece resultados rápidos, potentes y a gran detalle en piezas de una masa de 230gr a una precisión de 0.15mm; que solo puede ser superado por técnicas de escaneo laser con sonda y brazo articulado pero con un coste mucho mayor.

Figura 3

Modelamiento con densidad de puntos de una pieza aeroespacial



Nota. Espejo (2018).

La técnica fotogramétrica móvil en estos tiempos es utilizada en la inspección de carreteras y otro tipo de construcciones civiles, basado en la toma de fotografías desde diferentes puntos en movimiento a alturas promedio del objeto a modelar, utilizando cámaras especiales con sensores adaptados para el movimiento y sensores de posición para hacer mediciones, como para el monitoreo de taludes en construcciones civiles.

Figura 4

Punto de estudio en un talud rocoso

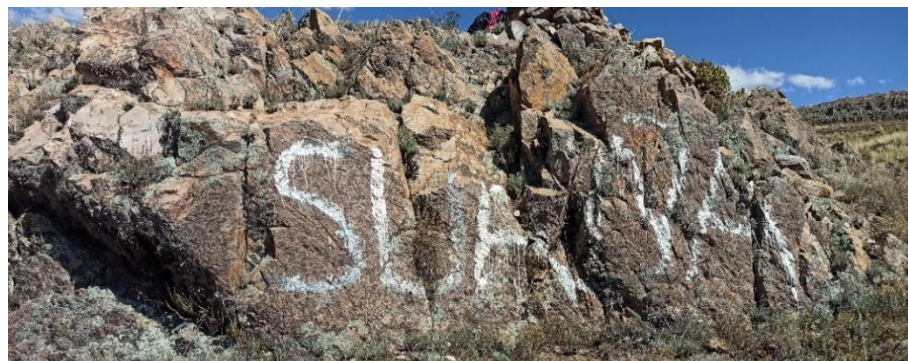


Figura 5

Modelamiento de la imagen anterior en densidad de puntos



1.1.3 Metodología y fundamentos de la técnica

La técnica Structure From Motion es una técnica remota que permite estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando únicamente medidas realizadas sobre varias fotografías de este objeto. Es el proceso de estimación de una estructura tridimensional de una escena a partir de un conjunto de imágenes 2D, utilizado en aplicaciones como escaneo 3D, aumento realidad, localización y mapeo visual simultáneo (vSLAM) (Nauticexpo, 2023).

El SFM se puede calcular de muchas maneras diferentes. El cual depende de diferentes factores, como el tipo de cámara utilizada, el número de imágenes tomadas y si las imágenes están ordenadas verticalmente u horizontalmente. Si las imágenes se toman con una sola cámara calibrada, entonces la estructura tridimensional y el movimiento de la cámara solo se pueden recuperar a escala, significa que se puede cambiar la escala de la estructura y la magnitud del movimiento de la cámara, mantenido los detalles observacionales (Santamaría y Sanz, 2011).

Esta técnica aplicada en el campo móvil es considerada como un método fotogramétrico de alta resolución y bajo coste de manera automatizada en comparación con las técnicas descritas en párrafos anteriores. Se basa en principios similares a la fotogrametría estereoscópica, significando esto que el modelamiento de objetos es posible partiendo de la superposición de imágenes.

De igual manera, esta técnica tiene sus orígenes en el campo de la visión artificial el cual fue desarrollada desde los años 2015 (Tómas et al., 2017). Así como el desarrollo de algoritmos automáticos de correlación automática de imágenes (CAI) y difiere de manera fundamental la manera de establecer la orientación y las posiciones de la cámara de manera automática sin la necesidad de establecer una red de puntos de control de coordenadas tridimensionales conocidas. Sin embargo, la solución a esta automatización son el desarrollo de ecuaciones de colinealidad partiendo del elevado número de puntos conjugados o comunes entre las imágenes identificados en el conjunto de imágenes superpuestas de manera no estructurada (Fonstad et al., 2013; Westoby et al., 2012).

Al ser realizada la primera etapa de esta técnica móvil, se resuelve el modelamiento 3D en una representación de nubes de puntos 3D en un sistema cuasi arbitrario partiendo en coordenadas x, y, z en $0, 0, 0$ desde los puntos de referencia, sin coordenadas absolutas y con la posibilidad de relativizarlas acorde a la necesidad del modelamiento, esto permite la transformación del modelamiento en cambios de escala, rotación y traslación en las direcciones de los ejes X, Y y Z (Fonstad et al., 2013; Westoby et al., 2012).

Esta técnica de modelamiento, en estos tiempos es aplicada por gran cantidad de programas y los resultados variaran dependiendo de parámetros de calibración de las cámaras fotográficas a ser utilizadas y así como de la resolución de las mismas. Los programas mayormente utilizados en este campo de aplicación son:

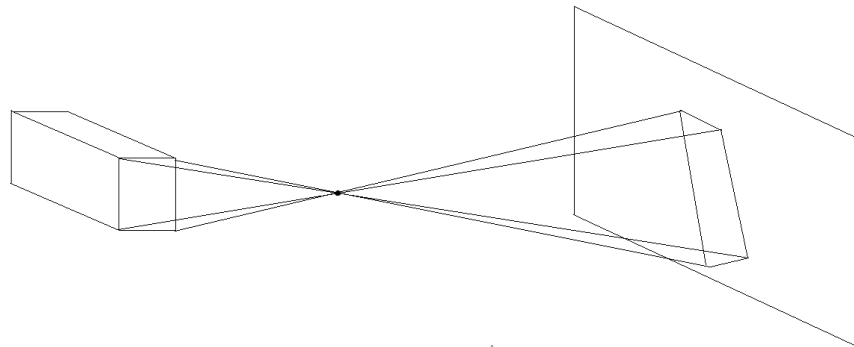
- Agisoft metashape
- Photosynth
- Pix4D
- Autodesk 123D Catch

A. Calibración

La calibración interna de una cámara implica identificar de qué manera esta distorsiona las imágenes durante la captura de fotografías, es decir, los cambios que ocurren a los puntos tridimensionales mientras son proyectados en el sensor de la cámara. Las cámaras que se usan no tienen un sistema óptico perfecto. Por eso, es importante tomar medidas para corregir las deformaciones o, al menos, cuantificarlas. La calibración interna es el nombre que se le da a los parámetros que describen cómo los rayos de luz atraviesan las lentes y se proyectan sobre el plano de la imagen. De Matías (2013) menciona que antes de usar una cámara en un proyecto de fotogrametría, es fundamental entender y corregir adecuadamente estos parámetros.

Figura 6

Proyección de una cámara



Nota. De Matías (2013).

Hay varios enfoques en la literatura que abordan esta fase, aunque el modelo matemático propuesto por Pérez (2009) es el siguiente:

$$X - X_0 + \Delta X_r + \Delta X_t = -c \frac{r}{q} \quad \dots \text{Ec. (1)}$$

$$Y - Y_0 + \Delta Y_r + \Delta Y_t = -c \frac{s}{q} \quad \dots \text{Ec. (2)}$$

$$r = m_{11}(x - x_0) + m_{12}(y - y_0) + m_{13}(z - z_0) \quad \dots \text{Ec. (3)}$$

$$s = m_{21}(x - x_0) + m_{22}(y - y_0) + m_{23}(z - z_0) \quad \dots \text{Ec. (4)}$$

$$q = m_{31}(x - x_0) + m_{32}(y - y_0) + m_{33}(z - z_0) \quad \dots \text{Ec. (5)}$$

Donde:

- (x_0, y_0) : coordenadas de la posición del punto principal.
- C : distancia focal.
- $(\Delta x_r, \Delta y_r)$: variación de x e y introducida por la distorsión rad.
- $(\Delta x_t, \Delta y_t)$: variación de x e y introducida por la distorsión tang.

El modelo mencionado sobre la distorsión rad es el método gaussiano:

$$\Delta X_r = (x - X_0) \frac{\Delta r}{r} \quad \dots \text{Ec. (6)}$$

$$\Delta Y_r = (y - y_0) \frac{\Delta r}{r} \quad \dots \text{Ec. (7)}$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad \dots \text{Ec. (8)}$$

$$\frac{\Delta r}{r} = k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \quad \dots \text{Ec. (9)}$$

El modelo mencionado sobre la distorsión tang es:

$$\Delta x_t = \left(1 - \frac{c}{s}\right) [p_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2p_2(x - x_0)(y - y_0)] [1 + p_3 r^2 + p_4 r^4 + \dots] \dots \text{Ec. (10)}$$

$$\Delta y_t = \left(1 - \frac{c}{s}\right) [p_2(r^2 + 2(y - y_0)^2) + 2p_1(x - x_0)(y - y_0)] [1 + p_3 r^2 + p_4 r^4 + \dots] \dots \text{Ec. (11)}$$

B. Mapas densos de profundidad

La información principal que necesita el algoritmo incluye un conjunto de imágenes o vistas de la escena y las matrices de proyección, que contienen los parámetros internos, así como la orientación externa de cada cámara. Además, se debe tener cierta información adicional sobre la escena que se va a reconstruir, como medidas aproximadas de su tamaño. Esto permite establecer un rango de profundidades dentro del cual se buscará la profundidad correcta.

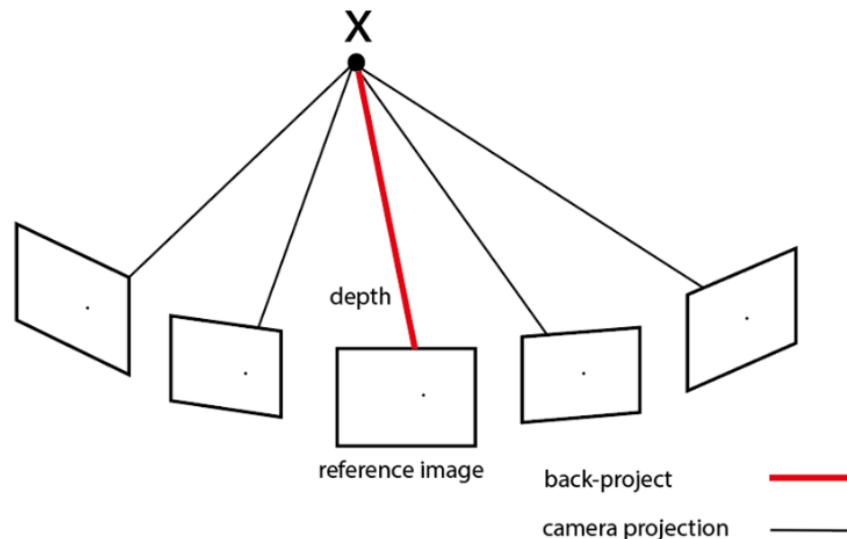
De Matías (2013) menciona que el algoritmo descrito por De Matías et al. (2009) consta de dos fases principales: primero, se crea un mapa de profundidad para cada vista individual a partir de las que se tienen como parámetros de entrada; luego, todos estos mapas de profundidad se combinan para formar un único modelo tridimensional con malla global.

El proceso comienza eligiendo una vista de referencia R del conjunto de vistas de la escena, $V=(V_1, \dots, V_n)$. Para esta imagen de referencia, también se seleccionan k vistas vecinas $C=\{C_1, \dots, C_k\}$ del conjunto V, excluyendo a R. Luego, se correlaciona R con estas vistas vecinas mediante un emparejamiento de ventanas significativo. Para cada píxel p en R, se sigue su rayo de retroproyección a lo largo del intervalo de profundidad que se ha definido para la escena que se está reconstruyendo. El rayo de retroproyección es una línea imaginaria que parte desde el centro de proyección de la cámara, cruza el plano de la imagen en el píxel p y se extiende hasta una profundidad desconocida, alcanzando un punto en la escena. La profundidad es la distancia entre el

plano de la imagen y el punto de la escena donde termina el rayo de retroproyección. Se calcula este rayo para el píxel p considerando varios valores de profundidad, que están entre el mínimo y el máximo que se han establecido para la escena.

Figura 7

Reproyección y retroproyección

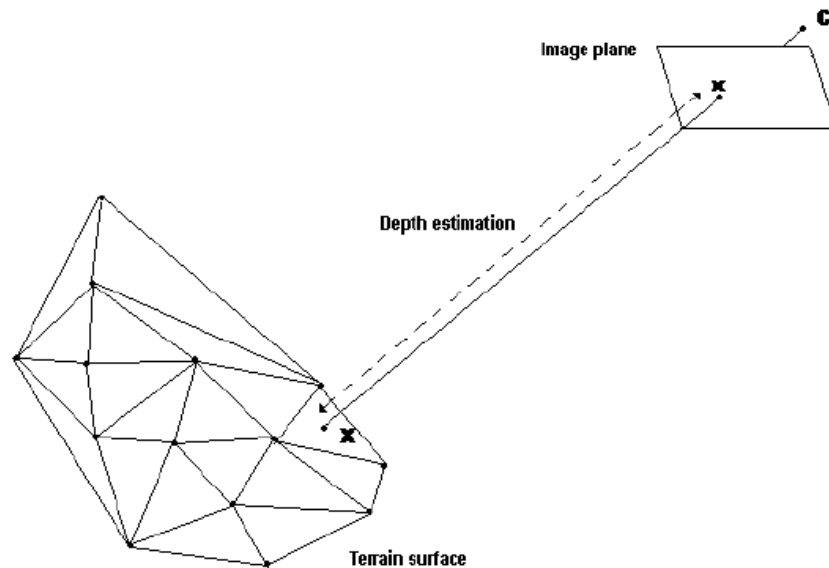


Nota. De Matías (2013).

Para cada valor de profundidad, se determina el punto 3D en la escena donde el rayo de retroproyección intercepta para ese valor. Luego, este punto 3D se reproyecta en las imágenes vecinas. A continuación, se calcula la correlación cruzada normalizada (NCC) entre la vista de referencia R y cada una de las imágenes vecinas C_j para esa profundidad. Esta correlación se realiza utilizando una ventana centrada en el píxel p de la imagen de referencia y las ventanas correspondientes centradas en las proyecciones en cada una de las vistas vecinas C_j (con j variando entre 1 y k), buscando una precisión a nivel subpíxel.

Figura 8

Estimación de un punto en una superficie triangulada



Nota. De Matías (2013).

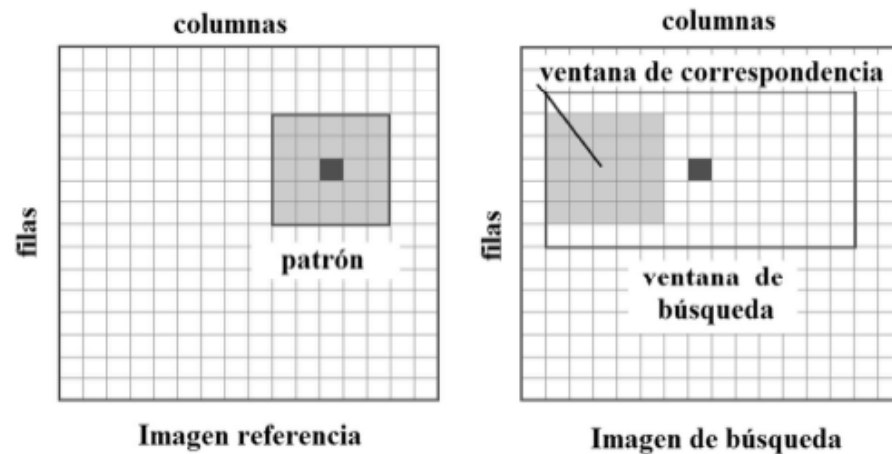
C. Correspondencia de áreas

Redondo (2012) explica que “*el método de correspondencia por áreas se basa en entidades compuestas por niveles de color y sombra. La idea central de este enfoque es comparar la distribución de estos niveles en una pequeña sub-imagen, llamada "tesela", con su equivalente en una imagen adyacente*”. El patrón o ventana es la imagen tesela o punto de referencia que se mantiene fija en una de las imágenes. Por otro lado, la ventana de búsqueda es la región dentro del espacio de búsqueda donde se compara la tesela con el patrón referencial. Esta comparación se realiza usando diversos criterios para medir el índice de semejanza, considerando los niveles de color y sombra.

Los dos métodos más conocidos para esta comparación son la correlación cruzada y la correspondencia por mínimos cuadrados. El tamaño y la posición de la ventana de búsqueda pueden establecerse o limitarse según ciertas restricciones geométricas. La figura que sigue muestra este concepto representado a través del ráster de una imagen.

Figura 9

Correspondencia de áreas



Nota. Redondo (2012).

La correspondencia entre dos píxeles se determina mediante la correlación o la semejanza de los niveles de color de los píxeles contenidos en máscaras matriciales centradas en los píxeles identificados por el software. Con un píxel que sirve como referencia en una imagen, cuya máscara permanece estática, se busca en otras imágenes aquellos píxeles cuya máscara proporciona el mayor nivel de correlación. Esta máscara de correlación se debe mover a través del espacio de búsqueda, por lo que es fundamental poder limitar o restringir este espacio.

Redondo (2012) argumenta que la técnica funciona correctamente siempre y cuando haya una coherencia geométrica entre las dos zonas de la imagen, aunque existen varios factores que pueden afectar su desempeño, como:

- Pobreza de textura, cuando hay poca o ninguna variación en los niveles de color y grises.
- Patrones repetitivos, cuando varios objetos tienen formas radiométricas similares.
- Variaciones de escala, donde el mismo objeto aparece a diferentes escalas, haciendo que la correlación no sea confiable.
- Rotaciones, cuando el mismo objeto se muestra girado en distintas imágenes.

- Variaciones de relieve, cuando la superficie del objeto forma ángulos diferentes con respecto a los rayos perspectivos de las diversas imágenes.

Estos elementos pueden dificultar el uso de esta técnica y hacen que se asemeje a la visión estereoscópica. Además del método utilizado para calcular el índice de semejanza, hay otros aspectos que deben tenerse en cuenta:

- Posición del patrón o puntos de control: El centro del patrón puede ubicarse dentro de un área que sea la mitad del tamaño del patrón y menor que la imagen completa. Sin embargo, la correspondencia por áreas puede fallar si el patrón se coloca en zonas que sufren oclusiones en la imagen adyacente, en áreas con baja relación señal-ruido, en regiones con patrones repetitivos, o en áreas donde existen líneas de ruptura.
- Tamaño del patrón: A medida que aumenta el tamaño del patrón, normalmente también aumenta el riesgo de distorsión geométrica, lo cual puede afectar la precisión de la correspondencia.
- Posición y tamaño de la ventana de búsqueda: La correspondencia por áreas necesita buenos acercamientos para ser efectiva. Sin embargo, el tamaño de la ventana de búsqueda debe ser lo suficientemente grande para tener un rango de comparación adecuado, pero no tanto como para incluir áreas irrelevantes o ruidosas.
- Factor de correlación cruzada máximo (ρ): Este valor oscila entre -1 y 1. Un ρ igual a 1 indica que el patrón y la ventana de correlación son idénticos, mientras que un ρ de 0 sugiere que no hay correlación alguna. Un ρ de -1 indicaría una correlación inversa.
- Criterios de tolerancia: El criterio de aceptación o rechazo puede variar, incluso dentro de la misma imagen. Por ello, se debe considerar el uso de umbrales adaptativos, ya que los valores límite para la aceptación de la correlación deben ajustarse localmente para mejorar la precisión del proceso (Redondo, 2012).

D. Orientación interna del software

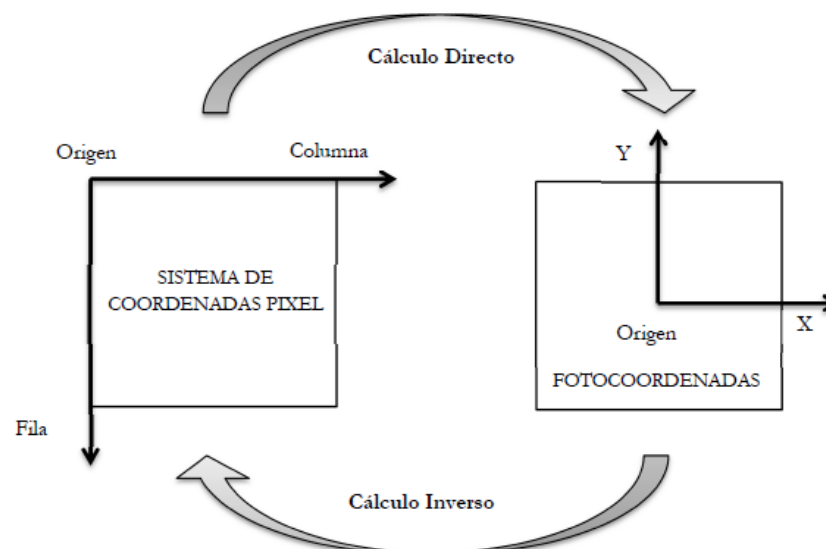
El proceso para obtener la transformación entre dos sistemas de coordenadas 2D implica conectar el sistema de coordenadas de la imagen digital, definido por filas y columnas o (x, y), con el sistema de fotocoordenadas. Esta conexión se realiza relacionando el tamaño de la imagen en píxeles con el tamaño del sensor en milímetros.

Para calcular esta orientación interna, el software generalmente emplea una transformación afín que incluye traslación, rotación y dos factores de escala para ajustar la relación entre densidad de puntos y dimensiones físicas.

Un caso de uso es cuando marcamos puntos de referencia en la imagen con coordenadas en píxeles y necesitamos obtener sus fotocoordenadas para trabajar con ellas en otro sistema de referencia. A esto se le llama orientación externa. El segundo caso ocurre cuando queremos proyectar datos calculados en la imagen para visualizarlos gráficamente. Esta es la orientación interna.

Figura 10

Relación sistema de coordenadas – orientación interna



Nota. Redondo (2012).

Los parámetros necesarios para una transformación afín para el cálculo directo se pueden expresar de la siguiente manera:

$$x = \lambda_{col.} * col.* \cos\omega + \lambda_{col.} * fil.* \sen\omega + col._r \quad \dots \text{Ec. (12)}$$

$$y = -\lambda_{fil.} * col.* \sen\omega + \lambda_{fil.} * fil.* \cos\omega + fil._r \quad \dots \text{Ec. (13)}$$

El ángulo ω , representa la cantidad de rotación en sentido contrario a las agujas del reloj, ya que se trata de un giro matemático y no de un tipo topográfico (De Matías et al., 2009). De esta manera, se puede llegar a una reparametrización de la siguiente forma:

$$a = \lambda_{col.} * \cos\omega \quad \dots \text{Ec. (14)}$$

$$b = \lambda_{col.} * \sen\omega \quad \dots \text{Ec. (15)}$$

$$c = \lambda_{fil.} * \cos\omega \quad \dots \text{Ec. (16)}$$

$$d = \lambda_{fil.} * \sen\omega \quad \dots \text{Ec. (17)}$$

$$e = col._r \quad \dots \text{Ec. (18)}$$

$$f = fil._r \quad \dots \text{Ec. (19)}$$

El autor señala que al abordar estos problemas utilizando mínimos cuadrados, se pueden obtener los parámetros inversos siempre que haya al menos tres puntos en ambos sistemas para garantizar un ajuste correcto, y más si se tiene redundancia. En este contexto, los parámetros que se deben considerar son los siguientes:

$$a' = \lambda_x * \cos\omega \quad \dots \text{Ec. (20)}$$

$$b' = \lambda_x * \sen\omega \quad \dots \text{Ec. (21)}$$

$$c' = \lambda_y * \cos\omega \quad \dots \text{Ec. (22)}$$

$$d' = \lambda_y * \sen\omega \quad \dots \text{Ec. (23)}$$

$$e' = x_r \quad \dots \text{Ec. (24)}$$

$$f' = y_r \quad \dots \text{Ec. (25)}$$

1.1.4 Aplicaciones de SFM en minería

Autores como Castro y Pfura (2020); Estruch y Tapia (2003); Roberto et al. (2017) mencionan que las técnicas fotogramétricas utilizadas en estos tiempos de implementación de modernidad para mejorar los procesos en minería, principalmente son brindados en minería superficial para levantamientos topográficos, modelamiento de estructuras, diseño de stocks de mineral, replanteo de puntos, ubicación y diseño de pozas de sedimentación, mapeos geomecánicos y medición de orientación de discontinuidades para determinar la calidad del macizo rocoso.

Su campo de aplicación mayormente explotado es en la topografía, aplicando la fotogrametría con drones y vehículos no tripulados principalmente. Castro y Pfura (2020) consideran que, para topografía en minería superficial, la utilización de drones es una alternativa muy rentable considerando factores como el tiempo de realización, llegando a convertirse en una necesidad en la actualidad para la obtención de resultados significativamente superiores en nivel de detalle, respecto a otros equipos como estaciones totales. Tomando en consideración también algunas de las ventajas que se mencionan en su investigación, las cuales mencionan; eficiencia en cubrir grandes extensiones de terreno en poco tiempo a comparación de la estación total que se limita a puntos específicos, ahorrando considerable tiempo y recursos humanos; precisión por el equipamiento actual de los drones con cámaras de alta resolución y sensores LiDAR que facilitan la captura de millones de puntos; seguridad por el fácil acceso a zonas de morfología riesgosa o peligrosa para el personal humano; y por último el costo de realización, aunque la inversión inicial en un dron equipado con estas funcionalidades puede ser mayor que la de una estación total, esto se compensa a largo plazo debido a la eficiencia y la cantidad de información que se puede obtener y ahorrando otros recursos innecesarios. Considerando esto, la elección del tipo de dron con los aspectos técnicos adecuados sería la única variable de cada proyecto en ejecución, drones que puedan tener una capacidad espectral adecuada para la realización de su modelamiento con fotogrametría, considerando también la equipación de estos equipos con cámaras multirrotoras, lo cual resulta ser superior a la topografía tradicional (Estruch y Tapia, 2003).

Sin embargo, es importante considerar que la elección del método adecuado de realización de levantamientos con dron o estación dependerá de las características específicas del proyecto, la complejidad del terreno, la precisión requerida y el presupuesto disponible del proyecto.

1.1.5 Geomecánica en minería subterránea

Conociendo que la geomecánica es una ciencia interdisciplinaria que abarca principios de mecánica de rocas, geología, ingeniería civil e ingeniería de minas; esta es una disciplina fundamental en la minería subterránea que se encarga de comprender el comportamiento mecánico del macizo rocoso y su interacción con las excavaciones mineras.

Salas (2013) menciona que uno de los objetivos principales es garantizar la estabilidad y seguridad de las operaciones mineras subterráneas. Esto se logra mediante la evaluación y el control de los diferentes fenómenos geomecánicos que pueden ocurrir durante la explotación minera, como:

- **Deformaciones del terreno:** El macizo rocoso se deforma como respuesta a la excavación de las galerías y otras aberturas. Estas deformaciones pueden ser de convergencia o divergencia, elásticas (reversibles) o plásticas (irreversibles) y pueden tener diversos efectos en la estabilidad de las estructuras mineras.
- **Caídas de rocas:** La fragmentación del macizo rocoso puede provocar desprendimientos de bloques o de material suelto, lo que representa un riesgo para la seguridad de los trabajadores y las instalaciones.
- **Flujos de rocas:** En algunos casos y en situaciones con condiciones muy específicas, el macizo rocoso puede comportarse como un fluido y fluir hacia las excavaciones mineras, lo que puede generar importantes daños y obstrucciones, dependiendo estos de la calidad del macizo rocoso (Hoek y Brown, 1985).

Para abordar estos desafíos, la geomecánica en la minería subterránea se basa en una serie de herramientas y técnicas, como:

- **Caracterización del macizo rocoso:** Mediante la realización de estudios geológicos y geotécnicos para determinar las propiedades físicas y

mecánicas del macizo rocoso, como su resistencia, deformabilidad, porosidad, entre otros.

- **Análisis de estabilidad:** Son realizados a través de la utilización de modelos matemáticos y físicos programados en softwares específicos de utilidad geomecánica para evaluar la estabilidad de las excavaciones mineras y determinar el riesgo de caídas de rocas, deformabilidad y otros fenómenos geomecánicos.
- **Diseño de estructuras:** Aplicando principios de ingeniería civil y de la mecánica de rocas para diseñar estructuras mineras seguras y estables, como pilares, cámaras y túneles.
- **Monitoreo geomecánico:** El cual es realizado con la instalación de instrumentos para monitorizar continuamente las condiciones del macizo rocoso y las estructuras mineras en interior mina, lo que permite detectar y prevenir posibles problemas de estabilidad de las excavaciones (Hoek y Brown, 1985).

1.1.6 Fotogrametría en geomecánica

La fotogrametría en la geomecánica subterránea es una herramienta más para poder realizar una adecuada caracterización del macizo rocoso y su posterior análisis de estabilidad que pueda ayudar en la toma de decisiones en un adecuado tipo de sostenimiento a realizar en las diferentes labores.

Con esta técnica se puede realizar un modelamiento y posterior análisis con los softwares mencionados en párrafos anteriores, estos mismos pueden proporcionar muy buenos resultados de excelente calidad que sirvan para la caracterización del macizo rocoso y el monitoreo de cambios si se realiza con radares estacionarios.

A. Realización de la técnica

Autores como Micheletti et al. (2015) mencionan que, para la realización de esta técnica de manera móvil, se pueden emplear una gran variedad de tipos de cámaras, considerando inclusive la utilización de teléfonos celulares. Sin embargo, debido a la finalidad del estudio requerido, lo recomendable fue la utilización de cámaras réflex mono

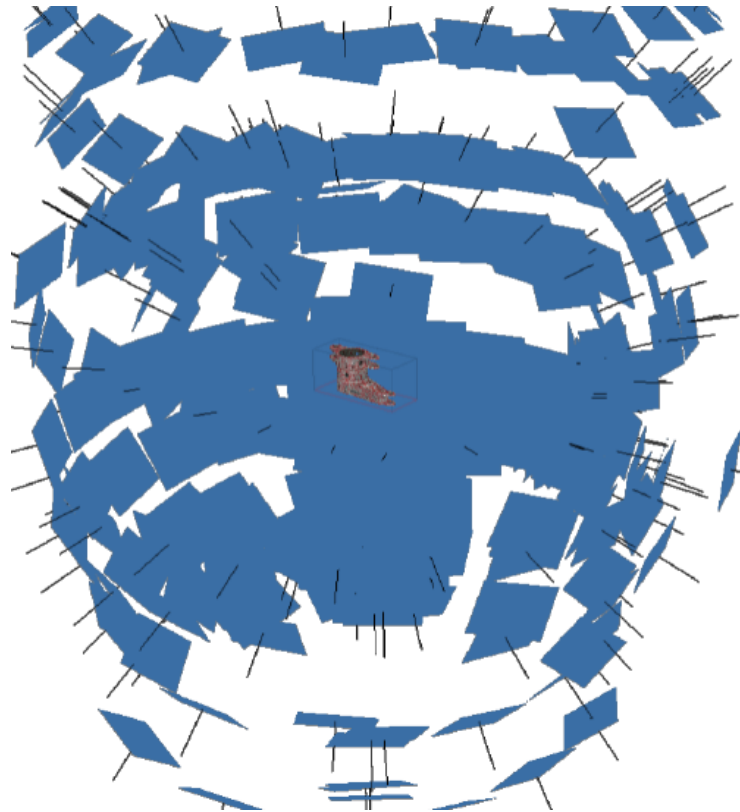
objetivo o las denominadas como cámaras de lente réflex. A su vez Micheletti et al. (2015) argumenta que un punto importante en la aplicación de esta técnica es la adquisición de imágenes con una superposición adecuada entre cada una de ellas con su imagen consecuente, así como también menciona que, no es preciso que las imágenes sean tomadas desde la misma distancia entre una y otra, ni con la misma escala; y recomienda la captura de pocas fotografías de manera general antes de realizar la toma de imágenes detalladas, siendo estas tomadas desde la mayor cantidad posible de direcciones que ayuden a la determinación de la posición y orientación del objeto analizado y mejore así la determinación de las coordenadas de los puntos de control.

Por otro lado, James y Robson (2012) postulan que se tiene una mejor determinación de enfoque del objetivo a modelar reduciendo el efecto domo de la toma de imágenes si estas fotografías son tomadas en dirección perpendicular al objeto, en el caso de geomecánica superficial al afloramiento del macizo rocoso e incluyendo también una leve oblicuidad a la superficie del objeto.

Considerando a los autores mencionados en párrafos superiores, se puede mencionar a la vez que, el factor de la iluminación natural es muy importante al momento de la captura de imágenes, ya que la luz de un flash puede generar texturas inconsistentes que podrían alterar el buen funcionamiento de los algoritmos de cálculo correlación automática de distancias de los softwares que trabajan con fotogrametría. A su vez, también plantean considerar que el número de fotografías necesarias a tomar por cada objetivo analizado depende de la escala del objetivo mismo, pero según lo recomienda Roberto et al. (2017), el número promedio de fotografías por objeto a modelar ha de ser de entre 10 a 100, considerando que mientras se tomen la mayor cantidad de fotografías en la mayor cantidad de direcciones, el resultado obtenido al generar la densidad de puntos será mejor y con mayor exactitud (Lucieer et al., 2014).

Figura 11

Posiciones ideales de toma de imágenes de un cuerpo en 360°



Nota. Espejo (2018).

B. SFM en geomecánica superficial

Esta técnica parte del proceso de la utilización de estaciones robóticas para la creación de una nube de puntos que permita determinar la orientación de las familias de discontinuidades de un macizo rocoso y a la vez realizar el monitoreo geotécnico de taludes rocosos.

Autores como Ocsa y Barreda (2022); Pacheco y Poon (2016) mencionan que la implementación de mapeo estructural utilizando técnicas fotogramétricas ha incrementado en los últimos años, esta técnica permite la obtención de datos de orientación, espaciamiento y persistencia para la determinación de sistemas de discontinuidades mediante un modelamiento tridimensional de la superficie del macizo rocoso generada por software de modelado fotogramétrico que parte de igual manera con fotografías digitales tomadas desde diferentes ángulos al macizo rocoso en

proyectos mineros a tajo abierto y son utilizados también en la estabilidad de taludes en proyectos superficiales.

Ambos autores concuerdan que debido a su metodología para la recolección de datos estructurales la cual consiste en solo la utilización de una cámara SLR y un software de procesamiento de datos; este método de mapeo es de muy bajo costo. Además de contar con un óptimo tiempo de realización, es un método seguro ya que no involucra riesgos por acercarse a taludes o afloramientos con potencial de deslizamiento o taludes considerados en alto riesgo, ya que las fotografías pueden ser tomadas desde distancias considerables, en comparación con los mapeos manuales (Roberto et al., 2017).

C. SFM en geomecánica subterránea

Considerando que las técnicas fotogramétricas tradicionales necesitan de una fuente de luz para su funcionamiento más óptimo y mejor recolección de datos; en minería subterránea para la automatización de los mapeos geomecánicos se reemplaza la fuente de luz por láseres de amplio espectro que, al ser acoplados en un dron con un armazón, se puede realizar el respectivo mapeo de la misma manera que en superficie.

Sin embargo, al ser un dron de características específicas su costo para su implementación es más que considerable y escapa de la premisa de esta investigación de mantener bajos costos para la accesibilidad de las unidades mineras. Las cámaras fotográficas, al ser sensores pasivos, necesitan de una fuente de energía que les permite construir el arreglo matricial que constituye una fotografía. Desde esta perspectiva, las sombras son elementos desfavorables para el procesamiento fotogramétrico, ya que se generan elementos con sombras no correspondientes al macizo rocoso a mapear. También, al igual que muchas técnicas geodésicas, se ve afectada por oclusión al objeto o escena a representar. Desde esta premisa, la solución más factible para la realización de esta técnica es la iluminación artificial hacia el objeto a modelar, considerando los puntos de sombras más adecuados para la correcta toma de imágenes del objeto (Ocsa y Barreda, 2022).

D. Configuración de una cámara para SFM

En fotogrametría, uno de los elementos más importantes es la calidad de los datos, la configuración de la cámara es fundamental para obtener imágenes de calidad para fotogrametría. Estos parámetros como la velocidad de obturación, ISO y apertura del diafragma influyen en la claridad, detalle y consistencia de las imágenes, lo que afecta directamente a la precisión y éxito del proceso fotogramétrico.

D.1 Tiempo o velocidad de obturación

Determina cuánto tiempo se expone el sensor a la luz. En fotogrametría, una velocidad de obturación alta ayuda a evitar el desenfoque por movimiento y capturar detalles nítidos. Si la velocidad de obturación es muy lenta, es probable que las imágenes salgan borrosas debido al movimiento, lo que puede dificultar el proceso de la simulación tridimensional (GeoInnova, 2024).

Tomando en consideración lo mencionado, en la aplicación de minería subterránea se necesitan velocidades más lentas de obturación y de ser posible el uso de estabilizadores o trípodes pueden ser útiles para evitar el desenfoque por movimiento.

D.2 ISO o sensibilidad

Es la sensibilidad del sensor de la cámara a la luz. Un ISO alto permite capturar imágenes en condiciones de baja luz, pero también introduce ruido en la imagen, un nivel elevado de ruido puede complicar el proceso de fotogrametría, ya que se necesita claridad para identificar características distintivas y puntos clave en las imágenes; por otro lado, mantener el ISO lo más bajo posible reduce el ruido. Conociendo esto, en entornos oscuros se puede compensar este ruido con una mayor apertura del diafragma o una velocidad de obturación más lenta.

D.3 Apertura de diafragma

Controla la cantidad de luz que entra a la cámara y también afecta la profundidad de campo; una mayor apertura (números f más bajos)

permite más luz y puede ser útil en entornos de baja luz, pero puede reducir la profundidad de campo, haciendo que ciertas partes de la imagen estén fuera de foco. Mientras que una menor apertura (números f más altos) ofrece una mayor profundidad de campo, que puede ser beneficiosa para fotogrametría, ya que proporciona más detalles en el plano focal. Para obtener imágenes nítidas y claras en fotogrametría, generalmente se prefiere una apertura media a pequeña (por ejemplo, entre $f/8$ y $f/16$). Esto ayuda a asegurar una mayor profundidad de campo, lo que a su vez contribuye a una mayor precisión en el modelo tridimensional (Geoinnova, 2024).

La configuración recomendada para la utilización de este método en minería subterránea en una cámara Canon EOS Rebel SL3 es de: velocidad de obturación de entre $1/50$ a $1/17$, ISO de 400 a 1200 y una apertura de diafragma de entre $f/1.7$ y $f/1.8$.

Figura 12

Cámara fotográfica recomendable para la realización del método SFM



1.1.7 Elaboración de modelos digitales de terrenos

La digitalización de terrenos en esta técnica SFM depende principalmente de la cantidad de imágenes tomadas de la superficie a ser modelada, para una adecuada interpolación de imágenes con el software mismo (McAnuff et al., 2019).

En un macizo como el de a continuación, donde se aprecia numerosas interacciones de discontinuidades, se realizó mediante la toma de 44 imágenes, siendo representado de la siguiente manera:

Figura 13

Macizo – vista lateral



Figura 14

Macizo - vista frontal



Figura 15

Vista planta del modelo del macizo

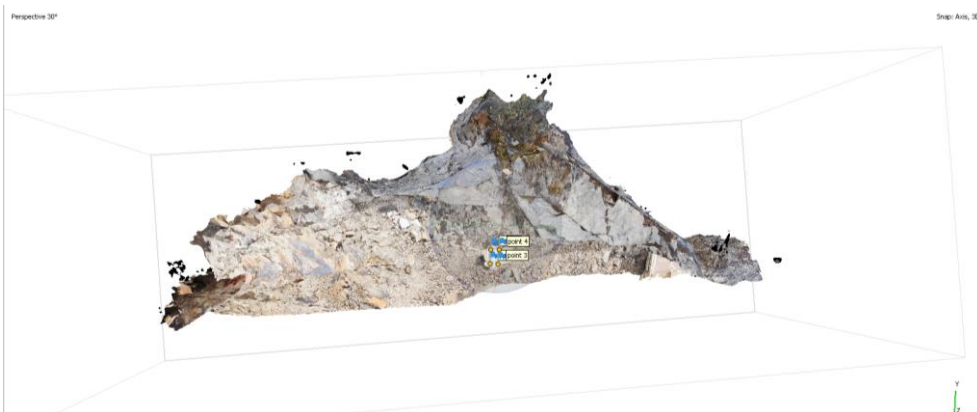


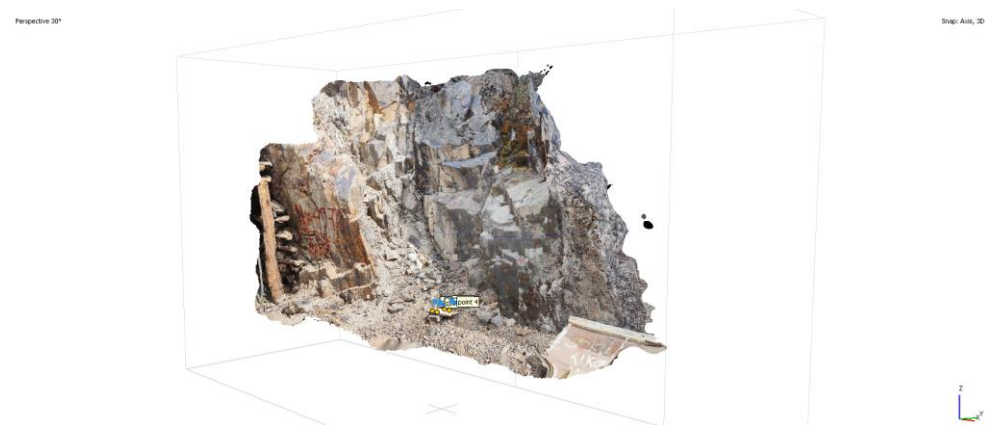
Figura 16

Vista frontal del modelo del macizo



Figura 17

Vista iso der. del modelo del macizo



A. Modelos representados en densidad de puntos

Como parte de las aplicaciones de modelos digitales de esta técnica fotogramétrica en el ámbito de la mecánica de roca, es la elaboración de modelos digitales partiendo de nubes de puntos tridimensionales hasta la elaboración de terrenos realistas. La realización de este modelo tridimensional en la mecánica de rocas tiene aplicación en la obtención de rasgos y atributos geomorfológicos de un afloramiento rocoso pudiendo identificar también parámetros geotécnicos con posibilidad de escalamiento de las dimensiones del mismo, determinación de las pendientes y realización de perfiles transversales con precisión geométrica del macizo rocoso en afloramientos de acceso complicado.

Figura 18

Densidad de puntos de un macizo

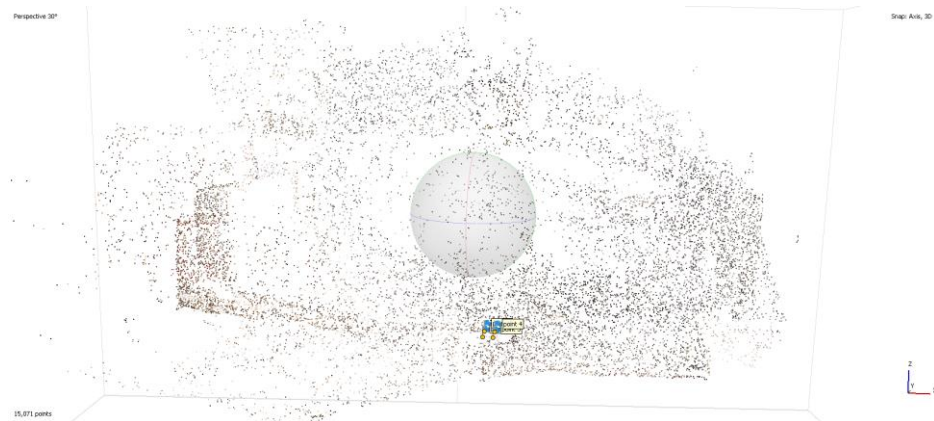


Figura 19

Vista iso. de la densidad de puntos de un macizo

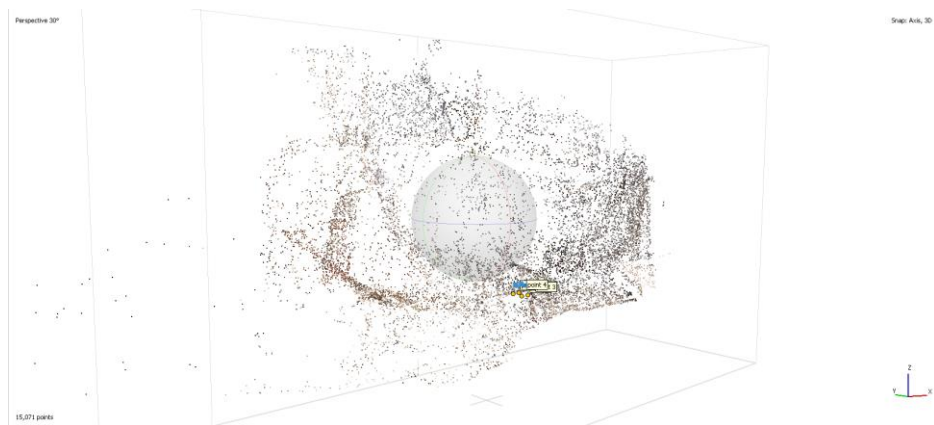


Figura 20

Modelo suavizado de la densidad de puntos

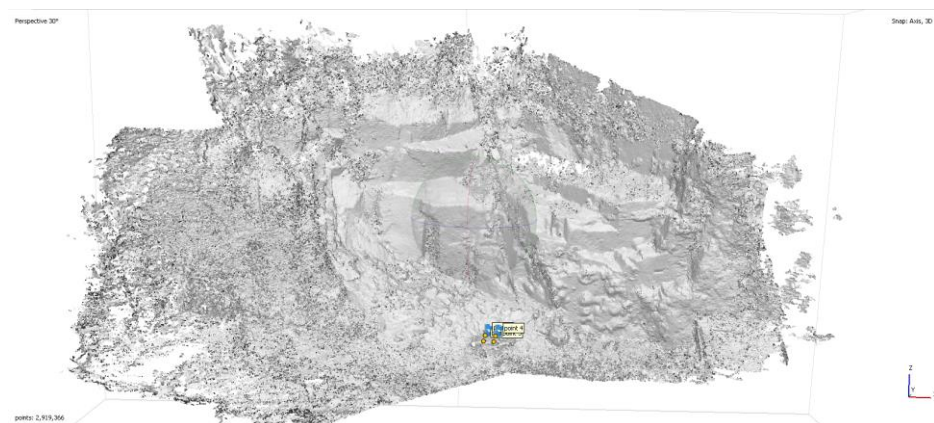


Figura 21

Vista iso. del modelo suavizado de la densidad de puntos

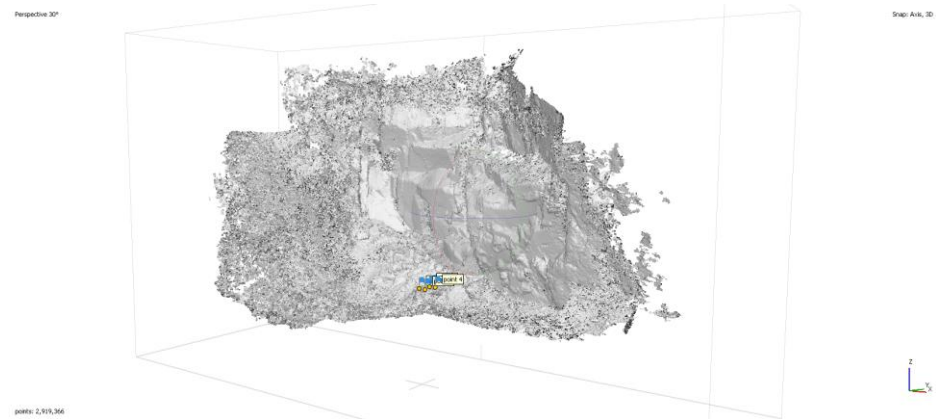


Figura 22

Modelo del enmallado de texturas de un macizo

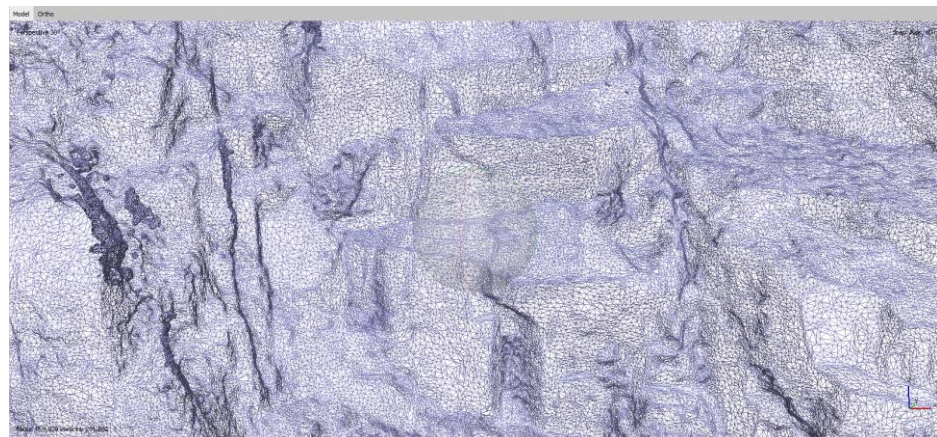
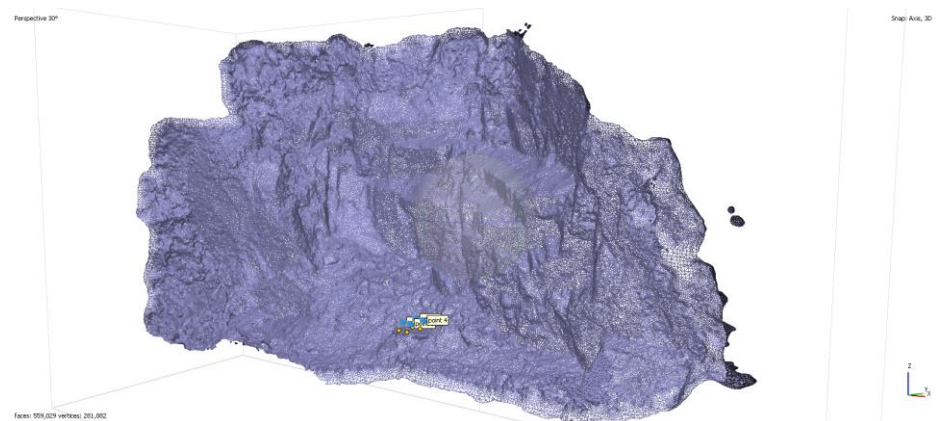


Figura 23

Vista iso. del modelo del enmallado de texturas de un macizo



1.1.8 Detección de cambios en morfología de terrenos

Esta tecnología que realiza una creación de una densidad de puntos puede ser adquirida de un terreno de análisis en diferentes tiempos a lo largo de un periodo de análisis requerido, considerando los puntos de referencia correspondientes y permitiendo realizar una comparación de los datos adquiridos del terreno analizado.

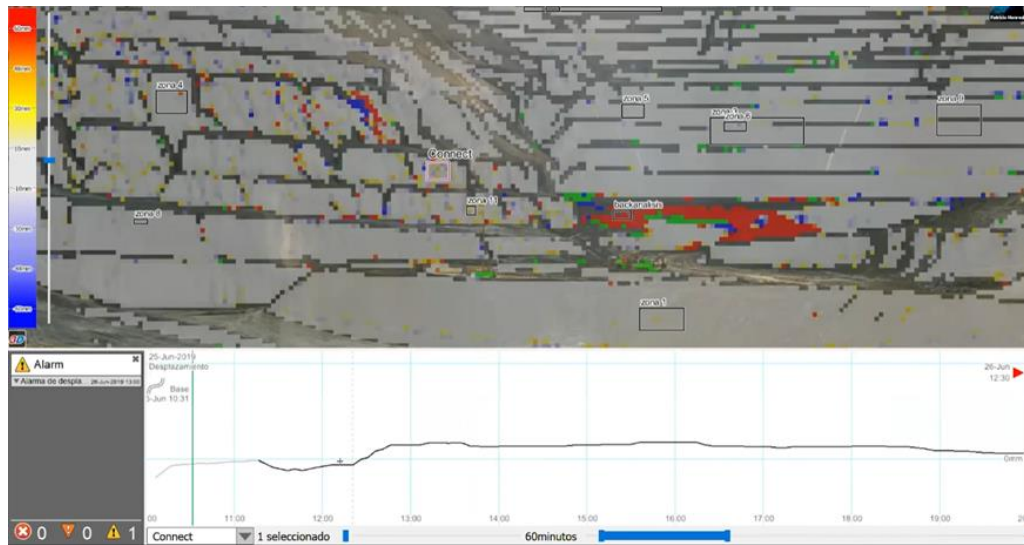
Dicho de otra manera, para la correcta realización de una detección de cambios en un terreno a ser analizado, se requiere como mínimo 2 campañas de tomas de datos, siendo la primera campaña (S_0) la inicial o de punto de referencia para definir los puntos de control para detectar los posibles cambios a suceder. McAnuff et al. (2019) dicen que “la superficie del modelamiento es construida mediante una red de triángulos irregulares, la cual conecta los puntos medidos a través de esta red triangular, cuyos vértices se corresponden con dichos puntos a través de una triangulación de Delaunay o Poisson”. Y la segunda campaña (D_i) la de puntos de comparación; para la comparación se procede a sobreponer ambas nubes de datos en un mismo eje de coordenadas absolutas y minimizar la distancia que exista entre la superposición mediante un ajuste de mínimos cuadrados (Chen y Medioni, 1992).

El monitoreo de cambios es muy importante en la minería, considerando que estos cambios pueden representar una variación e la cubicación de volúmenes de explotación y de materiales de acopio en minería superficial por ejemplo, o también, en la estabilidad de taludes y laderas, esta creación de densidad de puntos puede predecir movimientos de tierras, caídas o deslizamientos de rocas acorde al comportamiento de las variaciones encontradas o también denominados “movimientos precursores” con el monitoreo geotécnico.

Cabe mencionar también que, los radares IVIs empleados en el control geotécnico en minería superficial son los más usados en este campo, sin embargo, considerando el alto costo de estos mismos resulta contraproducente para la pequeña minería en el Perú. Sin embargo, la realización de un monitoreo con la metodología móvil SFM brinda casi los mismos resultados.

Figura 24

Radars de monitoreo para estabilidad de taludes



Nota. MAPTEK (2023).

1.1.9 Clasificación de macizos rocosos

A. Clasificación GSI - Hoek y Brown

El índice de resistencia geológico GSI (geological strength index) fue propuesto por Hoek y Brown (1985) en el que se evalúa la calidad del macizo rocoso en función del grado de facturamiento y las características de la fracturación del macizo rocoso, su estructura geológica, el tamaño de los bloques del macizo a analizar y principalmente la alteración de las discontinuidades desde una evaluación observacional.

Este índice es el método de reconocimiento del macizo más usado en minería subterránea, donde haciendo una evaluación a detalle se puede elaborar una tabla GSI específica para la unidad minera, donde se prioriza la recomendación de sostenimiento a realizar.

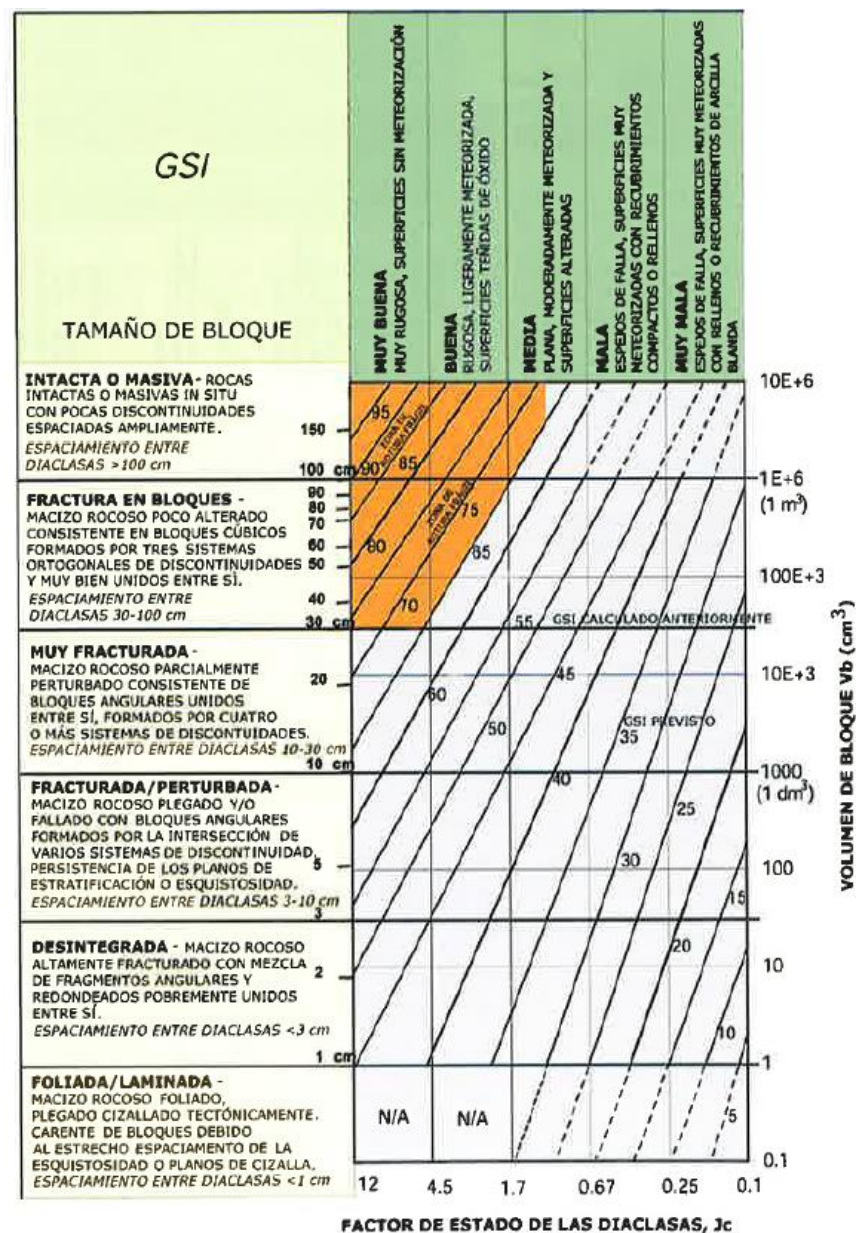
Sin embargo, esta tabla tiene una aplicación errónea al ser utilizada en análisis por desprendimientos inducidos por tensión, ya que el valor predominante en esta evaluación principalmente es la cantidad de fallas en el macizo rocoso. En tal sentido, como indica Hoek et al. (2005) el GSI sirve para estimar la resistencia y deformabilidad de macizos, mas no debe servir para seleccionar métodos de sostenimiento; esta es una herramienta

para la realización de una modelización geomecánica y sirve para la comprobación tenso-deformacional en modo de retro análisis luego de realizado un sostenimiento (Jordá et al., 2016).

En otros estudios, como el de Cai et al. (2004) se mencionan medios para poder mejorar la precisión al momento de la obtención del GSI en macizos fracturados, donde se propone la empleación de parámetros (V_b y J_c) correspondientes al RMI, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 25

Ábaco GSI en macizos rocosos fracturados a partir del índice RMI



Nota. Cai et al. (2004).

B. Clasificación de Bieniawski

Es una de las primeras clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos. Fue propuesta en 1973, partiendo de la estimación de (5) parámetros iniciales de las condiciones del macizo y de sus discontinuidades, fue modificada en años posteriores consecutivamente en 1976, 1979, 1984 y 1989, siendo esta la última variación considerable independientemente de un factor de corrección (2014), donde se considera la evaluación de la orientación de las discontinuidades sub horizontales y verticales (Belandria y Bongiorno, 2022).

Los parámetros a consideración en la evaluación de esta clasificación geomecánica son la valoración de la resistencia de la matriz rocosa, el índice RQD, la condición de las discontinuidades y parámetros hidrogeológicos del macizo (Bieniawski, 1978), la cual es representada mediante la ecuación:

$$RMR_{basico} = RMR1 + RMR2 + RMR3 + RMR4 + RMR5 \dots \text{Ec. (26)}$$

- Donde:
- RMR1 = Resistencia de la matriz rocosa; RMR2 = Índice RQD (Rock Quality Deignation); RMR3 = Separación entre discontinuidades; RMR4 = Estado de las discontinuidades; RMR5 = Presencia de agua.

Tabla 1

Valoración de los parámetros del RMR89

1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de carga puntual Compresión simple	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple		
			>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
3	Separación entre diaclasas (m)		>2	0.6-2	0.2-0.6	0.6-0.2	<0.06		
	Puntuación		20	15	10	8	5		

4	Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20
	Puntuación	6	4	2	1	0
	Abertura	Nada	<0.1	0.1-1.0	1.0-5.0	>5.0
	Puntuación	6	5	3	1	0
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Lig. Rugosa	Ondulada	Suave
	Puntuación	6	5	3	1	0
	Relleno	Ninguna	Duro <5	Duro >5	Blando <5	Blando >5
	Puntuación	6	4	2	2	0
5	Alteración	Inalterada	Lig. alterada	Mod. alterada	Muy alterada	Descompuesta
	Puntuación	6	5	3	1	0
	Agua freática	Nula	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min
	Cantidad	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
5	Estado	Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo
	Puntuación	15	10	7	4	0

Nota. Belandria y Bongiorno (2022).

El parámetro de corrección o ajuste por orientación de las juntas es considerado como el 6to parámetro del RMR89, el cual afecta de manera significativa a la evaluación de esta clasificación geomecánica debido a la orientación con respecto al eje de la excavación y de la matriz rocosa, la cual es representada mediante la ecuación:

$$RMR(89)_{corr.} = RMR89 + RMR6 \quad \dots \text{Ec. (27)}$$

- RMR6 = Corrección por la orientación de discontinuidades

Tabla 2

Corrección por la orientación de discontinuidades

Corrección por la orientación de las discontinuidades						
	Dirección y buzamiento	Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
Valor para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Nota. Jordá et al. (2016).

Tabla 3

Orientación de las discontinuidades en un túnel

Orientación de las discontinuidades en un túnel						
Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buz. 0-20° en cualquier dirección
Exc. a favor del buz.		Exc. contra el buz.				
Buz.:45-90°	Buz.:20-45°	Buz.:45-90°	Buz.:20-45°	Buz.:45-90°	Buz.:20-45°	
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	

Desfavorable

Nota. Jordá et al. (2016).

Basado en esta estimación, Bieniawski dio recomendaciones sobre el tipo de sostenimiento y el ancho de la excavación o longitud del vano acorde a los resultados obtenidos de caracterizar el macizo rocoso con esta metodología, siendo la siguiente:

Tabla 4

Clasificación de macizos rocosos - RMR89

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Valoración RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Tiempo de estabilidad y longitud del claro inicial (1979)	10 años 15 m de claro	6 meses 8 m de claro	1 semana 5 m de claro	10 horas 2.5 m de claro	30 minutos 1 m de claro
Tiempo de estabilidad y longitud del claro (Bieniawski 1989)	20 años 15 m de claro	1 año 10 m de claro	1 semana 5 m de claro	10 horas 2.5 m de claro	30 minutos 1 m de claro
Cohesión (MPa)	>0.4	0.3-0.4	0.2-0.3	0.1-0.2	<0.1
Cohesión (kg/cm ²)	>4	3-4	2-3	1-2	<1
Ángulo de fricción interno	>45°	35-45°	25-35°	15-25°	<15°

Nota. Alvarado (2020).

C. Q de Barton

Sistema de clasificación de macizos rocosos desarrollada en 1974 por Barton, Lien y Lunde, es una clasificación la cual permite establecer

sistemas de sostenimientos para excavaciones subterráneas y túneles de manera más compleja a la mencionada por Bieniawski en el 1973 y dependiendo de las características encontradas en el terreno y considerando como factor extra a la influencia del estado tensional de las rocas.

El sistema de clasificación Q se basa en a la evaluación numérica de seis parámetros que definen este índice. La cual es representada mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad \dots \text{Ec. (28)}$$

Donde:

- RQD : Índice de calidad de la roca.
- J_n : Grado de fracturación o n° de familias de discontinuidades.
- J_r : Índice de rugosidad, relleno y continuidad de discontinuidades.
- J_a : Grado de alteración de las discontinuidades.
- J_w : Coeficiente reductor por la presencia de agua.
- SRF : (Stress reduction factor) Coeficiente de la influencia del estado tensional sobre el macizo rocoso.

Conociendo que cada cociente resultante de la división de cada par de parámetros representa a un parámetro del macizo rocoso, se define que:

El 1er cociente ($R.Q.D./J_n$) representa al tamaño de los bloques; el 2do cociente (J_r/J_a) representa la resistencia al corte entre los bloques; el 3er cociente (J_w/SRF) representa el estado tensional del macizo rocoso.

Sugerencias para el uso de dichas tablas:

- Para el valor del RQD, al no disponer de sondeos, este valor se puede estimar a partir de afloramientos, mediante el índice volumétrico de juntas J_v o dependiendo su uso acorde a como lo recomiendan autores como:

Tabla 5

Métodos de cálculo del RQD

Formula	Autor	Recomendación de uso
$RQD = 115 - 3.3Jv$	Palmstrom y ISRM 1978	General - Bloques planos o alargados por su mayor correlación
$RQD = 110 - 2.5Jv$	Palmstrom 2005	General - $Jv = 4-44$, mayor correlación en bloques cúbicos
$RQD = 100e^{-\lambda t}(\lambda t + 1)$ $t = 0.1$	Priest y Hudson 1976	General - Para registros lineales (scanlines de 1 a 5m)
$RQD = 110.4 - 3.6\lambda$	Priest y Hudson 1976	Para aplicación en scanlines de entre 6 a $16m^{-1}$
$RQD = \frac{100}{1 - e^{-\lambda L} - \lambda L e^{-\lambda L}} [e^{-\lambda t}(\lambda t + 1) - e^{-\lambda L}(\lambda L + 1)]$ $t = 0.1$	Sen y Kazi 1984	General - Para registros lineales (scanlines menores a 1m)

Nota. Jordá et al. (2016).

- Para el valor de J_n , este puede estar afectado por la foliación, esquistosidad o laminaciones, pero si las discontinuidades paralelas se encuentran suficientemente desarrolladas, es recomendable contabilizarlas como si se tratara de una familia de discontinuidades, caso contrario se deben contabilizar como discontinuidades ocasionales.
- Para los valores de J_r y J_a de una familia de discontinuidades, hay que elegir primeramente a las discontinuidades de orientación desfavorable, aunque estas no den el mínimo valor del cociente de este parámetro, incluso si estas juntas están rellenas de arcillas más débiles.
- Por otro lado, en el caso de encontrarnos con rocas anisótropas, el parámetro UCS de la roca (resistencia a la compresión simple), y la resistencia a la tracción directa o indirecta, σ_c y σ_t , deben ser evaluados en la zona más desfavorable para tener un parámetro completo de la estabilidad en estructuras subterráneas.

Finalmente, los resultados de la realización de esta caracterización del macizo rocoso mediante este método se clasifican en:

Tabla 6

Clasificación de macizos rocosos - Índice de calidad Q

Descripción de tipo de roca	Valor de Q
Excepcionalmente buena	400 - 1000
Extremadamente buena	100 – 400
Muy buena	40 – 100
Buena	10 – 40
Regular	4 – 10
Mala	1 – 4
Muy mala	0,1 – 1
Extremadamente mala	0,01 – 0,1
Excepcionalmente mala	0,001 – 0,01

Nota. Alvarado (2020).

1.1.10 Caracterización de macizos rocosos con SFM

La información obtenida mediante la realización de esta metodología en un macizo rocoso nos brinda la posibilidad de realizar un mapeo geomecánico a detalle que concuerda con las características de un adecuado mapeo postulado por Bieniawski en el 89, con información la principal información como buzamiento y dirección de buzamiento de las discontinuidades, RQD, cantidad de familias de discontinuidades, características de las discontinuidades como espaciado y persistencia, parámetros utilizados para caracterizar macizos rocosos y brindar una respectiva clasificación geomecánica como el RMR o el Q de Barton. Este proceso al ser realizado en gabinete y está condicionado a la práctica y experiencia que tenga el usuario y algunas veces resulta ser laborioso debido al nivel de detalle del macizo rocoso analizado. La realización de lo mencionado es de la siguiente manera:

A. Determinación del buzamiento y dirección del buzamiento

Como lo indican Jordá et al. (2016) para la correcta realización de las mediciones de Dip y DipDir de las discontinuidades en SFM, se requiere que se tengan como mínimo 3 puntos de control situados de manera horizontal o vertical en una parte del terreno, en este caso en la base del terreno. Realizando las mediciones en cada cara de cada discontinuidad considerada como representativa.

Figura 26

Vista frontal del macizo para determinar sus valores



Figura 27

Determinación de Dip/DipDir de las discontinuidades más resaltantes

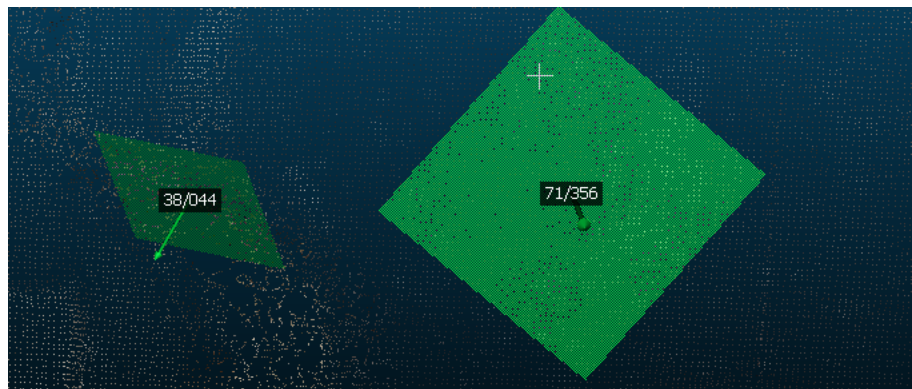


Figura 28

Orientación de los planos de Dip/DipDir con respecto a los puntos de control

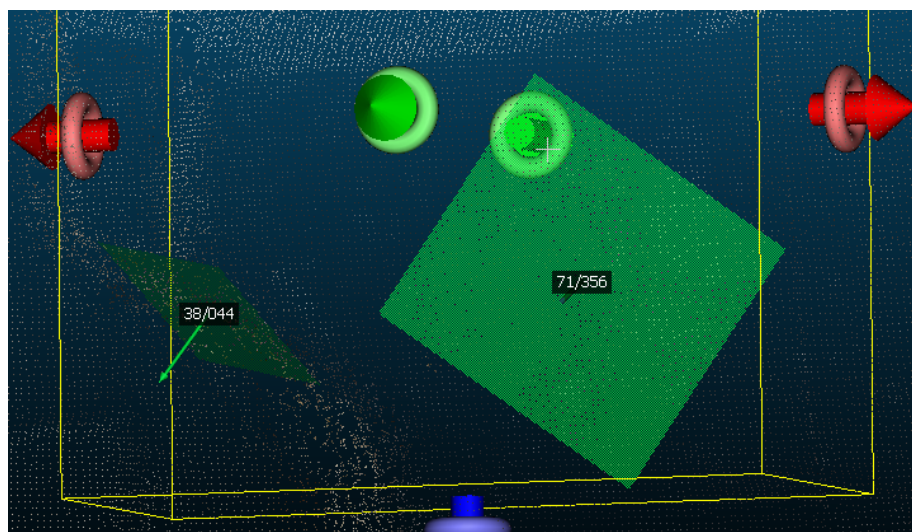


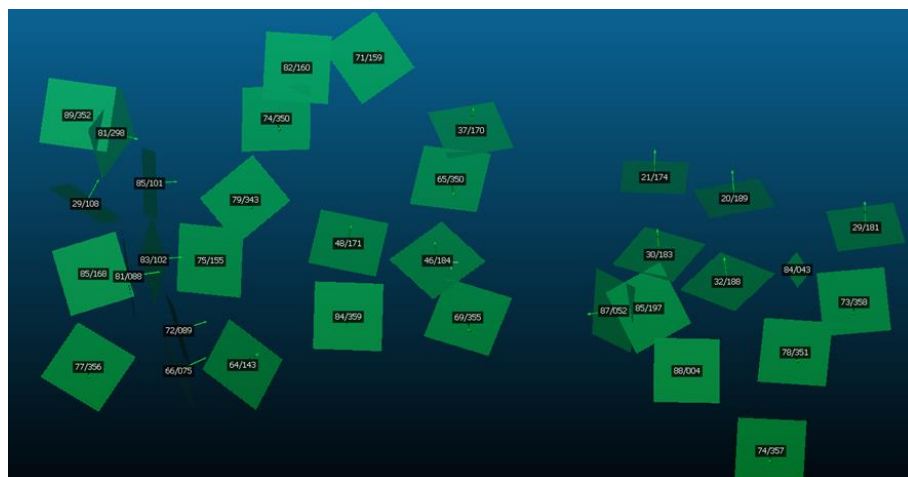
Figura 29

Determinación de la orientación de discontinuidades en todo el macizo



Figura 30

Planos de discontinuidades espacialmente georreferenciados

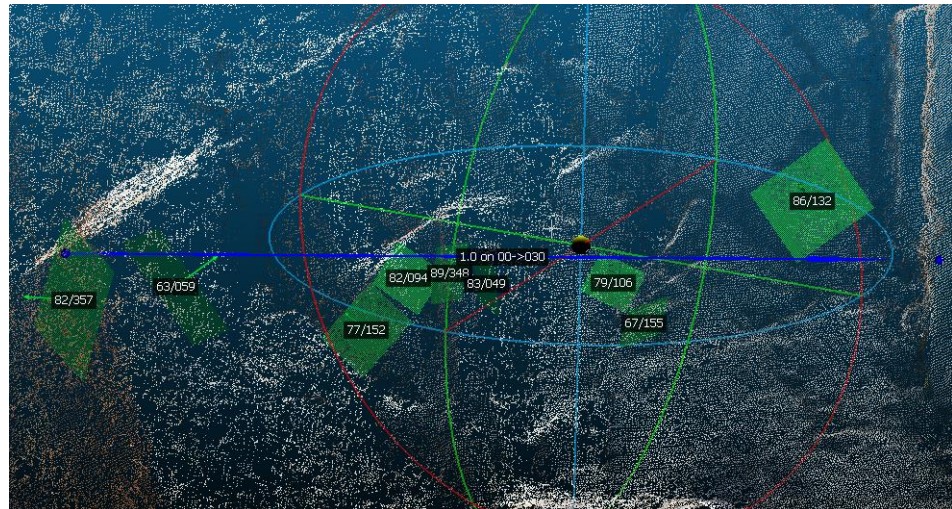


B. Determinación del RQD

Para la realización de las mediciones de distancias, el software CloudCompare dispone de la capacidad de realizar medidas lineales en las 3 direcciones, donde para la determinación del RQD del macizo se usa la manera tradicional de encontrar la cantidad de discontinuidades que intersectan la medida lineal de 1m en el macizo, el cual con SFM se ve en la siguiente imagen.

Figura 31

Planos de discontinuidades para la determinación del RQD



Como se aprecia en la imagen, en un metro lineal que es representado por la recta azul, se tienen 9 discontinuidades que la intersecan a lo largo del corte.

C. Determinación del espaciamiento

Para la determinación de este parámetro, se utiliza la misma medición lineal mencionada anteriormente, una vez determinadas las discontinuidades. A su vez, al tener la representación del modelamiento en escala 1:1, la posibilidad de tener errores es mínima, considerando que los parámetros para el valor de espaciamiento se encuentran en rangos de medidas, como:

Tabla 7

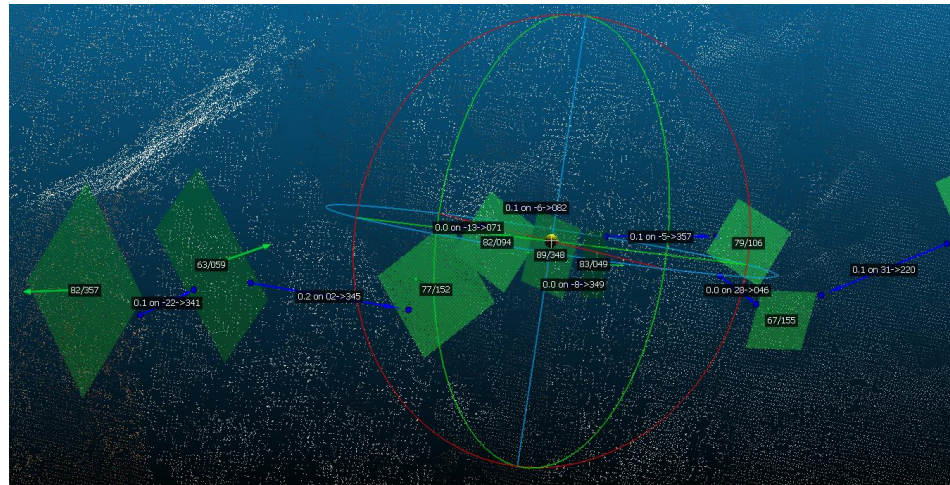
Parámetros de espaciamiento del RMR89

Separación entre diaclasas (m)	>2	0.6-2	0.2-0.6	0.6-0.2	<0.06
Puntuación	20	15	10	8	5

Nota. Belandria y Bongiorno (2022).

Figura 32

Separación entre diaclasas



Las medidas de las separaciones entre discontinuidades están representadas por las líneas divisorias de color azul, en un campo tridimensional que puede ser medido incluso desde el centro de cada plano de discontinuidad.

D. Determinación de la persistencia

Para la determinación de este parámetro, al igual que el anterior, se utiliza la misma medición lineal mencionada. Al tener la representación del modelamiento en escala 1:1, se considera los parámetros para el valor de espaciamiento se encuentran en rangos de medidas, como:

Tabla 8

Parámetros de persistencia del RMR89

Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20
Puntuación	6	4	2	1	0

Nota. Belandria y Bongiorno (2022).

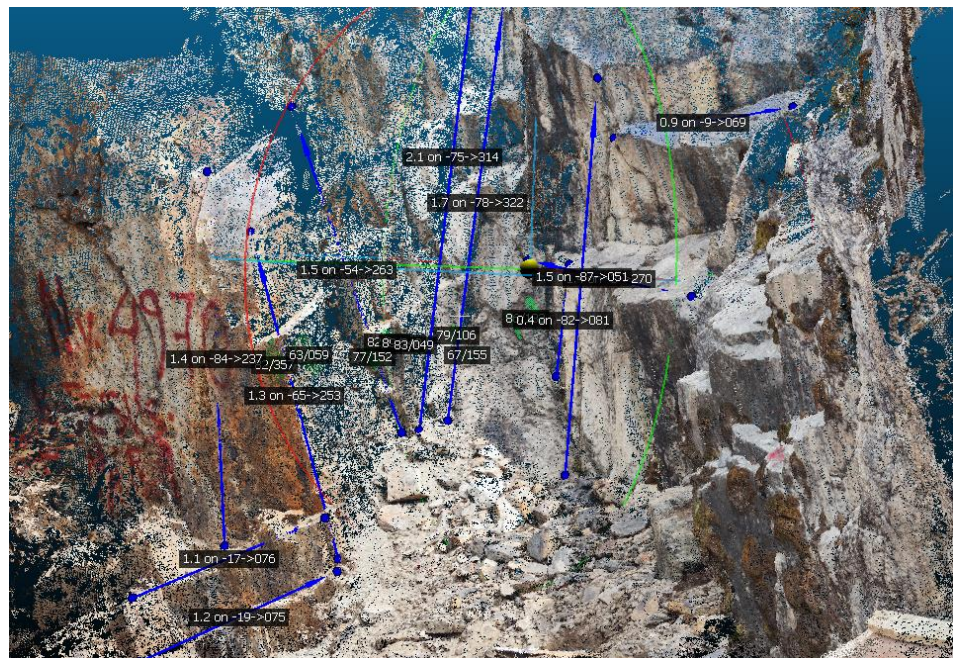
Figura 33

Longitud de las discontinuidades - vista iso. izq.



Figura 34

Longitud de las discontinuidades - vista iso. der.



En las imágenes se pueden apreciar que, para la determinación de la persistencia de las discontinuidades, dependerá en la dimensión del macizo modelado; debido a que, si se toma solo una pequeña parte del

macizo, esta se verá limitada por la distancia misma escalada y no se podrá estimar a una distancia mayor a la que ya está dada.

E. Determinación de la rugosidad

Para la determinación de este parámetro en un macizo superficial, se tendrá una mayor posibilidad de realización, debido al motivo de que las caras de los taludes no se encuentran perfilados; sin embargo, en un macizo subterráneo este parámetro se determina con mayor dificultad debido a la perfilación de las labores subterráneas.

Figura 35

Determinación de la rugosidad de una superficie

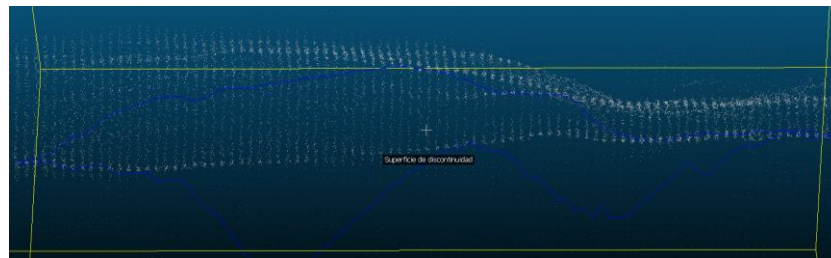
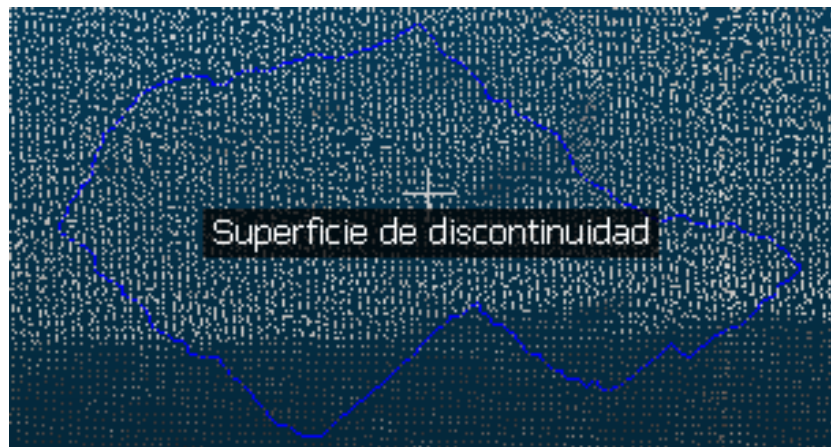


Figura 36

Rugosidad de una superficie de discontinuidad



F. Determinación de la apertura, relleno y filtraciones de agua

Debido a la resolución del modelo de puntos, la determinación del parámetro de apertura en el modelo no permite establecer el valor exacto, sin embargo, este parámetro es un valor mejorable de poder tener un equipo computador que realice el modelo de densidad de punto a mayor

detalle de más de 50 millones de puntos de ser posible (Melo y Castellanos, 2022).

Sobre el parámetro de relleno, al tener que distinguir entre la dureza de cada tipo de relleno, esta característica es preferiblemente identificarla y describirla en campo.

La filtración de agua, al ser una característica medible en la cantidad de fluido presente y el caudal mismo, no es recomendable ser identificado con el modelamiento en gabinete. Es una característica preferiblemente identificada en campo (Melo y Castellanos, 2022).

1.2 Antecedentes

1.2.1 Internacionales

Zhu et al. (2024) investigando en India sobre la aplicación de la fotogrametría UAV para monitorear el hundimiento superficial progresivo con un modelo dependiente del tiempo, menciona que se ha demostrado que el método clásico de mapeo y detección es inadecuado para monitorear esta subsidencia progresiva de la superficie asociada con la minería subterránea, utilizó tecnología de fotogrametría para rastrear su evolución durante un año. Los datos se analizaron utilizando un modelo que describe la deflexión con respecto al tiempo en segmentos lineales de diferentes dimensiones en escalas log-log, mostrando una desaceleración y tendió a estabilizarse sobre el efecto de una excavación subterránea. Los resultados demostraron que la tecnología de fotogrametría puede proporcionar una comprensión integral desde un punto espacial.

Por otra parte, Karsli et al. (2024) nos mencionan también sobre la utilización de nubes de puntos fotogramétricas y LiDAR utilizando un novedoso enfoque de Octree mejorado para la extracción automática de la huella en construcciones civiles, que al ser datos ópticos es un proceso que consume mucho tiempo y es un problema desafiante debido a las irregularidades geométricas, los puntos ruidosos, la densidad de puntos y la precisión. El método consiste en separar los objetos del suelo y por encima del suelo de la nube de puntos utilizando el Filtro Morfológico Simple (SMRF), eliminar puntos ruidosos de la nube de puntos con el algoritmo de agrupamiento espacial basado en densidad para

aplicaciones con ruido (DBSCAN). El enfoque utilizado fue detección fotogramétrica y rango de luz (LiDAR) en cuatro áreas de prueba. Los resultados de precisión fueron superiores al 90% para las nubes de puntos fotogramétricas y superiores al 97% para la nube de puntos LiDAR. Concluyendo que el enfoque propuesto permite la extracción y regularización automática a partir de nubes de puntos, siendo más eficiente y rápido.

Según Gläßer y Seyfert (2024) sobre la fotogrametría analógica para aplicaciones temáticas en rangos espectrales específicos, menciona que, con el desarrollo dinámico de nuevas tecnologías de grabación digital, los métodos espectrales terrestres para diversas aplicaciones temáticas están experimentando no solo un renacimiento en muchos temas especializados, como en la minería subterránea, sino que también se están abriendo nuevas posibilidades de aplicación. Enfocándose netamente en las aplicaciones de los métodos fotográficos espectrales analógicos en Alemania, en las áreas de geología, minería, ciencia del suelo y vegetación revelan grandes resultados.

En palabras de Hu et al. (2024) sobre los puntos de fotogrametría oblicua, puede realizarse una extracción basadas en PointNet++ con mecanismo de atención ya que, al capturar nubes de puntos oblicuas en escenas exteriores, las características de las imágenes se ven afectadas por el punto de vista, iluminación, oclusión, ruido y condiciones de la imagen, lo que dificulta su extracción. Se menciona que los cambios en la elevación del suelo pueden facilitar esta tarea y los datos de nubes de puntos pueden reflejar esta información con precisión. Desarrollamos un método inteligente de extracción de nubes de puntos, incorporando un módulo de atención en las operaciones de Samling y PointNet dentro de la capa de abstracción de conjunto de la red PointNet++, se logró métricas de: 95.7% de intersección sobre unión, 96.5% de precisión, 98.7% de recall y 97.8% de F1 score, mejorando la precisión general del modelo en un 3%.

Según An et al. (2024) el potencial de la fotogrametría con la utilización de teléfonos inteligentes para la medición de la rugosidad de las juntas de un macizo rocoso en campo, son cruciales para determinar el comportamiento y la estabilidad de las masas rocosas. Y a pesar de su importancia, existen pocos dispositivos que midan fácilmente y con precisión la rugosidad de juntas en

campo. Explora el potencial de la fotogrametría con smartphones como solución para el mapeo de rugosidad de juntas a gran escala. Utilizó una gran junta natural de roca de una mina a cielo abierto en Yunnan, China; empleando parámetros de rugosidad (2D) y (3D) para caracterizar la rugosidad de las juntas. Encontrando que la precisión de la fotogrametría con smartphones es aceptable con la orientación adecuada. Los errores de medición fueron 1.7%, 4.7%, 7.8% y 6.1% para los parámetros de rugosidad $Z1$, Ai , $Z2$ y PSD-D, respectivamente. En conclusión, el estudio demuestra que la fotogrametría con smartphones es un método portátil y rentable para medir la rugosidad de juntas en campo, beneficiando significativamente las investigaciones geológicas de ingeniería.

Como expresa Douglas et al. (2024) sobre el monitoreo de la condición de una carretera utilizando fotogrametría de UAV alineada con la curva principal de la ruta del transporte de una mina; las vías de acarreo en minas se deterioran rápidamente debido a las cargas extremas sobre materiales de construcción subóptimos. El método fotogramétrico es adecuado para cuantificar las condiciones de redes viales en grandes superficies, como rugosidad, defectos y pendientes, optimizando la reparación de condiciones deficientes y reduciendo costos. Esta investigación propuso un nuevo método de análisis utilizando el centro de la carretera determinado por el análisis de curva principal del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) de un camión de acarreo. Se generó una nube de puntos densa mediante fotogrametría con UAV y se realizó un análisis de regresión lineal múltiple en cada cuadrícula. El error cuadrático medio en cada cuadrícula indicó la rugosidad de la superficie. Este método se aplicó a 26 secciones viales y los resultados se validaron con imágenes tomadas desde la perspectiva del operador del camión, identificándose defectos como ondulaciones y depresiones con agua. Los resultados demuestran que este es un método válido para la identificación y cuantificación de defectos viales en una unidad minera.

De acuerdo con Gharehdash et al. (2024) que estudiaron sobre la caracterización de la morfología de partículas de agregados de roca mediante modelos SFM con modelos geométricos computacionales, mencionan que se ofrece una comprensión integral de los conceptos geométricos más importantes para partículas de forma cóncava con muy baja esfericidad. Examinaron las envolventes cóncavas en el espacio tridimensional, enfatizando algoritmos

precisos y asintóticamente rápidos, diseñando un algoritmo de envolvente cóncava tridimensional para generar la forma real de partículas irregulares a través de un conjunto de datos de coordenadas de superficie 3D capturados por un escáner láser portátil y fotogrametría. El algoritmo se utiliza para evaluar varios parámetros geométricos en grandes agregados de desecho y rocas, incluyendo textura superficial, volumen de la envolvente cóncava, perímetros del área proyectada y cómputo de concavidad, que no se habían probado antes en partículas de forma cóncava muy irregular. En conclusión, se identificó la precisión al implementar el algoritmo propuesto de envolvente cóncava 3D para análisis morfológico de partículas cóncavas y compara los resultados con el Método de Elementos Finitos (FEM), el enfoque de representación polar (PRA) y datos experimentales.

Por su parte, Wroblewski et al. (2024) estudiaron sobre el diseño de mallas estructuradas de excavaciones mineras subterráneas basadas en tendencias de variabilidad de nubes de puntos reales a partir de escaneo láser para modelación numérica de flujo de aire con fotogrametría. Se utilizaron diversas tecnologías para adquirir y procesar datos 3D de excavaciones mineras, como el Escaneo Láser Terrestre (TLS), fotogrametría o Sistemas de Mapeo Móvil (MMS) con algoritmos de Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Debido a las condiciones de medición difíciles, los datos obtenidos suelen ser incompletos o inexactos, con lagunas en la nube de puntos debido a objetos que ocultan el túnel. Por otro lado, el modelado preciso de flujos de aire es un desafío para el análisis numérico de flujos de aire en excavaciones mineras utilizando herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Los autores propusieron un método para crear un modelo sintético basado en datos reales, procesando datos 3D de túneles mineros subterráneos capturados por un sensor LiDAR. Empleando la extracción de características para crear un túnel muestreado uniformemente de dimensiones y forma transversal dada, aplicando características obtenidas, como la trayectoria general del túnel, formas de las paredes y ruido adicional valioso para obtener superficies de rugosidad deseada. Este enfoque tiene el potencial de acortar la preparación de geometría, aumentar la calidad de las mallas computacionales, reducir el tiempo de discretización y aumentar la precisión de los resultados obtenidos en redes de ventilación subterránea extensas.

X. Zhu et al. (2023) mencionan también que un enfoque webgis 3d multiescalar compatible con fotogrametría oblicua puede analizar deformaciones inducidas en minería subterránea de carbón, ya que, en estas circunstancias, inevitablemente causará serias deformaciones en el suelo. Las aplicaciones actuales basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) webGIS suelen utilizar datos SIG en 2D y carecen de un marco holístico. Este estudio presentó un marco unificado de webGIS 3D compatible con fotogrametría oblicua de múltiples escalas para aplicaciones de MIDA para llenar este vacío. El marco propuesto fue probado y evaluado en el área minera de Qianyingzi en el este de China. Los resultados demostraron que la fotogrametría oblicua de múltiples escalas equilibra la calidad de los datos y la eficiencia de adquisición y proporciona una buena fuente de conjuntos de datos SIG, y la plataforma web tiene una buena precisión espacial absoluta y relativa verificada por dos tipos de datos de validación. Los resultados de la aplicación práctica demostraron la viabilidad y confiabilidad del sistema. El sistema prototipo MIDA basado en web desarrollado alcanza un rendimiento atractivo y puede ser fácilmente ampliado a aplicaciones geocientíficas similares.

De acuerdo con Saiz (2022) la aplicación de técnicas de modelización 3D de bajo coste es posible gracias a las nuevas técnicas de captura, tratamiento y representación de datos tridimensionales en las cuales se es requerido solo la utilización de una cámara fotográfica o un dispositivo orientado a la captura de movimiento (Kinect) para el mantenimiento y conservación del patrimonio geológico y minero. Esta técnica que señala en su investigación, es basada en fotogrametría con cámaras fotográficas no métricas que tiene un tratamiento de datos relativamente menores a los procesados por un láser escáner en minería superficial y mediante la generación de nubes de puntos, siendo esta una alternativa low-cost para las empresas, como en el caso de estudio para la minera Piedrona en la cual la implementación de este sistema mejoro el tratamiento y gestión de datos hasta la obtención de un modelo tridimensional del yacimiento.

Por otra parte, Fernández (2021) indica sobre el mapeo geotécnico en base a fotogrametría con drones y estaciones robóticas en minería superficial, que se puede obtener una caracterización geotécnica utilizando data partiendo de misiones de vuelo de drones y así poder identificar los desplazamientos de un área

de interés brindando de esta manera una alternativa a métodos tradicionales de mapeo geotécnico como las campañas de terreno in situ: línea de detalle (scanline), mapeo por ventanas (sampling windows) o topografía tradicional para el cálculo de desplazamiento de volúmenes. En el caso de estudio que analizó (mina El Soldado – Angloamerican – Chile) utilizando los softwares Agisoft, CloudCompare y Discontinuity Set Extractor (DSE) para el procesamiento de datos en el mapeo geotécnico, permitiendo la extracción de familias de discontinuidades asociadas a los taludes estudiados, pudiendo realizar un análisis cinemático eficiente, encontrando una alta probabilidad de ocurrencia de fallas planares y toppling directo (32%) y estructuras críticas con potencial falla en un 51%. Concluyendo que el algoritmo de extracción de discontinuidades de los softwares utilizados son una alternativa real para la extracción e identificación de familias de discontinuidades a través de nubes de puntos.

Como expresa García (2020) quien realizó un estudio geomecánico aplicando fotogrametría en las canteras de Uruzca - Guayabal – Ecuador, para la determinación de la calidad del macizo rocoso y diseñar un modelo digital de elevación (MDE) en afloramientos del cerro Guayabal. La metodología que utilizo fue la de sobrevuelos con dron en 3 concesiones mineras y a la vez la realización de estaciones geomecánicas (EG) dentro del área de estudio, analizando un total de 4 taludes para su determinación de parámetros de clasificación geomecánica. Tuvo como resultado del estudio que existe una relación entre el modelo digital MDE y la calidad del macizo rocoso, lo cual quiere decir que, la utilización de EG y fotogrametría para la determinación de calidad del macizo rocoso brinda un criterio más generalizado y a la vez preciso acorde a los afloramientos en la zona de estudio.

En palabras de Ruiz (2019) sobre la contribución de la fotogrametría y la modelización numérica a la gestión recursos hídricos, en su estudio realizado en las cuencas de Cádiz; se centró en el ajuste de modelos de balance basado en técnicas SFM no convencionales, además de la implementación de modelos numéricos de optimización para la definición de estrategias de gestión de aguas subterráneas y superficiales. Indica que el procesamiento y exportación de fotografías de bajo costo el cual fue basado en técnicas fotogramétricas de algoritmos SFM mediante el uso de cámaras Time-lapse y vehículos aéreos no

tripulados, ayudo en la identificación de singularidades en la gestión de la cuenca para definir las estrategias de optimización de los recursos hídricos. Teniendo como resultado de su investigación que, la metodología utilizada para la obtención de datos (SFM) le permitió cuantificar las infiltraciones en embalses en la cuenca, relacionar los caudales infiltrados y definir cartográficamente en 3D y alta resolución la zona de estudio para poder definir y optimizar los recursos hídricos.

Como indica Sánchez (2017) en su proyecto de investigación sobre las aplicaciones de drones en minería, los drones son la tecnología actual que reemplaza y continuara reemplazando métodos como los levantamientos topográficos superficiales con estación total, en los que al ser autónomos se les puede equipar sensores acordes a las necesidades en cada proyecto, como sensores multiespectrales, sensores laser, cámaras termográficas o las más conocidas cámaras fotográfica. Se concluye que debido a la gran cantidad de datos que pueden ser procesados con técnicas de levantamiento fotogramétricas, estos presentan una mayor precisión, eficiencia y sostenibilidad con la minería moderna, siempre considerando la capacidad adquisitiva en proyectos de gran envergadura para etapas como topografía, control de operaciones, prospección o inspección técnica.

Riquelme et al. (2017) analizó la manera de identificar familias de discontinuidades en macizos rocosos a nivel superficial mediante la utilización de escáner laser terrestre (TLS) y las comparo con la determinación de densidad de puntos utilizando fotogrametría (SFM), logrando tener así un análisis comparativo entre ambos métodos. Menciona que es una técnica relativamente más barata comparada con el escáner láser que realizan el mismo fin el cual es la generación de modelamiento 3D de un talud rocoso. La zona de estudio fue Alicante - España en el cual se utilizó puntos de control terrestre extraídos de coordenadas conocidas, llegando a una comparación de que mediante la utilización de TLS y SFM el error fue menor que 3mm. La comparación de la densidad de puntos resultante tuvo una buena correlación cuando la superficie es ortogonal a la línea de control en TLS; por otro lado, la técnica SFM mostró ciertas inconsistencias en superficies oblicuas. Teniendo como resultado final 3 familias de discontinuidades en el talud de la zona de estudio, ambos con una gran similitud al terreno real, pero el TLS con mayor cantidad de detalle respecto al SFM.

Según Oppikofer et al. (2012) la utilización de técnicas y softwares para la obtención de la orientación de cada plano de discontinuidades de un mapeo de un talud normalmente es utilizado para la primera fase de un mapeo, el cual es la identificación del plano y su vector normal en cada punto especificado. Oppikofer et al. (2012) desarrolló un software llamado “Clotop3D” el cual utiliza un código de colores acorde a las orientaciones e inclinaciones del talud en estudio (tomando en cuenta un determinado radio de búsqueda dependiendo de las fotografías realizadas para el análisis). De este modo la determinación de la dirección de buzamiento y buzamiento de manera computacional puede ser más didáctica y entendible como si fuera realizado con una brújula, pero representándolas en una gama de colores agrupando a las discontinuidades de una misma familia.

1.2.2 Nacionales

Por su parte Bustamante (2022) aporta con su investigación para optimizar levantamientos topográficos utilizando fotogrametría con dron en minería superficial, específicamente para los stocks de mineral, que el uso de drones para realizar levantamientos topográficos representa un gran beneficio tanto para la empresa como los trabajadores, acelerando el tiempo de ejecución de los levantamientos y llegando a reemplazar los equipos existentes en la unidad minera de estudio. Concluyendo que el método propuesto en su investigación logro una optimización de los levantamientos topográficos reduciendo el tiempo de ejecución al 30% de su realización con estación total y un análisis de datos en gabinete del 35% del tiempo realizado con una estación total. Teniendo una diferencia de 80 minutos en la ejecución del mismo trabajo con diferentes equipos. Considerando además que el precio del dron usado para la realización del estudio representa en solo una quinta parte del equipo anterior y contando con el requerimiento de menos accesorios y personal para su ejecución, eliminando el principal riesgo de caída de altura en un stock de mineral o inhalación de polvo de hierro en la realización del levantamiento topográfico.

Sobre el uso de SFM, Custodio (2022) investigó su uso con aeronaves pilotadas a distancia (RPA) para la ubicación de pozos construidos en la desembocadura de un rio, dándole un uso para la realización de levantamientos topográficos en obras civiles con dron a zonas de accesibilidad riesgosa. Utilizo

una configuración de vuelo a 90m de altura, obteniendo una precisión de entre 3.675 a 1.129m; a la vez utilizo el software Agisoft Metashape para la construcción de modelos tridimensionales de alta precisión; lo cual le permitió un levantamiento topográfico detallado para la ubicación de 8 pozos de agua subterránea en la desembocadura del río Pisco – Perú, siendo este un resultado óptimo para su intención de estudio.

Matías (2020) menciona en su trabajo de investigación sobre la aplicación de drones para mejorar procesos productivos en minería a cielo abierto, cuyo objetivo fue el de buscar reducir los costos productivos mediante la implementación de uso de un dron ron, debido a los altos costos en los procesos de mantenimiento, inspección y a la deficiente calidad de información. Teniendo como resultado, que se lograron tener archivos digitales eficientes y contando con un menor tiempo de ejecución, costos y sin pérdidas, llegando a optimizar los procesos productivos; haciendo énfasis en la minimización de interrupción de las labores en operación y debido a su rapidez de ejecución, permite tomar mejores decisiones en mantenimientos preventivos.

Como señala Paucar (2019) sobre su investigación de la aplicación de fotogrametría digital en objeto cercano, la cual aplicó en infraestructuras, para aportar una optimización en las operaciones mineras; señala que al ser una disciplina que ocupa la tecnología para la obtención de imágenes digitales aéreas o terrestres para la construcción y representación espacial de entidades, estos son mayormente usados en minería superficial y en su caso lo demuestra con la utilización para la remediación y estabilidad de taludes entre bancos para comprender los deslizamientos y fallas de rocas para de esta manera poder prevenirlos, drenaje de mina, o diseño de presa de relave; considerando datos calculables como el volumen del material suelto conociendo la superficie del terreno. Pudiendo aplicar eficientemente el diseño y ejecución de operaciones para camiones mineros de gran tonelaje, afirmando que aplicando una fotogrametría con dron a 80m de altura se puede obtener una precisión de 2cm en los ejes x e y, teniendo la variante del eje z con 6cm.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

El presente proyecto de investigación parte de la intención de resolver la problemática existente en la pequeña minería en el Perú, en la cual contar con los recursos necesarios para poder hacer un estudio geomecánico implica de una inversión de tiempo y dinero para las compañías y empresas mineras con respecto a los trabajos a ser realizados por los ingenieros especialistas en geomecánica minera.

Según el MINEM (2020) en el Perú se tiene 394 concesiones mineras en explotación registradas, en las cuales incluyen en su gran mayoría compañías que pertenecen al régimen de gran y mediana minería, en las que si se tiene la capacidad de realizar estudios geomecánicos de los frentes de avance con métodos y técnicas modernas.

En la unidad minera Pomasi, que es un proyecto que corresponde al régimen de pequeña minería y cuyos métodos de explotación son convencional y semi mecanizado, se tiene un promedio de avance de 1.5 m/disparo/guardia, realizándose 2 guardias al día (avance diario de 3 m). Al ser un proyecto en expansión, se tienen 3 galerías principales, con rampas de acceso y proyectos de profundización, para lo cual el área de geomecánica no se da abasto para la realización de los mapeos correspondientes de manera continua, así como el monitoreo de los mapeos para poder controlar la estabilidad de las excavaciones y por ende se realiza el mapeo de zonas críticas solo cuando la inestabilidad de las labores ya es muy contemplable. Teniendo como consecuencia la paralización de labores de riesgo hasta que no se tenga un buen estudio geomecánico de la zona con adecuado análisis de estabilidad que garantice la estabilidad de las mismas, acorde a lo indicado en el D.S. N°024-2016-EM (2016), y su modificatoria D.S. N°023-2017-EM (2017), donde se expresa explícitamente en el Art. 220 que “ *Los trabajos de rehabilitación de labores y reinicio de aquéllas que hayan estado paralizadas por un tiempo mayor al de su auto sostenimiento, considerados como trabajos de alto riesgo, deben contar con un estudio previo de geomecánica y deben ser realizados por trabajador calificado*” y se haya recomendado el método de sostenimiento más adecuado para cada situación.

La realización de un mapeo geomecánico detallado conlleva un tiempo corto pero considerable en la labor, si se quieren tener datos más precisos es requerido un mapeo minucioso. Motivo por el cual se propone implementar un nuevo método de mapeo geomecánico considerando el sistema Structure From Motion (SFM); el cual mediante técnicas fotogramétricas podría ser utilizado en minería subterránea en determinadas circunstancias como en el caso de la U.M. Pomasi.

Este sistema, que ya viene siendo utilizado en minería superficial. Su uso en minería subterránea puede ser aplicado para el modelamiento tridimensional de estructuras subterráneas partiendo desde fotografías en 2D, pudiendo llegarse a modelar completamente galerías, subniveles, rampas partiendo desde puntos de referencia o coordenadas iniciales, las cuales pueden ser procesadas en gabinete, acelerando el proceso del mapeo en los frentes y no interfiriendo significativamente el avance de las labores, llevando un control más minucioso de las estructuras geomecánicas.

2.2 Enunciados del problema

2.2.1 Pregunta general

- ¿Cuál es el efecto de la implementación de structure from motion en minería subterránea para mejorar el proceso de mapeos geomecánicos en la U.M. Pomasi - CIEMSA?

2.2.2 Preguntas específicas

- ¿Cuál es la influencia de la fotogrametría en la exactitud y celeridad en el proceso de mapeo geomecánico subterráneo en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA?
- ¿De qué manera se utiliza el sistema structure from motion para mejorar la caracterización geomecánica en 3D para realizar un mejor análisis de estabilidad en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA?

2.3 Justificación

En el Perú, los estratos de las empresas y compañías mineras que no son registradas en su totalidad en el MINEM corresponden a mediana o pequeña minería y minería artesanal. En las cuales se utilizan métodos de explotación convencionales y semimecanizados, mismos en los que muchas veces no se tiene la presencia de un

ingeniero especialista en geomecánica responsable de llevar a cabo el estudio geomecánico y análisis de estabilidad de las labores de explotación del yacimiento en cuestión, así de cómo llevar el control de sostenimiento y sus elementos de manera continua. A causa de esto, el tipo de accidente con mayor ocurrencia en la minería peruana es el de desprendimiento o caída de rocas, esto desde los años 2000 (Apaza, 2023).

En las empresas y compañías mineras correspondientes a estratos de pequeña o mediana minería, los estudios geomecánicos deberían ser más detallados y estos mismos deben ser actualizados mensualmente o en un plazo menor si el caso lo amerita. Asimismo, el D.S. N° 023-2017-EM (2017) argumenta que *“en cada labor se debe publicar las tablas y planos geomecánicos que indiquen la calidad de roca, recomendaciones de sostenimiento y dimensionamiento, así como el estándar de las labores”*. Sin embargo, tener actualizados estos elementos no es posible al tener frentes de avance en demasía, así como proyectos de exploración.

En tal sentido, se propone modificar el método de realización de mapeo geomecánico en la unidad de estudio de esta investigación, el cual es realizado en la actualidad de manera tradición con brújula brunton y toma un promedio de 25 minutos su realización a detalle, lo cual afecta al normal desarrollo de las actividades interior mina como desate, acarreo y transporte debido a la presencia del personal de geología y geomecánica. Se propone implementar el sistema fotogramétrico SFM para la realización de los mapeos geomecánicos, en el cual se pueden tener mejores resultados mediante la identificación de planos de discontinuidad en macizos rocoso y la creación de nubes de puntos a partir de coordenadas referenciales en minería subterránea, pero con un mínimo tiempo de ejecución y procesamiento de datos en gabinete, mediante el modelamiento 3D partiendo de fotogrametría 2D.

Se esperó que la implementación de este nuevo método de mapeo geomecánico tenga muy poco costo de inversión, ya que esta metodología no requiere de aparatos sofisticados adecuados para la identificación y modelamiento de planos en interior mina, pudiendo ser implementado inclusive en minería artesanal de ser necesario, teniendo en cuenta que es una implementación en la parte de toma de datos en campo para no perjudicar el avance normal del trabajo en una mina.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

- Mejorar el proceso de mapeos geomecánicos en minería subterránea implementando structure from motion en la U.M. Pomasi - CIEMSA.

2.4.2 Objetivos específicos

- Demostrar que la fotogrametría brinda mayor exactitud y celeridad en el proceso de mapeo geomecánico subterráneo en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA.
- Demostrar cómo se utiliza el sistema structure from motion para mejorar la caracterización geomecánica en 3D para realizar un mejor análisis de estabilidad en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

- La implementación de structure from motion en minería subterránea mejora el proceso de mapeos geomecánicos en la U.M. Pomasi - CIEMSA.

2.5.2 Hipótesis específicas

- Las técnicas fotogramétricas brindan mayor exactitud y celeridad en el proceso de mapeo geomecánico subterráneo en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA.
- La utilización del sistema structure from motion permite mejorar la caracterización geomecánica en 3D para realizar un mejor análisis de estabilidad en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA.

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

El desarrollo de la investigación abarca la Unidad Minera Pomasi – CIEMSA, que se encuentra ubicada en los parajes del distrito de Palca, provincia de Lampa, departamento de Puno, en las coordenadas UTM WGS84, N: 8302238 y E: 319241 a 4880m.s.n.m.

Figura 37

Ubicación de la U.M.



Nota. I.G.N. (2023).

3.2 Población

Para la población, se tomó a la galería de acceso principal en el nivel 4970 – veta Jesús María de la U.M. Pomasi, cuyo monitoreo de labores con mapeos geomecánicos no se encuentra actualizado, con el fin de realizar una comparación del mapeo geomecánico realizado de manera tradicional manualmente con la técnica fotogramétrica SFM. Para encontrar una correlación entre ambos métodos de caracterización geomecánica del macizo rocoso y definir el óptimo para las condiciones y requerimientos de la unidad minera.

3.3 Muestra

La selección de la muestra fue no probabilística – intencional, en puntos representativos donde la formación geológica cambia o incrementan las discontinuidades

a lo largo de la galería principal del nivel 4970 de la veta Jesús María, donde se realizaron estaciones geomecánicas detalladas.

3.4 Método de investigación

3.4.1 Enfoque de la investigación

Se optó por el enfoque cuantitativo, el cual es utilizado para la recolección de datos para probar hipótesis basados en la medición numérica y el análisis estadístico con la finalidad de probar teorías, al ser este un enfoque secuencial y probatorio (Sampieri, 2014).

3.4.2 Nivel de investigación

En el presente caso de investigación, se inició la investigación como exploratoria, la cual sirvió para la preparación de la misma y antecede a investigaciones con alcance correlacional; siendo esta la conversión de la investigación finalmente como investigación exploratoria – correlacional (Sampieri, 2014).

3.4.3 Diseño de la investigación

En cuanto a la concepción del diseño de investigación, se puede mencionar que el estudio representa un punto donde se conectan etapas conceptuales del proceso de investigación como el planteamiento, desarrollo teórico y hipótesis con sus respectivas fases.

“En el enfoque cuantitativo, el investigador debe utilizar sus diseños para analizar la certeza de las hipótesis que formuló en un contexto en particular o para aportar evidencias respecto a los lineamientos de la investigación” (Sampieri, 2014); conociendo este enunciado podemos mencionar que el diseño de la presente investigación es de tipo no experimental correspondiente a la categoría transeccional o transversal definiéndose específicamente como descriptivo.

3.4.4 Método de la investigación

El método que más se adecua a esta investigación es el hipotético – deductivo; ya que acorde a esta metodología de investigación se puede estructurar

razonamientos mediante los que se infieren o realizan juicios generales partiendo de una o varias premisas consideradas como afirmaciones verdaderas, con el fin de exponer conceptos y definiciones para la obtención de conclusiones y consecuencias en circunstancias determinadas. Los pasos que indica Pimienta y De La Orden (2017) en esta metodología, los cuales se cumplen en el desarrollo de esta investigación son:

Observación y formulación de la hipótesis, que corresponden a elementos conocidos por el investigador y requieren un análisis más profundo en consideración del investigador propiamente dicho.

Deducción, que consiste en la realización de deducciones tanto positivas como negativas a partir de los principios generales establecidos por el investigador a fin de refutar o apoyar teorías de otros autores o hechos observacionales en casos de estudio.

Experimentación, consistiendo en comprobar el fenómeno o hipótesis principal propuesto en una investigación, y en la cual considerando las probabilidades de leyes y ecuaciones establecidas por el investigador tienen la posibilidad de que resulten verdaderas.

3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

La variable generalizada a abordar en el objetivo específico es la del mejoramiento en el proceso de realización de mapeos geomecánicos; con la intención de demostrar que la fotogrametría puede mejorar en exactitud y celeridad los mapeos geomecánicos en minería subterránea.

O.E. 1. Demostrar que la fotogrametría brinda mayor exactitud y celeridad en el proceso de mapeo geomecánico subterráneo.

Captura de imágenes: Se utilizó una cámara fotográfica digital para capturar imágenes del macizo rocoso subterráneo desde múltiples ángulos y posiciones como fue detallado en el capítulo del marco teórico, cubriendo toda el área de interés de las estaciones geomecánicas.

Procesamiento de imágenes: Se emplearon software especializados en fotogrametría para procesar las imágenes capturadas y generar modelos tridimensionales

del macizo rocoso. Este proceso incluye la reconstrucción de la superficie del terreno a partir de las imágenes y la generación de nubes de puntos tridimensionales.

Comparación con métodos convencionales: Se realiza una comparación entre los datos obtenidos mediante fotogrametría y los obtenidos mediante métodos convencionales de mapeo geomecánico subterráneo. Se analiza la precisión y velocidad de cada método para determinar si la fotogrametría ofrece una mejora significativa.

Validación de la exactitud: Se lleva a cabo una validación de la exactitud de los modelos generados mediante fotogrametría mediante la comparación con datos de referencia, como mediciones directas de discontinuidades geológicas o mediciones de deformaciones en la mina.

Mediante la utilización de este método de investigación acorde al primer objetivo específico, se puede demostrar de manera efectiva si la fotogrametría ofrece una mayor exactitud y celeridad en el proceso de mapeo geomecánico subterráneo en comparación con los métodos convencionales.

O.E. 2. Demostrar que la utilización de un sistema structure from motion puede mejorar la caracterización geomecánica en 3D para realizar un mejor análisis de estabilidad en las labores subterráneas.

Adquisición de datos con structure from motion: Se utiliza un sistema SFM para capturar imágenes del macizo rocoso subterráneo desde múltiples ángulos y posiciones, permitiendo reconstruir la geometría en tres dimensiones.

Generación de modelos 3D: Se emplean algoritmos de reconstrucción 3D a partir de las imágenes capturadas con el sistema SFM para generar modelos tridimensionales de alta resolución del macizo rocoso subterráneo.

Caracterización geomecánica: Se realiza una caracterización geomecánica detallada de los modelos 3D generados, incluyendo la identificación de discontinuidades geológicas, estimación de propiedades del macizo rocoso y evaluación de la estabilidad de las labores subterráneas.

Comparación con métodos convencionales: Se compararán los resultados obtenidos con el sistema SFM con aquellos obtenidos mediante métodos convencionales

de caracterización geomecánica, como el mapeo manual para evaluar la mejora en la calidad y precisión de la información geomecánica obtenida.

Con estos métodos de investigación para este objetivo específico, se demuestra de manera efectiva si la utilización de un sistema SFM puede mejorar la caracterización geomecánica en 3D y facilitar un mejor análisis de estabilidad en las labores subterráneas.

3.5.1 Técnicas de recolección de datos

A. Recolección de datos por objetivos específicos

O.E.1.- Se realizó la toma de datos en diferentes puntos de muestreo, con la técnica de realizar estaciones geomecánicas; realizando ambos métodos de mapeo (fotogramétrico y manual); midiendo el tiempo de ejecución de cada método y también los resultados que se obtengan al procesar los datos en los softwares de modelamiento.

O.E.2.- Realizar una comparativa de los resultados en software geomecánico al realizar los cálculos de análisis de estabilidad de cada estación geomecánica con ambos métodos de mapeo y su respectivo modelamiento en gabinete; con la finalidad de comparar los resultados de cada análisis.

3.5.2 Técnicas de análisis de datos

A. Técnica

Estadística y análisis comparativo; mediante el registro de datos en campo (imágenes fotográficas) y gabinete de datos con y sin SFM para la realización de un adecuado análisis de estabilidad con software geomecánico.

B. Instrumento

El instrumento primario para la toma de imágenes es una cámara fotográfica portátil y para la realización de la técnica mencionada el instrumento secundario es un equipo para el procesamiento de los datos obtenidos (computador equipado con software adecuado).

3.5.3 Materiales

Los materiales para la realización de los mapeos geomecánicos en este estudio para su respectiva comparación se muestran en el Anexo 2 y también son mencionados a continuación:

- Brújula; para la realización de las lecturas de orientación e inclinación de las discontinuidades de manera manual.
- Esclerómetro; para la estimación de RCU in situ en los puntos de muestreo.
- Perfilómetro; para la comparación de la rugosidad del macizo con tabla.
- Cámara fotográfica; para la toma de imágenes de las estaciones geomecánicas (Canon EOS Rebel SL3).
- Lámparas mineras; para apoyar con la iluminación de los puntos de muestreo.
- Plancha con puntos de control; hoja plastificada con puntos de control para realizar la corrección fotogramétrica.
- Laptop; para el procesamiento de imágenes y datos de alta definición y su posterior modelamiento tridimensional.
- Softwares; exclusivos para el procesamiento de imágenes y su interpretación fotogramétrica.
- Formatos y cartillas de mapeo geomecánicos; considerando los principales parámetros de mapeo brindados por autores como Bieniawski, Hoek y Brown.

3.5.4 Definición de las variables de la investigación

A. Variable independiente

Implementación de fotogrametría Structure From Motion.

A.1 Dimensiones

- Parámetros de la toma de datos en campo.
- Modelamiento tridimensional.

A.2 Indicadores

- Tiempo de ejecución de la toma de datos.

- Tiempo de ejecución del procesamiento del modelado 3D.

B. Variable dependiente

Mejoramiento del proceso de mapeos geomecánicos en exactitud y celeridad en minería subterránea con fotogrametría.

B.1 Dimensiones

- Exactitud y celeridad en la realización de mapeos geomecánicos.
- Análisis comparativo de la realización de mapeo sin y con el método SFM.
- Realización de un análisis de estabilidad con los datos de cada mapeo geomecánico manual y con fotogrametría.

B.2 Indicadores

- Similitud al terreno en 3D.
- Estadística comparativa.
- Análisis de estabilidad.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

Los mapeos geomecánico fueron realizados de manera tradicional primeramente con ábacos y cartillas de mapeo, las cuales sirvieron para tener un punto de inicio con respecto al proceso de comparación de estereogramas con los promedios de discontinuidades y sus respectivas familias representativas (se presentarán a continuación las cartillas de mapeo realizadas en cada E.G.).

Por otro lado, se realizó también un mapeo con la técnica SFM, donde se realizó de igual manera un análisis estereográfico para la identificación de los tipos de fallas y su respectivo ajuste respecto al volumen, dimensión y F.S. de la presencia de estas mismas. Para esto fue realizada la toma de fotografías con puntos de control en cada E.G. (las cuales son presentadas a continuación en cada E.G.). Donde aparte de realizar un modelamiento tridimensional de cada E.G. para un posterior control más detallado en la unidad, se realizó principalmente la determinación de la medición del Dip/DipDir para el análisis estereográfico con el fin de calcular la estabilidad de la galería en investigación mediante el F.S. se pudo apreciar las familias de discontinuidades predominantes con los planos de discontinuidades ajustados con el software Cloud Compare, analizando ambos estereogramas con ambas metodologías (los mismos que también son presentado a continuación).

Considerando el desarrollo de la técnica SFM, los parámetros como espaciamiento, persistencia, apertura, rugosidad y filtraciones de agua no fueron consideradas a medir a partir del modelo tridimensional debido a que no afectan directa o indirectamente en el análisis estereográfico y el F.S. de cada E.G., estos datos fueron considerados como referencia de la clasificación geomecánica a la que corresponde cada estación y fueron medidos solo en el mapeo manual.

4.1.1 Mapeo de la estación geomecánica N°01

La estación 01 fue escogida acorde a la mayor presencia de discontinuidades, y está ubicada en la Bm a 2m del acceso principal del nivel 4970 con dirección de la galería 228°SE (se tomó el dato de la orientación de la galería como indica el Anexo 5), la toma de datos se realizó considerando una declinación

magnética de 5°. El proceso de la manipulación y procesamiento de imágenes para la realización de este modelamiento 3D se puede visualizar en el Anexo 9.

Las siguientes imágenes muestran las perspectivas de la estación geomecánica escogida para realizar el análisis cinemático para su posterior procesamiento, tomándose en total 47 imágenes para una adecuada caracterización, los parámetros de configuración de las imágenes de esta esta E.G. se muestran en el Anexo 10 y el direccionamiento de los puntos de control fue como indica el Anexo 6 y Anexo 7.

Figura 38

Referencia fotográfica de la estación 01



Figura 39

Vista lateral derecha de la estación 01



Luego de la adecuada recolección de imágenes en el software indicado anteriormente, se procedió a realizar la creación de una densidad de puntos acorde

a las necesidades requeridas; siendo estas de manera intermedia con un total de 2 477 692 puntos identificados en esta E.G., a causa de la buena iluminación de la estación, teniéndose como resultado el siguiente DenseCloud.

Figura 40

Fotografías tomadas de la estación 01



Figura 41

Procesamiento de las 51 imágenes de la estación 01

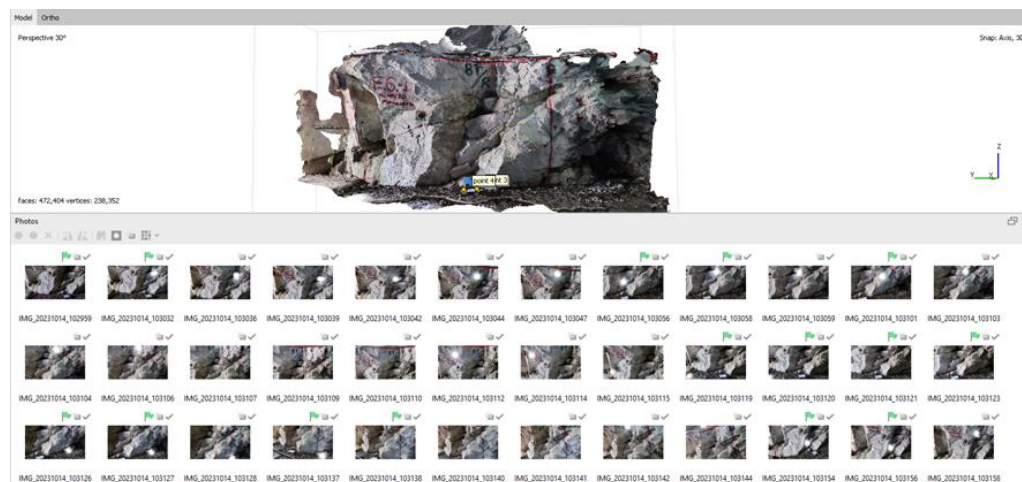


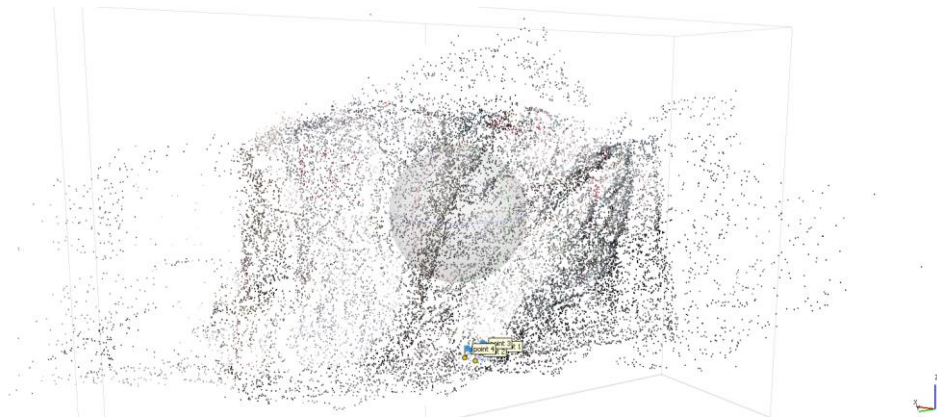
Figura 42

Densidad de puntos de la estación 01



Figura 43

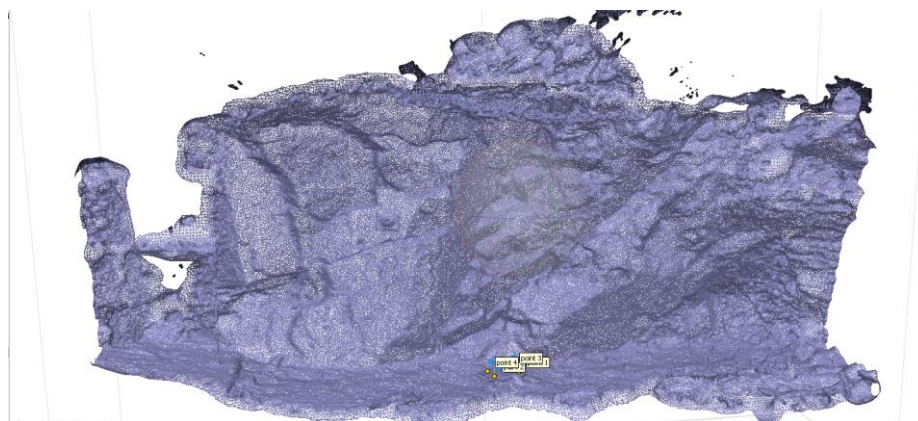
Vista iso a 30° de densidad de puntos de la estación 01



Posteriormente, para la creación de las texturas necesarias se realizó el siguiente enmallado considerando la densidad de puntos realizada anteriormente, la cual brinda una perspectiva del solido que se realizó.

Figura 44

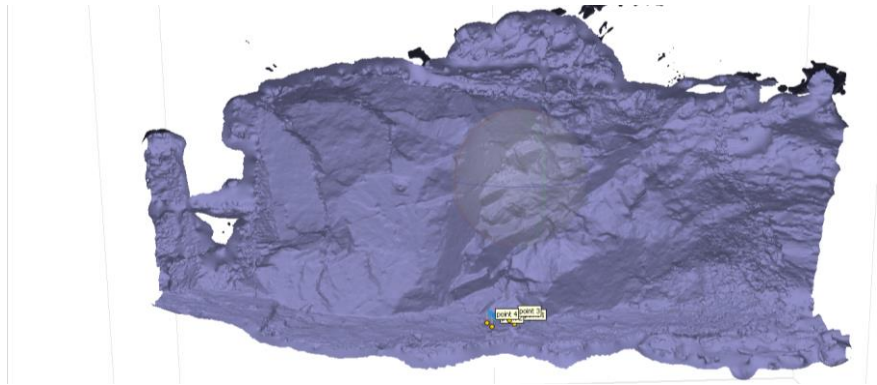
Modelo de estructuras de la estación 01



Para la realización del modelo del sólido, se realizaron los ajustes necesarios para que el resultado sea el más óptimo considerando las perspectivas del terreno a estudio, teniendo como resultado la siguiente imagen.

Figura 45

Modelo del sólido de la estación 01



Como último ajuste para que el modelo tridimensional sea lo más exacto posible, se realizaron ajustes en los mapas de profundidad de cada imagen con el fin del mejorar la perspectiva de cada fotografía adquirida, como se aprecia en las siguientes imágenes.

Figura 46

Modelo de mapa de profundidad de la estación 01

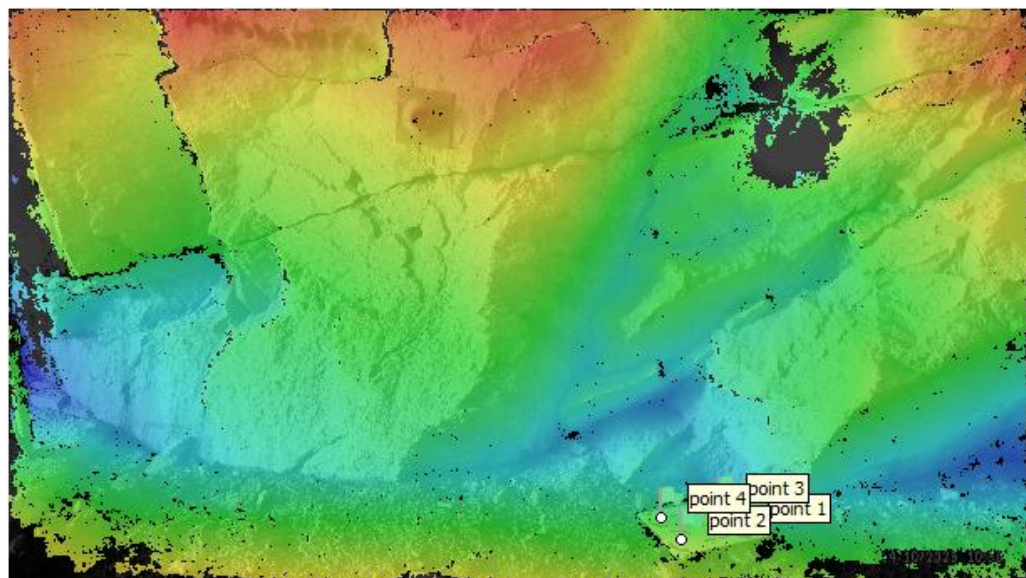
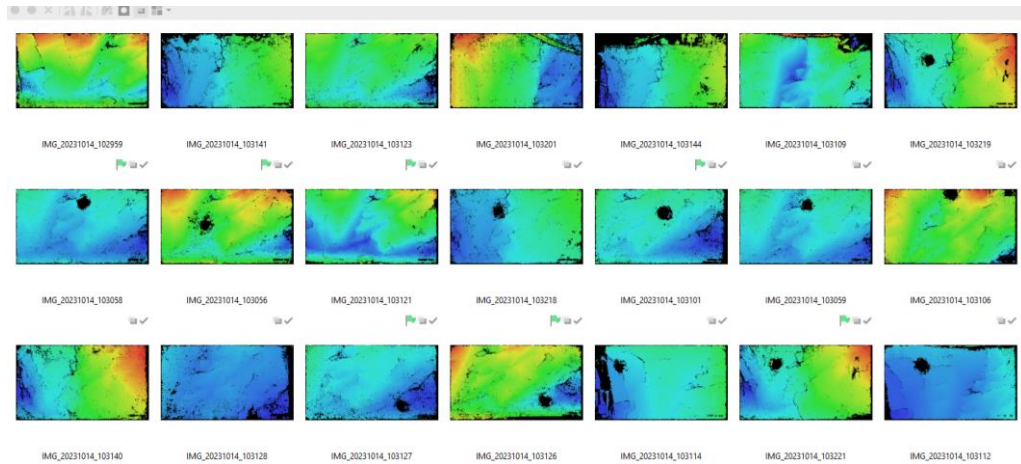


Figura 47

Modelos de mapas de profundidad de las imágenes de la estación 01



Finalmente, el resultado obtenido es el de las siguientes imágenes, siendo este el modelo a escala de la estación geomecánica a estudio, pudiendo ser manipulable a conveniencia del análisis a realizar.

Figura 48

Modelo de texturas de la estación 01



Figura 49

Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 01

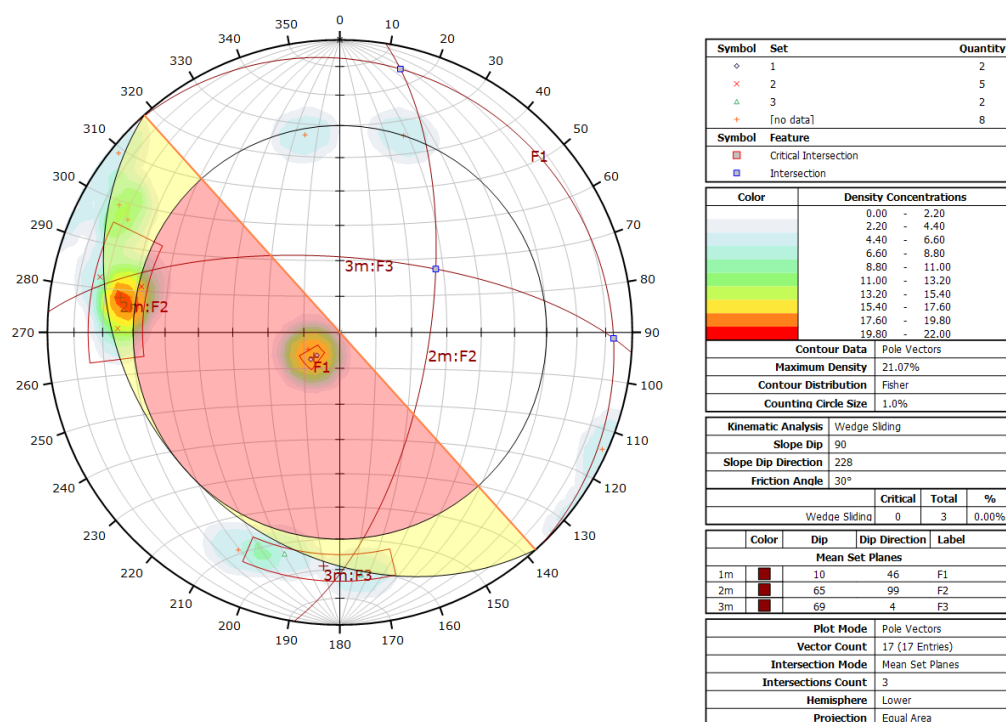


4.1.2 Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°01

Se tiene como resultado de este mapeo de manera convencional el siguiente estereograma, donde no se aprecia la presencia de cuñas en la zona de estudio, con una densidad máxima en el plano equiareal de 21.07, un total de 17 puntos. Sin embargo, las discontinuidades forman una cuña en el lado opuesto de la zona crítica lo cual indica que en la proyección de las discontinuidades principales si se pudiera suscitar la presencia de una cuña.

Figura 51

Interpretación estereográfica estación 01



Por otro lado, al realizar el mismo proceso de identificación de familias de discontinuidades con el método fotogramétrico, se obtiene la siguiente data (Dip/DipDir) en el modelamiento realizado, el cual fue procesado en el software Cloud Compare y fue adecuadamente georreferenciado.

Se pudo haber realizado también la medición de la separación entre discontinuidades y la longitud de las mismas, sin embargo estas mediciones fueron realizadas en campo mismo a fin de calcular el RMR insitu, esta metodología propuesta (SFM) es principalmente para la determinación de la estabilidad de la galería en investigación, para lo cual fue necesaria solamente la

medición del buzamiento y la dirección de buzamiento de las discontinuidades a fin de encontrar una similitud o discrepancia en la presencia de fallas tipo cuña en cada estación seleccionada.

A continuación, se muestra la determinación de Dip y DipDir de las discontinuidades principales de la estación 01 con su respectivo análisis cinemático.

Figura 52

Determinación de orientación de discontinuidades con software



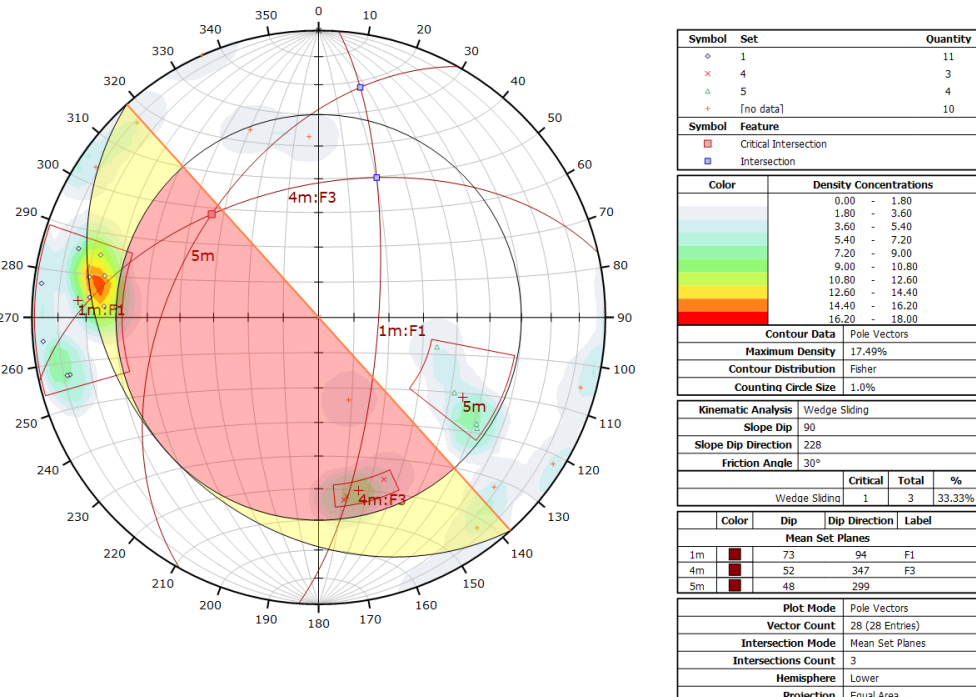
Figura 53

Determinación de orientación de discontinuidades - vista iso der.



Figura 54

Interpretación estereográfica con SFM estación 01



De la misma manera se obtuvo el siguiente estereograma con la técnica SFM, donde se puede apreciar la presencia de una cuña en la zona crítica, motivo por el cual en la zona de la E.G., fue necesaria la utilización de un método de sostenimiento puntual, se nota también que la densidad máxima es menor que la de la otra metodología, siendo esta 17.49 lo cual indica una menor presencia de puntos en la densidad de polos presentes, con un procesamiento total de 28 puntos.

4.1.3 Mapeo de la estación geomecánica N°02

La estación 02 fue seleccionada acorde a la formación geológica, encontrándose aproximadamente a 50m de la estación 01, con dimensión de 1.7x3.5m, teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Las siguientes imágenes muestran las perspectivas de la estación geomecánica 02 para realizar el análisis cinemático para su posterior procesamiento, tomándose en total 50 imágenes para una adecuada caracterización.

Figura 55

Referencia fotográfica de la estación 02

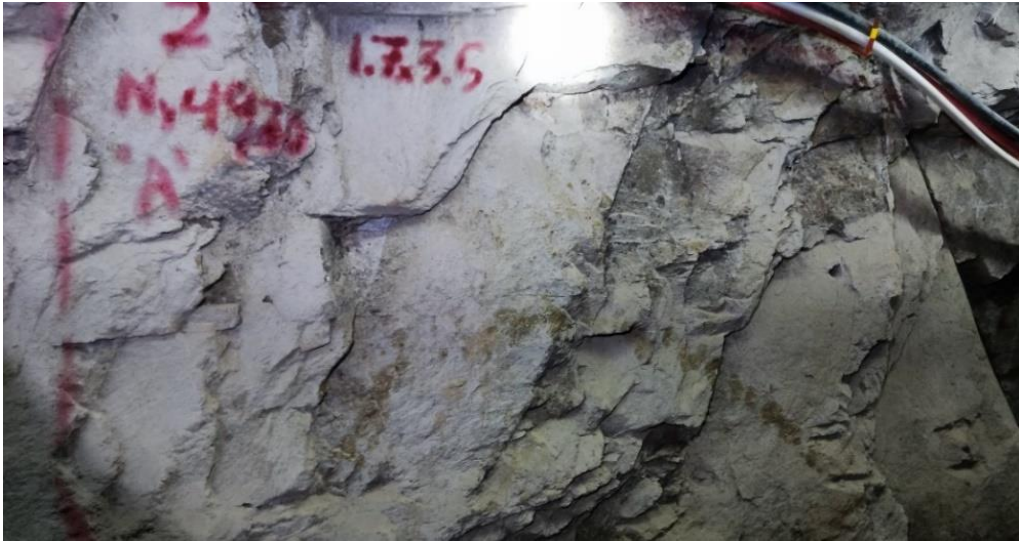


Figura 56

Vista lateral derecha de la estación 02



Luego de la recolección y procesamiento de imágenes en el software, se procedió a realizar la creación de una densidad de puntos acorde a las necesidades requeridas; siendo estas de manera intermedia con un total de 1 603 854 puntos identificados en esta E.G. 02, a causa de la buena iluminación de la estación, teniéndose como resultado el siguiente DenseCloud.

Figura 57

Fotografías tomadas de la estación 02



Figura 58

Procesamiento de las 50 imágenes de la estación 02

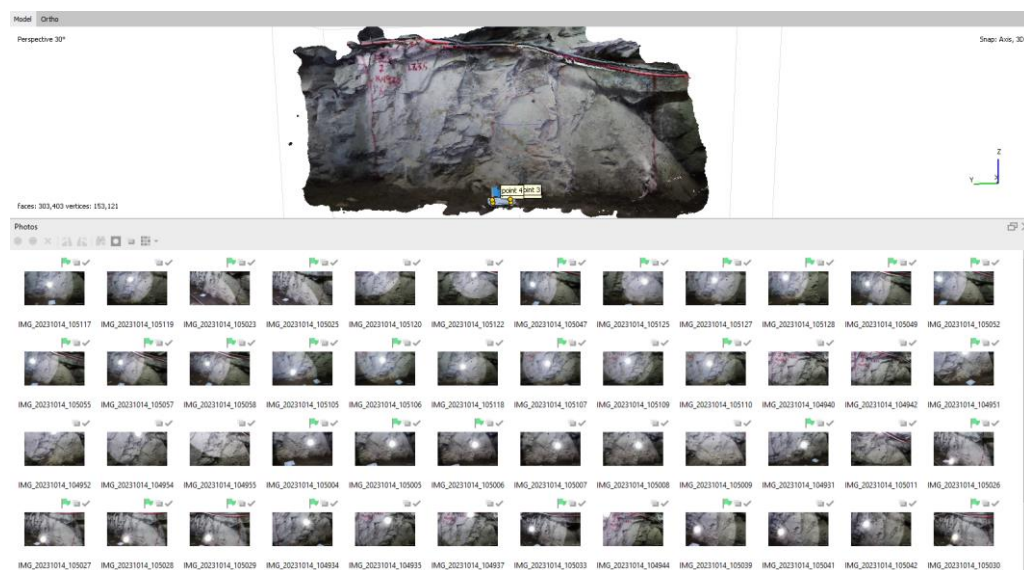


Figura 59

Densidad de puntos de la estación 02

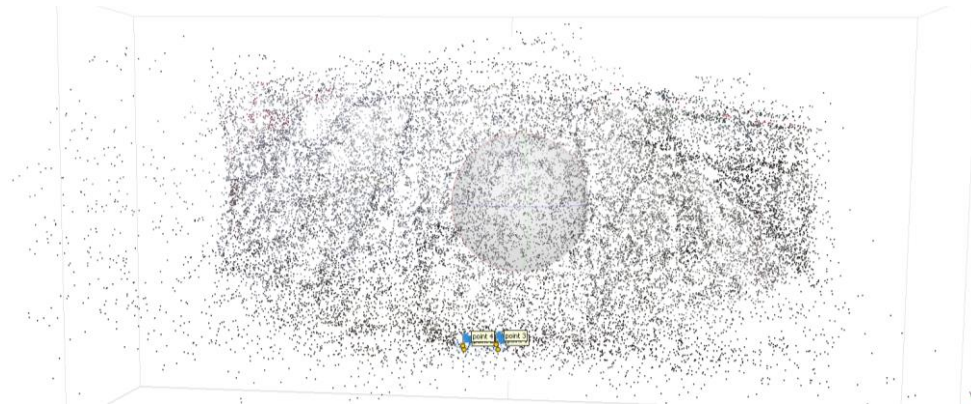
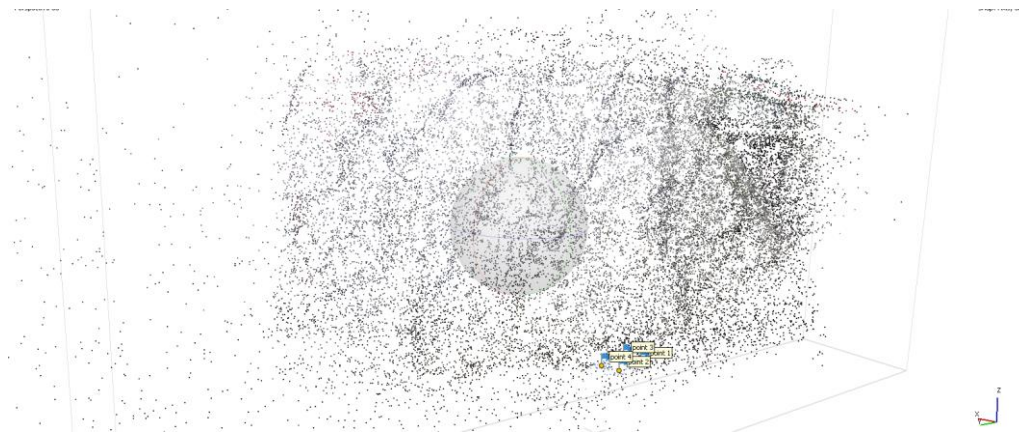


Figura 60

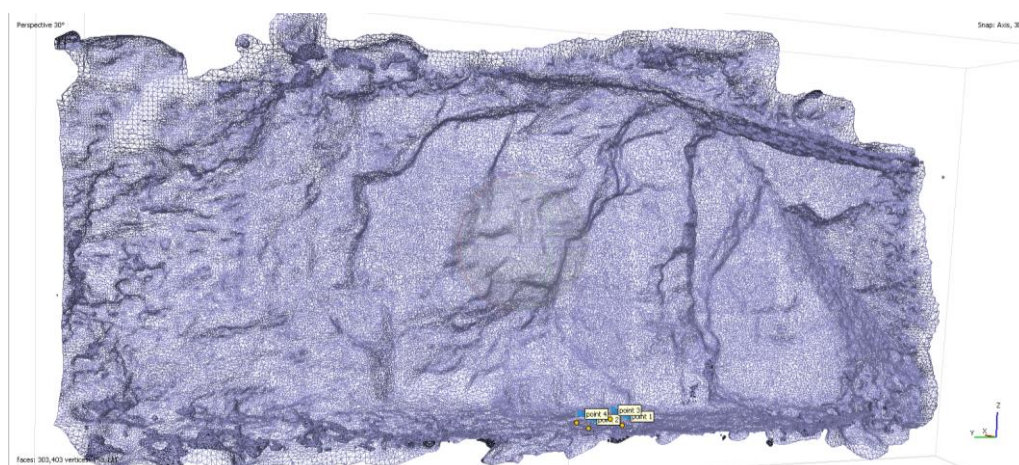
Vista iso a 30° de densidad de puntos de la estación 02



Luego, para la creación de las texturas necesarias se realizó el siguiente enmallado considerando la densidad de puntos realizada anteriormente, la cual brinda una perspectiva del solido que se realizó.

Figura 61

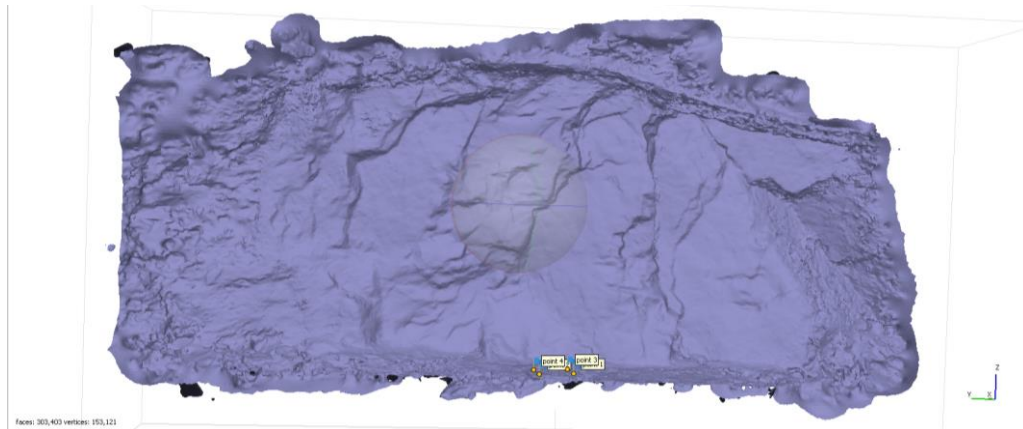
Modelo de estructuras de la estación 02



Para la realización del modelo del sólido, se realizaron los ajustes automatizados para que el resultado sea el más óptimo considerando las perspectivas del terreno a estudio, teniendo como resultado la siguiente imagen.

Figura 62

Modelo del sólido de la estación 02



Como último ajuste para que el modelo tridimensional sea lo más exacto posible, se realizaron ajustes en los mapas de profundidad de cada imagen con el fin del mejorar la perspectiva de cada fotografía adquirida, como se aprecia en las siguientes imágenes.

Figura 63

Modelo de mapa de profundidad de la estación 02

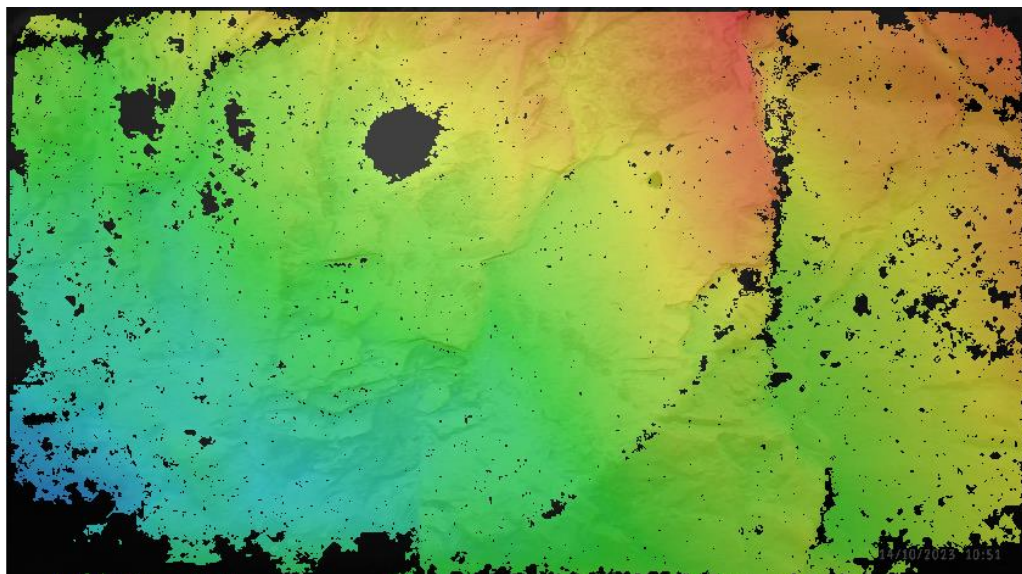
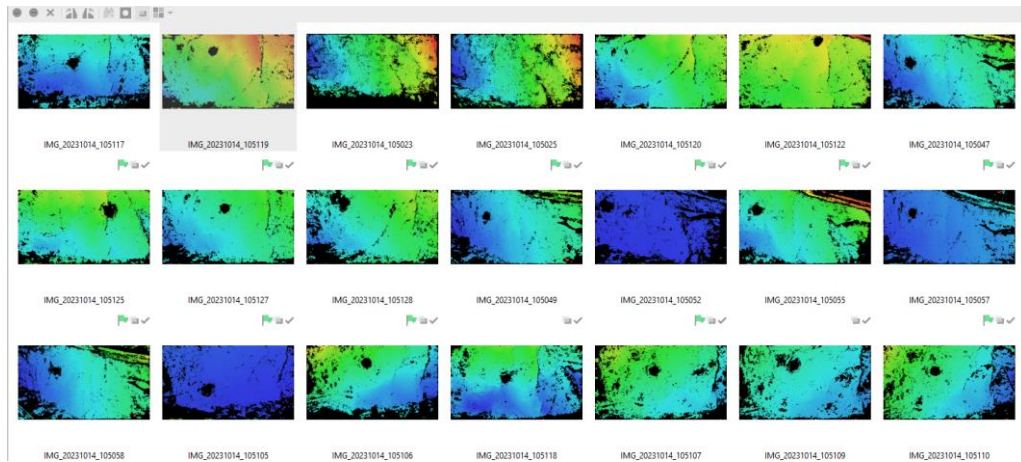


Figura 64

Modelos de mapas de profundidad de las imágenes de la estación 02



Finalmente, el resultado obtenido es el de las siguientes imágenes, siendo este el modelo a escala de la estación geomecánica 02, pudiendo ser manipulable a conveniencia del análisis a realizar.

Figura 65

Modelo de texturas de la estación 02



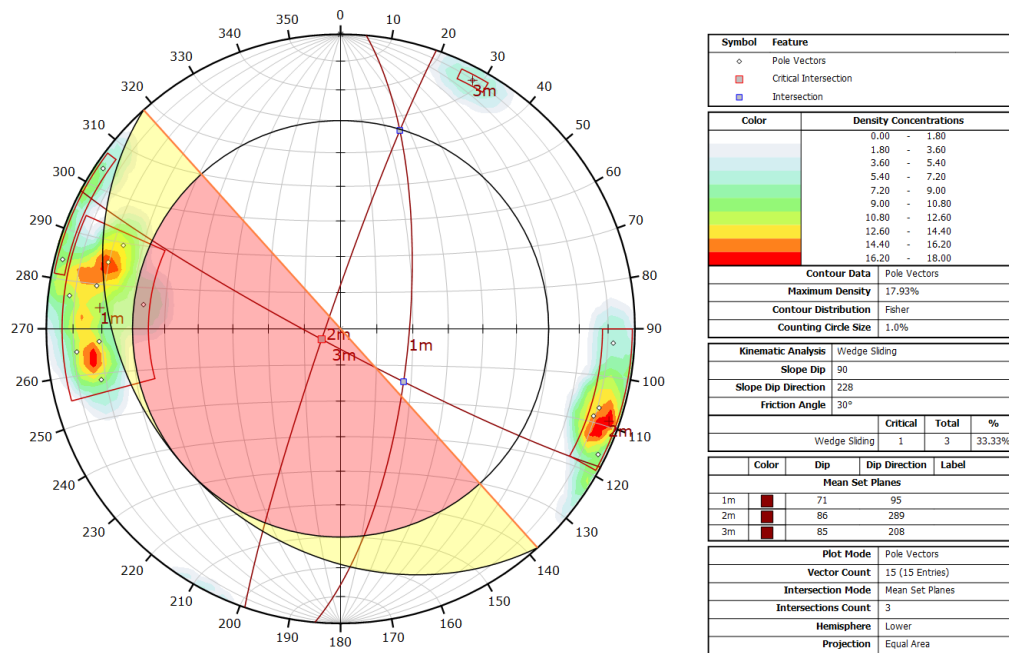
Figura 66

Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 02



Figura 68

Interpretación estereográfica estación 02



Por otro lado, al realizar el mismo proceso de identificación de familias de discontinuidades con el método fotogramétrico, se obtiene la siguiente data (Dip/DipDir) en el modelamiento realizado, el cual fue procesado en el software Cloud Compare y fue adecuadamente georreferenciado.

A continuación, se muestra la determinación de Dip y DipDir de las discontinuidades principales de la estación 02 con su respectivo análisis cinemático.

Figura 69

Determinación de orientación de discontinuidades con software

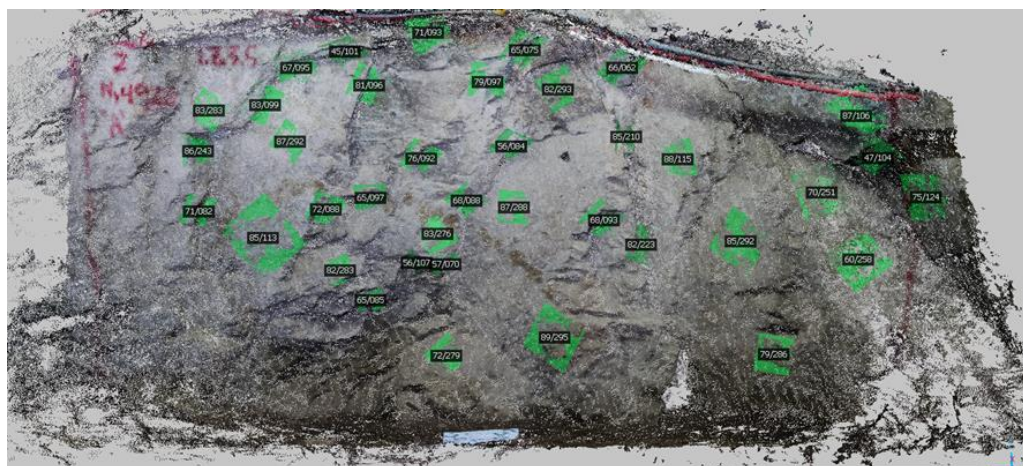


Figura 70

Determinación de orientación de discontinuidades - vista iso izq.

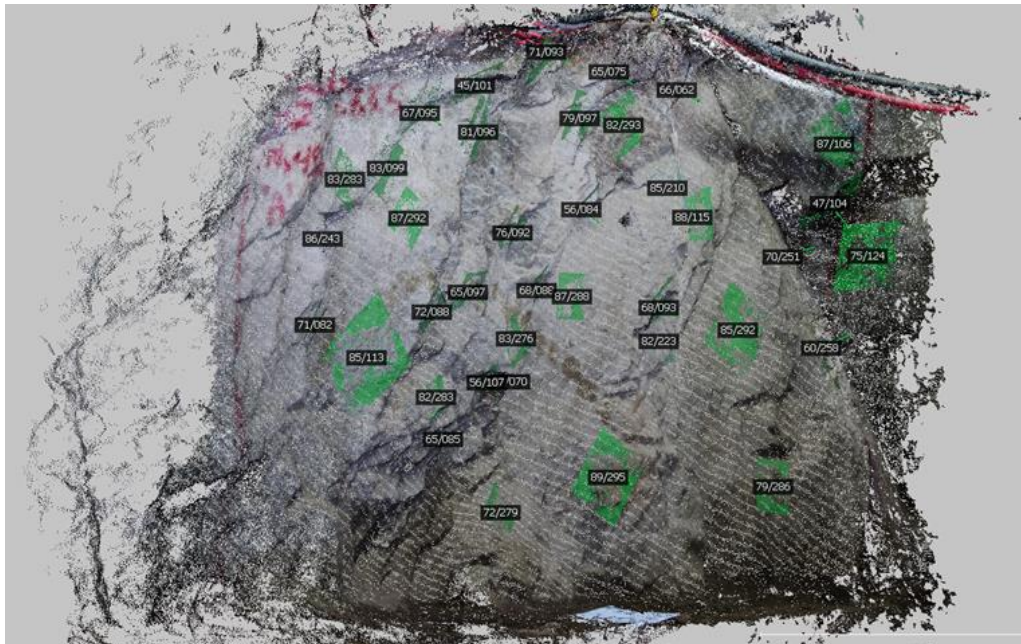
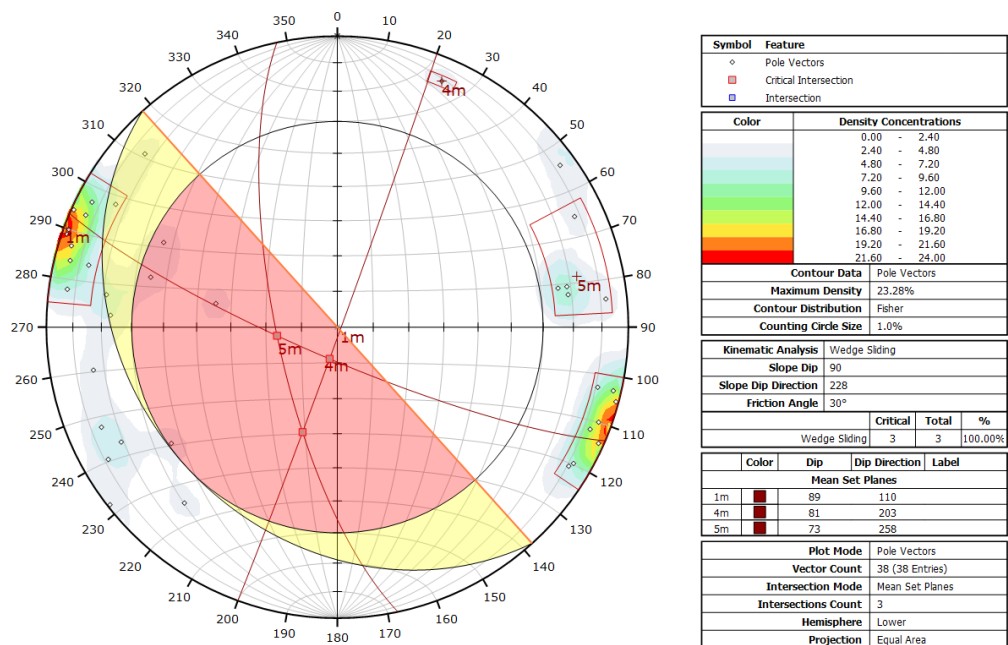


Figura 71

Interpretación estereográfica con SFM estación 02



De la misma manera se obtuvo con la técnica SFM una densidad máxima de 23.28 lo cual indica una mayor presencia de puntos en la densidad de polos presentes, con un procesamiento total de 38 puntos.

4.1.5 Mapeo de la estación geomecánica N°03

La estación 03 a continuación fue seleccionada de la misma manera que las anteriores, predominando la geología, teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Las siguientes imágenes muestran las perspectivas de la estación geomecánica 03 para realizar el análisis cinemático para su posterior procesamiento, tomándose en total 52 imágenes para una adecuada caracterización.

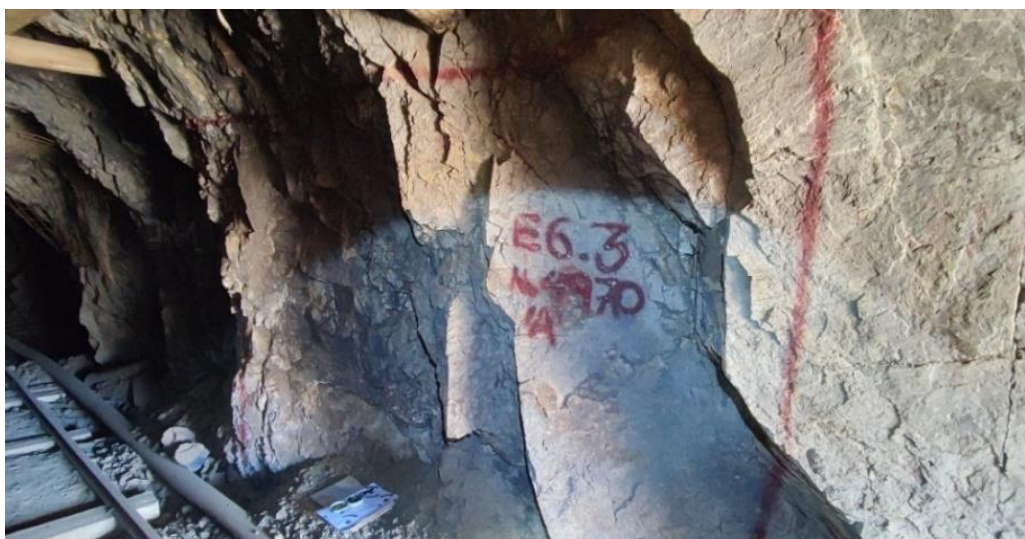
Figura 72

Referencia fotográfica de la estación 03



Figura 73

Vista lateral derecha de la estación 03



Luego de la recolección y procesamiento de imágenes en el software, se procedió a realizar la creación de una densidad de puntos acorde a las necesidades

requeridas; siendo estas de manera intermedia con un total de 1 995 298 puntos identificados en esta E.G. 03, a causa de la buena iluminación de la estación, teniéndose como resultado el siguiente DenseCloud.

Figura 74

Fotografías tomadas de la estación 03



Figura 75

Procesamiento de las 52 imágenes de la estación 03

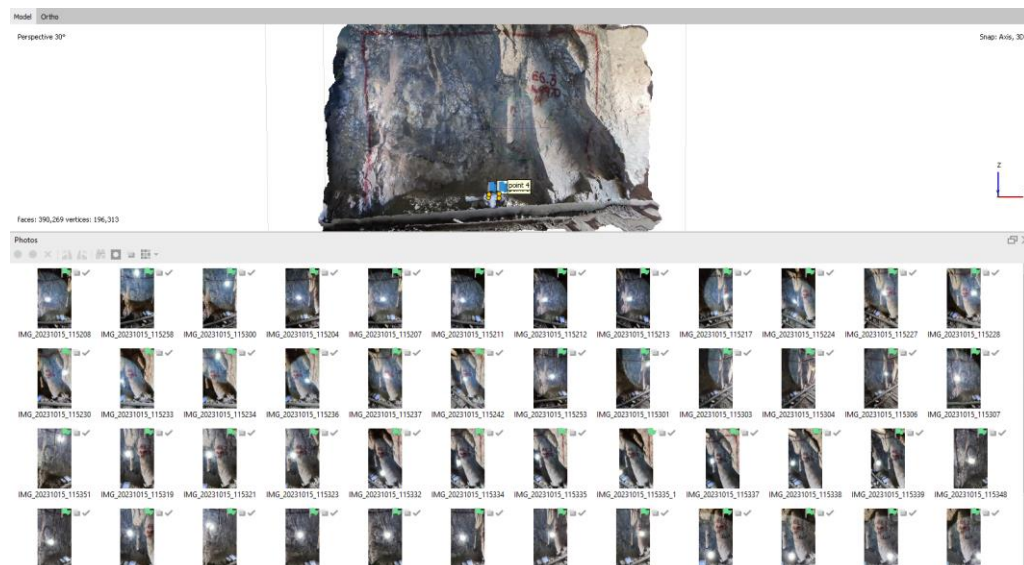


Figura 76

Densidad de puntos de la estación 03

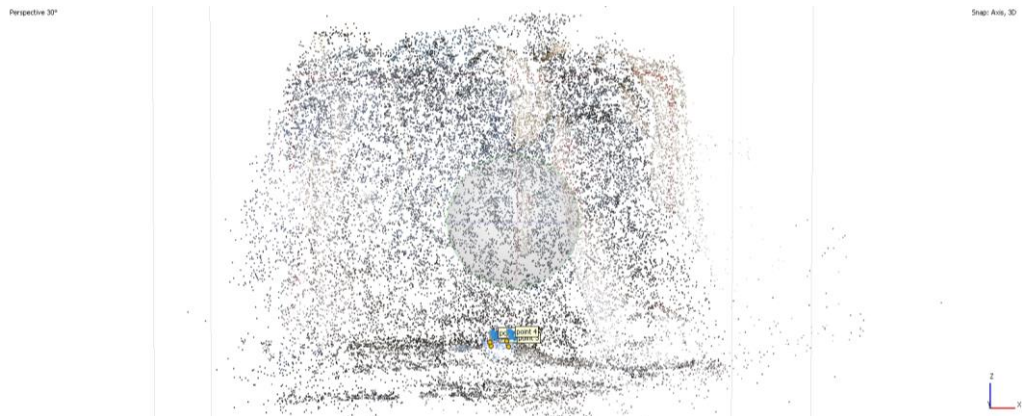


Figura 77

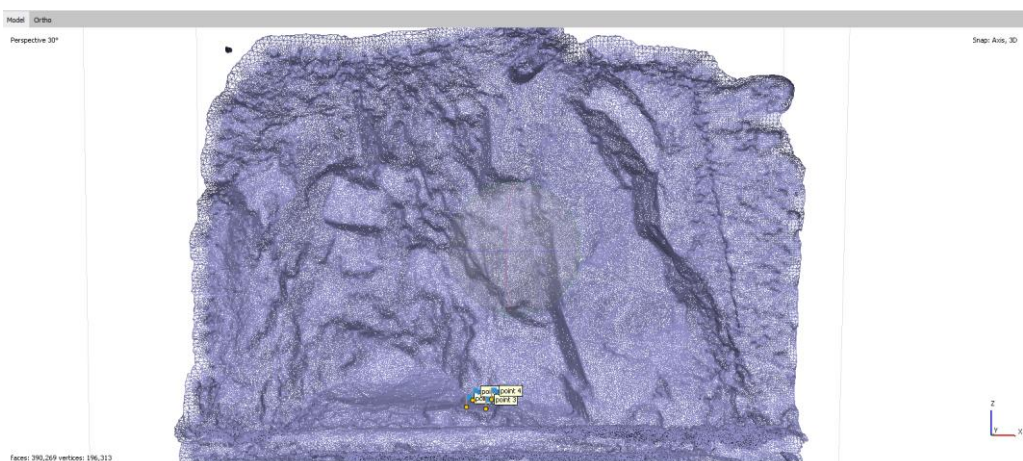
Vista iso a 30° de densidad de puntos de la estación 03



Luego, para la creación de las texturas necesarias se realizó el siguiente enmallado considerando la densidad de puntos realizada anteriormente, la cual brinda una perspectiva del solido que se realizó.

Figura 78

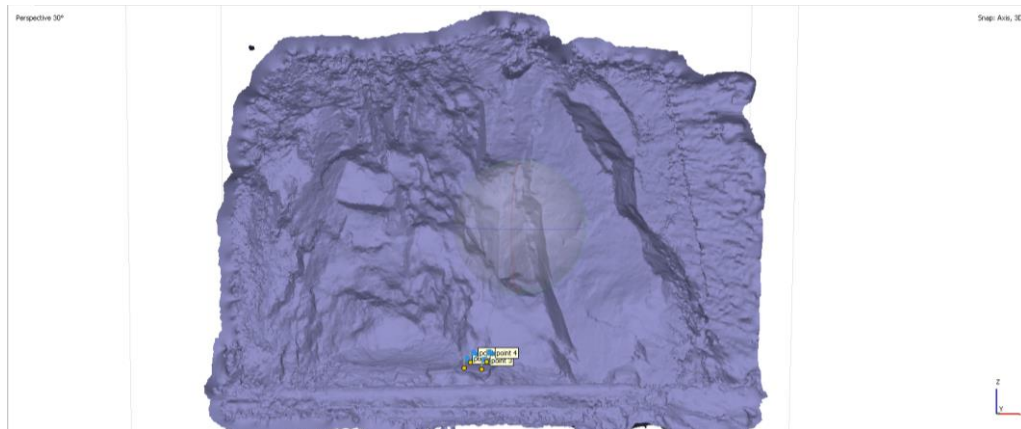
Modelo de estructuras de la estación 03



Para la realización del modelo del sólido, se realizaron ajustes automatizados para que el resultado sea el más óptimo considerando las perspectivas del terreno a estudio, teniendo como resultado la siguiente imagen.

Figura 79

Modelo del sólido de la estación 03



Como ajuste final para que el modelo tridimensional sea lo más exacto posible, se realizaron ajustes en los mapas de profundidad de cada imagen con el fin del mejorar la perspectiva de cada fotografía adquirida, como se aprecia en las siguientes imágenes.

Figura 80

Modelo de mapa de profundidad de la estación 03

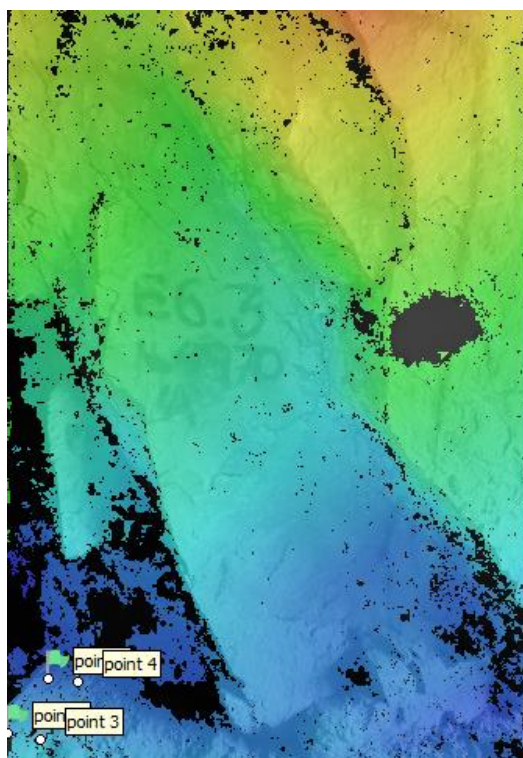
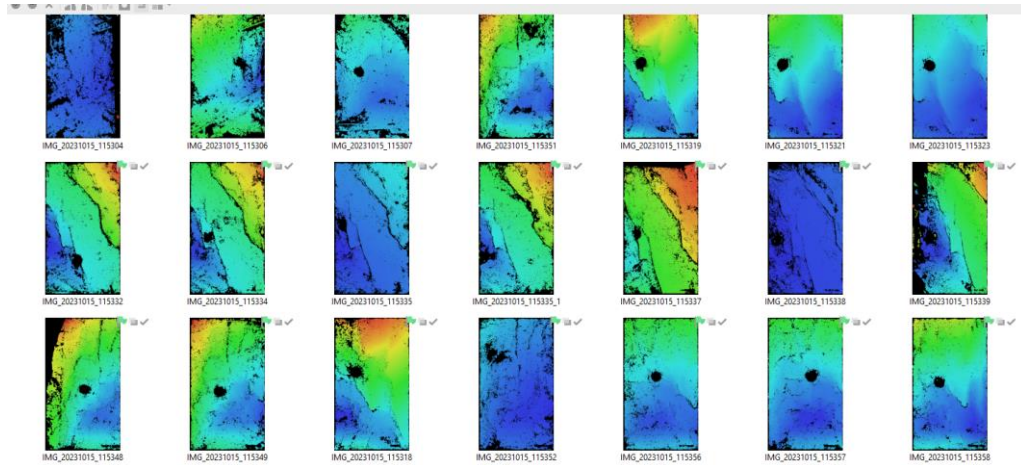


Figura 81

Modelos de mapas de profundidad de las imágenes de la estación 03



Finalmente, el resultado obtenido es el de las siguientes imágenes, siendo este el modelo a escala de la estación geomecánica 03, pudiendo ser manipulable a conveniencia del análisis a realizar.

Figura 82

Modelo de texturas de la estación 03



Figura 83

Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 03



Por otra parte, como modo de control, se realizó un mapeo geomecánico de manera manual en la estación 03. Como resultado del mapeo geomecánico en la estación 03 se tiene un cálculo de un RMR'b de 61 siendo ésta considerada entre roca Tipo II B (buena) y Tipo III A (regular) y un índice Q de 6.623 correspondiente a la clasificación de roca Regular, como se muestra en la siguiente cartilla.

Figura 84

Cartilla de mapeo estación 03

U.M. POMASI		FORMATO DE MAPEO GEOMECANICO POR VENTANAS - RMR, Q Y GSI										AREA GEOMECANICA				Ecdó rómético	
NIVEL:		4970										REALIZADO POR:				24	35
FECHA: 25/10/23		LABOR: 06.228.56										RESISTENCIA DE LA ROCA				26	35
FOLIO N° 01		PROGRAMA: 03 03 - a entrada de la galería parte de atrás										Esfuerzo vertical (σ ₁) = 0.0277 ^h				29	41
LABOR Rambo		TIPO DE ROCA/ TIPO LOGIAL: Bueno										Alfalfa Esfuerzo = h (m) = 40.71				34	47
ESTADO DE LA EXCAVACIÓN:		Bueno										UCS = 112 σ ₃ = 1.3422 UCS/σ ₃ = 83.447				34	47
OBSERVACIONES: roca fracturada con diaclasas pronunciadas, excavación de ancho x alto, ventana de ancho x alto, rumbo de la excavación hacia la dirección e bozamiento principal		Poco compacto										UCS/σ ₃ = 15				35	43
VERSION: 01		230° ±										Compactación Intermedia				36	43
FECHA: 09/10/2023												Compactación Alta				36	43
												UCS/σ ₃ = 15				37	43
												f (Mpa) = 55				38	44
												R (Mpa) = 20				38	44

Coordenadas:		Orientación		SISTEMA DE CLASIFICACION RMR														CLASIFICACION RMR		RQD (%)	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS		RCS	
RCS		RCS																			

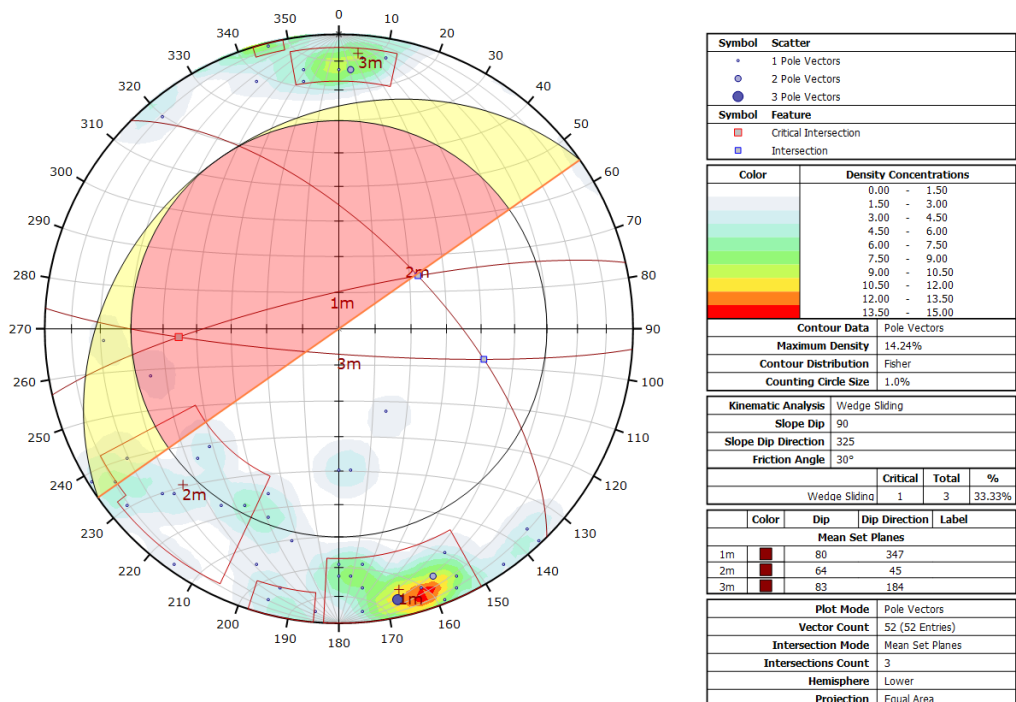
Figura 87

Determinación de orientación de discontinuidades - vista iso izq.



Figura 88

Interpretación estereográfica con SFM estación 03



De la misma manera se obtuvo con la técnica SFM una densidad máxima de 14.24 lo cual indica una mayor presencia de puntos en polos presentes, con un procesamiento total de 52 puntos.

Conociendo los pasos necesarios y requeridos para la interpretación de los resultados obtenidos en cada E.G., se procedió de la misma manera en las demás

estaciones realizadas. Sin embargo, los resultados obtenidos que son mostrados a continuación son solo los necesarios con respecto a la investigación con el fin de no saturar con información cuasi repetitiva de cada estación geomecánica la presente investigación.

4.1.7 Mapeo de la estación geomecánica N°04

La estación 04 fue seleccionada a 110m de la estación 03, con dimensión de la E.G. de 2.40x1.70m, teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Figura 89

Referencia fotográfica de la estación 04



Figura 90

Vista lateral derecha de la estación 04



Figura 91

Procesamiento de las 34 imágenes de la estación 04



Figura 92

Modelo de texturas de la estación 04



Figura 93

Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 04



Figura 95

Interpretación estereográfica estación 04

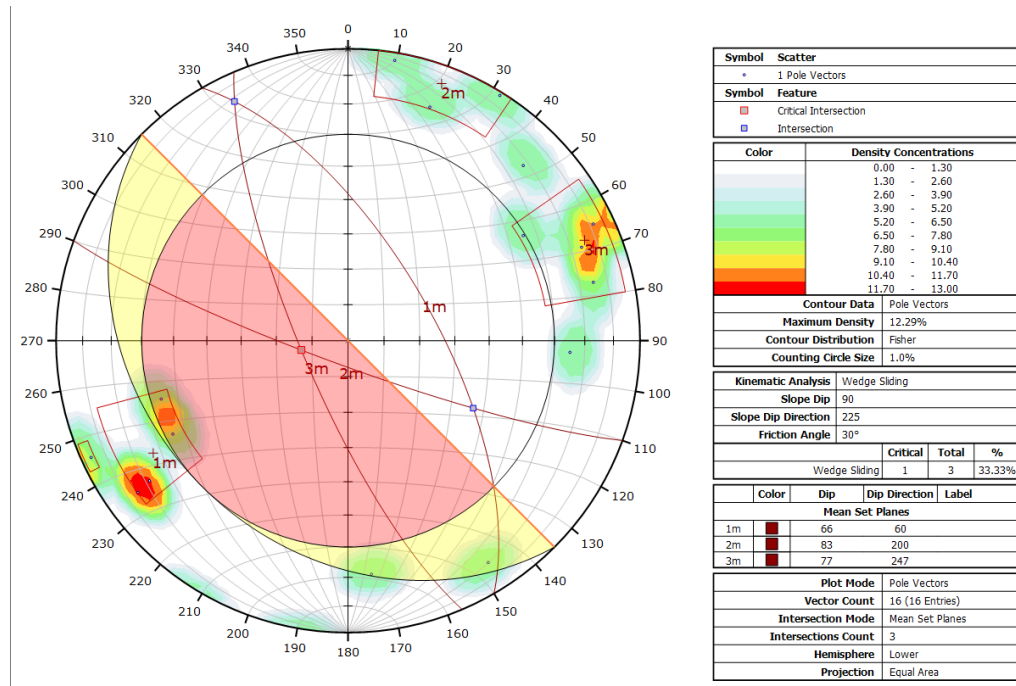
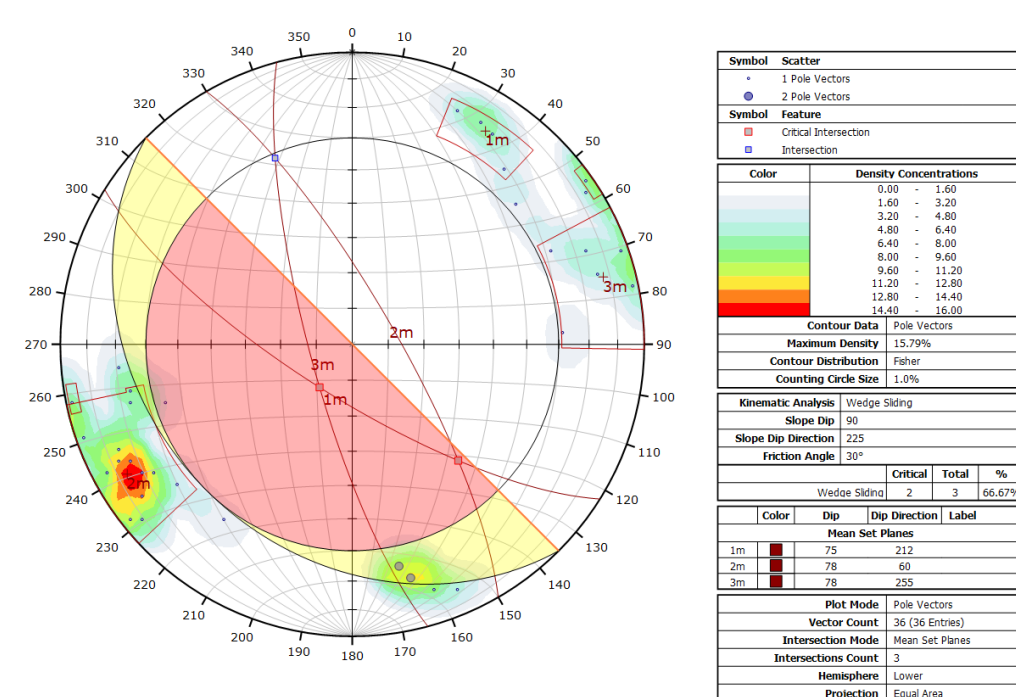


Figura 96

Interpretación estereográfica con SFM estación 04



Se tiene como resultado de este mapeo convencional, una densidad máxima en el plano equiareal de 12.29 y un total de 16 puntos. De la misma manera se obtuvo con la técnica SFM una densidad máxima de 15.79, con un procesamiento total de 36 puntos.

4.1.9 Mapeo de la estación geomecánica N°05

La estación 05, siguiendo con las mismas características de encuentra a 90m de la estación 04, con dimensión de 2.5x1.7m el cual también se encuentra en un OP teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Figura 97

Referencia fotográfica de la estación 05



Figura 98

Vista lateral izquierda de la estación 05



Figura 99

Procesamiento de las 59 imágenes de la estación 05

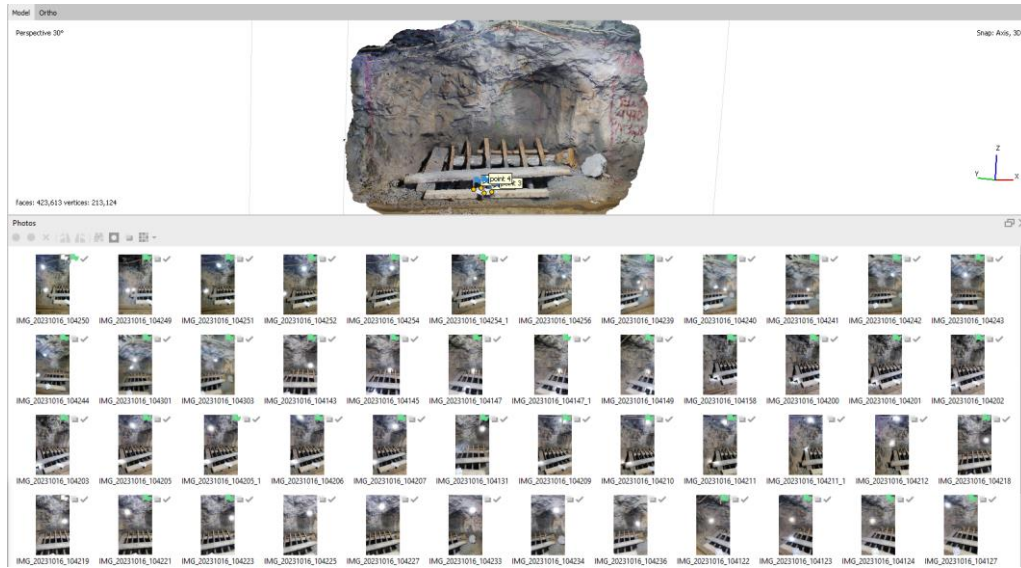


Figura 100

Modelo de texturas de la estación 05



Figura 101

Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 05



Como resultado del mapeo geomecánico en la estación 05 se tiene un cálculo de un RMR^b de 69 siendo ésta considerada entre roca Tipo II B y un índice Q de 22.08 correspondiente a la clasificación de roca Regular, como se muestra en la siguiente cartilla.

Figura 102
Cartilla de mapeo estación 05

U.M. POMASI		FORMATO DE MAPEO GEOMECANICO POR VENTANAS - RMR, Q Y GSI										AREA GEOMECANICA				Escala 10 metros							
NIVEL:		4970										REALIZADO POR:				25	35						
FECHA: 29/03/23		LABOR: 06.228.56										RESISTENCIA DE LA ROCA				26	36						
FOYD N° 05		PROCESO N° A: 60.05 - a 90m de la estación 04										Estudio vertical (σ _v): 0.027 Tn				28	41						
LABOR Rumbos		ESTADO DE LA EXCAVACIÓN: Buena										Roca: Resistencia (σ _v): 49.71				29	44						
VERSION: 01		OBSERVACIONES: roca con grietas pronunciadas, en cavación de tamaño x 1.7 alto, ventana de 2.56 ancho x 1.70 alto. Al lado de la ch 880										Poco compacta				30	46						
FECHA: 08/30/2023		307° ± 5°										Compatibilidad Intensiva				30	46						
												Compatibilidad Alta				33	49						
												R (Mpa) = 48				34	49						
												R (Mpa) = 95				31.3	45.8						
Coordenadas:		Tipo de estructura		Orientación		SISTEMA DE CLASIFICACION RMR														CLASIFICACION RMR		#Frec. RQD (%)	
A:		B:		C:		CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES (estado de fracturas)														RMR		RQD (%)	
N:		E:		S:																DESCRIPCION			
W:		T:		T:																RMR (BASIC)			
VENTANA/CELDA N°		D:		D:																RMR (CORREGIDO)			
S		E		E																RMR (BASIC)			
T		T		T																RMR (CORREGIDO)			
1		2		3																RMR (BASIC)			
2		3		4																RMR (CORREGIDO)			
3		4		5																RMR (BASIC)			
4		5		6																RMR (CORREGIDO)			
5		6		7																RMR (BASIC)			
6		7		8																RMR (CORREGIDO)			
7		8		9																RMR (BASIC)			
8		9		10																RMR (CORREGIDO)			
9		10		11																RMR (BASIC)			
10		11		12																RMR (CORREGIDO)			
11		12		13																RMR (BASIC)			
12		13		14																RMR (CORREGIDO)			
13		14		15																RMR (BASIC)			
14		15		16																RMR (CORREGIDO)			
15		16		17																RMR (BASIC)			
16		17		18																RMR (CORREGIDO)			
17		18		19																RMR (BASIC)			
18		19		20																RMR (CORREGIDO)			
19		20		21																RMR (BASIC)			
20		21		22																RMR (CORREGIDO)			
21		22		23																RMR (BASIC)			
22		23		24																RMR (CORREGIDO)			
23		24		25																RMR (BASIC)			
24		25		26																RMR (CORREGIDO)			
25		26		27																RMR (BASIC)			
26		27		28																RMR (CORREGIDO)			
27		28		29																RMR (BASIC)			
28		29		30																RMR (CORREGIDO)			
29		30		31																RMR (BASIC)			
30		31		32																RMR (CORREGIDO)			
31		32		33																RMR (BASIC)			
32		33		34																RMR (CORREGIDO)			
33		34		35																RMR (BASIC)			
34		35		36																RMR (CORREGIDO)			
35		36		37																RMR (BASIC)			
36		37		38																RMR (CORREGIDO)			
37		38		39																RMR (BASIC)			
38		39		40																RMR (CORREGIDO)			
39		40		41																RMR (BASIC)			
40		41		42																RMR (CORREGIDO)			
41		42		43																RMR (BASIC)			
42		43		44																RMR (CORREGIDO)			
43		44		45																RMR (BASIC)			
44		45		46																RMR (CORREGIDO)			
45		46		47																RMR (BASIC)			
46		47		48																RMR (CORREGIDO)			
47		48		49																RMR (BASIC)			
48		49		50																RMR (CORREGIDO)			
49		50		51																RMR (BASIC)			
50		51		52																RMR (CORREGIDO)			
51		52		53																RMR (BASIC)			
52		53		54																RMR (CORREGIDO)			
53		54		55																RMR (BASIC)			
54		55		56																RMR (CORREGIDO)			
55		56		57																RMR (BASIC)			
56		57		58																RMR (CORREGIDO)			
57		58		59																RMR (BASIC)			
58		59		60																RMR (CORREGIDO)			
59		60		61																RMR (BASIC)			
60		61		62																RMR (CORREGIDO)			
61		62		63																RMR (BASIC)			
62		63		64																RMR (CORREGIDO)			
63		64		65																RMR (BASIC)			
64		65		66																RMR (CORREGIDO)			
65		66		67																RMR (BASIC)			
66		67		68																RMR (CORREGIDO)			
67		68		69																RMR (BASIC)			
68		69		70																RMR (CORREGIDO)			
69		70		71																RMR (BASIC)			
70		71		72																RMR (CORREGIDO)			
71		72		73																RMR (BASIC)			
72		73		74																RMR (CORREGIDO)			
73		74		75																RMR (BASIC)			
74		75		76																RMR (CORREGIDO)			
75		76		77																RMR (BASIC)			
76		77		78																RMR (CORREGIDO)			
77		78		79																RMR (BASIC)			
78		79		80																RMR (CORREGIDO)			
79		80		81																RMR (BASIC)			
80		81		82																RMR (CORREGIDO)			
81		82		83																RMR (BASIC)			
82		83		84																RMR (CORREGIDO)			
83		84		85																RMR (BASIC)			
84		85		86																RMR (CORREGIDO)			
85		86		87																RMR (BASIC)			
86		87		88																RMR (CORREGIDO)			
87		88		89																RMR (BASIC)			
88		89		90																RMR (CORREGIDO)			
89		90		91																RMR (BASIC)			
90		91		92																RMR (CORREGIDO)			
91		92		93																RMR (BASIC)			
92		93		94																RMR (CORREGIDO)			
93		94		95																RMR (BASIC)			
94		95		96																RMR (CORREGIDO)			
95		96		97																RMR (BASIC)			
96		97		98																RMR (CORREGIDO)			
97		98		99																RMR (BASIC)			
98		99		100																RMR (CORREGIDO)			
99		100		101																RMR (BASIC)			
100		101		102																RMR (CORREGIDO)			
101		102		103																RMR (BASIC)			
102		103		104																RMR (CORREGIDO)			
103		104		105																RMR (BASIC)			
104		105		106																RMR (CORREGIDO)			
105		106		107																RMR (BASIC)			
106		107		108																RMR (CORREGIDO)			
107		108		109																RMR (BASIC)			
108		109		110																RMR (CORREGIDO)			
109		110		111																RMR (BASIC)			
110		111		112																RMR (CORREGIDO)			
111		112		113																RMR (BASIC)			
112		113		114																RMR (CORREGIDO)			
113		114		115																RMR (BASIC)			
114		115		116																RMR (CORREGIDO)			
115		116		117																RMR (BASIC)			
116		117		118																RMR (CORREGIDO)			
117		118		119																RMR (BASIC)			
118		119		120																RMR (CORREGIDO)			
119		120		121																RMR (BASIC)			
120		121		122																RMR (CORREGIDO)			
121		122		123																RMR (BASIC)			
122		123		124																RMR (CORREGIDO)			
123		124		125																RMR (BASIC)			
124		125		126																RMR (CORREGIDO)			
125		126		127																RMR (BASIC)			
126		127		128																RMR (CORREGIDO)			
127		128		129																RMR (BASIC)			
128		129		130																RMR (CORREGIDO)			
129		130		131																RMR (BASIC)			
130		131		132																RMR (CORREGIDO)			
131		132		133																RMR (BASIC)			
132		133		134																RMR (CORREGIDO)			
133		134		135																RMR (BASIC)			
134		135		136																RMR (CORREGIDO)			
135		136		137																RMR (BASIC)			
136		137		138																RMR (CORREGIDO)			
137		138		139																RMR (BASIC)			
138		139		140																RMR (CORREGIDO)			
139		140		141																RMR (BASIC)			
140		141		142																RMR (CORREGIDO)			
141		142		143																RMR (BASIC)			
142		143		144																RMR (CORREGIDO)			
143		144		145																RMR (BASIC)			
144		145		146																RMR (CORREGIDO)			
145		146		147																RMR (BASIC)			
146		147		148																RMR (CORREGIDO)			
147		148		149																RMR (BASIC)			
148		149		150																RMR (CORREGIDO)			
149																							

4.1.11 Mapeo de la estación geomecánica N°06

La estación 06 se encuentra aproximadamente a 65m de la estación 05, con una E.G. de dimensión de 1.7x2.5m, teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Figura 105

Referencia fotográfica de la estación 06



Figura 106

Vista lateral derecha de la estación 06



Figura 107

Procesamiento de las 40 imágenes de la estación 06

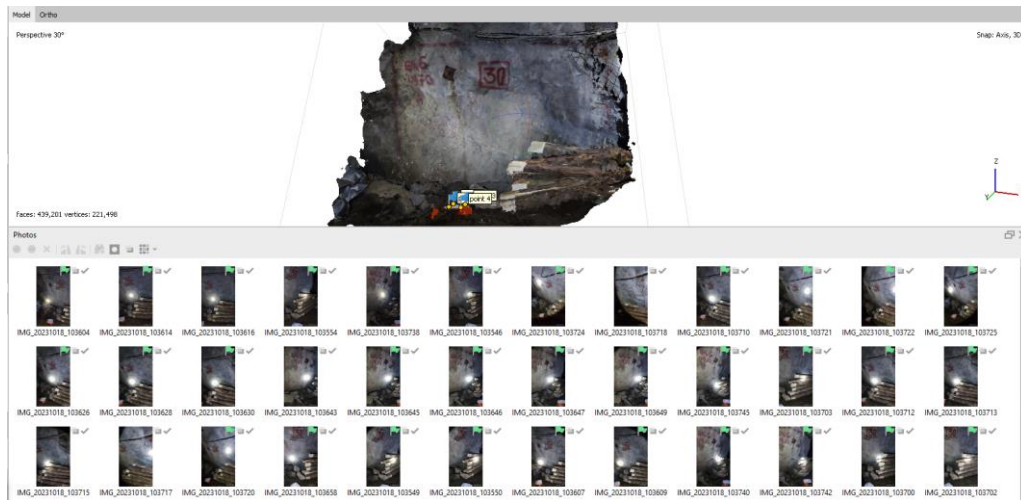


Figura 108

Modelo de texturas de la estación 06



Figura 109

Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 06



Como resultado del mapeo geomecánico en la estación 06 se tiene un cálculo de un RMR'b de 66 siendo ésta considerada entre roca Tipo II B (buena) y un índice Q de 13.4 correspondiente a roca Regular, como se muestra en la siguiente cartilla.

Figura 110
Cartilla de mapeo estación 06

U.M. POMASI		FORMATO DE MAPEO GEOMECANICO POR VENTANAS - RMR, Q Y GSI										AREA GEOMECANICA				Escala 10 metros	
NIVEL:		4970										REALIZADO POR:				20	17
FECHA: 20/03/23		LABOR: 06.228.56										RESISTENCIA DE LA ROCA				22	35
FOYD N° 05		PROCESO N° A: 05 de -a 05m de la estación 05										RESISTENCIA DE LA ROCA				23	45
LABOR Rumbero		TIPO DE ROCAS (FOLGONIA):										Roca frías (a) = 0.027"n				21	45
ESTADO DE LA EXCAVACIÓN:		buena										Roca frías (a) = 0.027"n				21	45
VERSION: 01		OBSERVACIONES: roca ligeramente fracturada en grietas pronunciadas, excavación de 2.4 ancho x 2.7 alto, ventana de 2.50 ancho x 1.70 alto.										Roca frías (a) = 0.027"n				21	45
FECHA: 08/30/2023		23MNL										Roca frías (a) = 0.027"n				21	45

Coordenadas:	Tipo de excavación	Orientación	SISTEMA DE CLASIFICACION RMR										CORRECCION		CLASIFICACION RMR		#Frac/ m	RQD (%)		
			RCS	RCS	RQD	Fracturamiento	Aperturas	Seguridad	Sellos	Alteración	RMR	RMR	RMR	DESCRIPCION						
1	D	73 69	7	-	17	8	4	6	5	-	2	3	15	67	-5	62	72	Ninguna	1	99.522
1	D	59 45	7	-	17	10	4	6	5	-	2	3	15	69	-5	64	74	Ninguna	2	98.248
1	D	39 21	7	-	17	10	2	6	5	-	4	3	15	69	-5	64	74	Ninguna	13	62.682
1	D	56 32	7	-	17	10	2	6	3	-	4	3	15	67	-5	62	72	Ninguna	14	59.183
1	D	74 11	7	-	17	10	2	6	3	-	2	3	15	65	-5	60	70	Ninguna	15	55.783
2	D	63 16	7	-	17	10	4	5	3	-	2	3	15	66	-2	64	71	Ninguna	16	52.493
2	D	47 10	7	-	17	8	6	5	3	-	2	3	15	66	-2	64	71	Ninguna	17	49.225
2	D	63 188	7	-	17	10	4	5	3	-	2	3	15	66	-2	64	71	Ninguna	18	46.264
2	D	66 17	7	-	17	15	4	4	3	-	4	3	15	72	-2	70	77	Ninguna	19	43.375
3	D	35 28	7	-	17	15	4	4	3	-	2	3	15	70	0	70	75	Ninguna	20	40.611
3	D	41 27	7	-	17	10	4	4	3	-	2	3	15	65	0	65	70	Ninguna	21	37.961
3	D	47 36	7	-	17	8	2	4	3	-	2	3	15	61	0	61	66	Ninguna	22	35.457
3	D	35 26	7	-	17	5	2	4	3	-	2	3	15	58	0	58	63	Ninguna	23	33.085
																			24	30.844
																			25	28.730
																			26	26.738
																			27	24.866
																			28	23.108
																			29	21.459
																			30	19.915

SISTEMA DE CLASIFICACION Q		Clasificación Q	
RQD %	80.878	800-1000	EXCELENTE BUENA
Índice de discontinuidades (Jn)	9	0-30-40	EXCELENTE BUENA
Índice de rugosidad (Jr)	3	0-2-5	BUENA
Índice de alteración (Ja)	2	10-20	REGULAR
Índice de agua subterránea (Jw)	1	4-6	BUENA
Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional)	1	1-3	BUENA
Q = (RQD/Jn) x (Jr / Ja) x (Jw / SRP)	Q = 13.48	0-13	BUENA
Q' = (RQD/Jn) x (Jr / Ja)	Q' = 13.48	0-13	BUENA
INDICE DE RESISTENCIA	GSI = RMR-S = 51.231	0-25	EXCELENTE BUENA

FOTOGRAFIA DE LA EST.	

4.1.12 Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°06

Los resultados del estereograma del mapeo manual y con la identificación de discontinuidades por el método SFM, a fin de comparar las familias principales con ambos métodos, se presentan a continuación.

Figura 111

Interpretación estereográfica estación 06

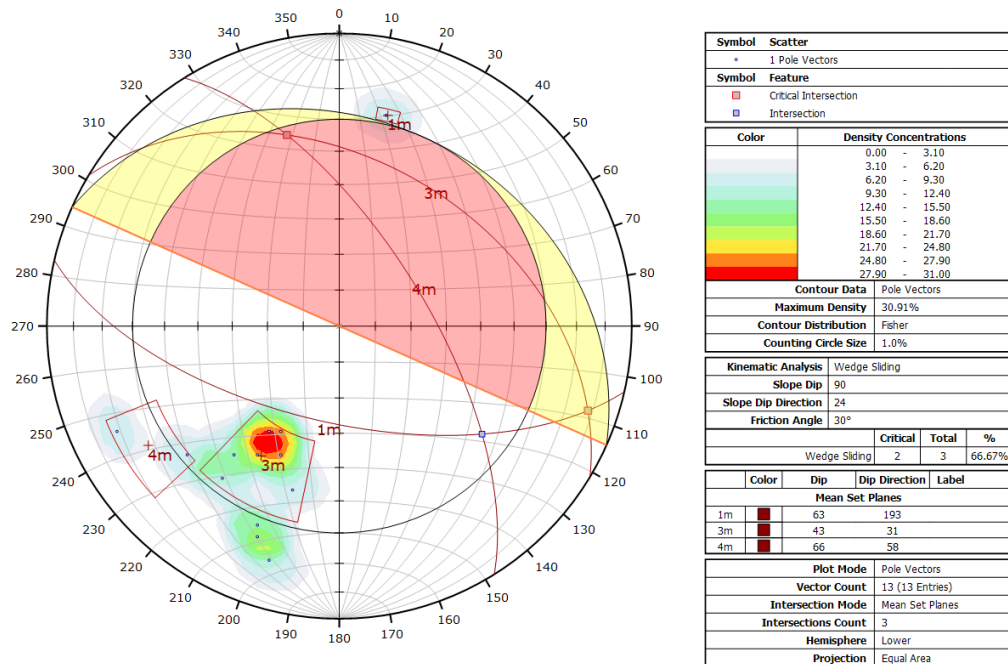
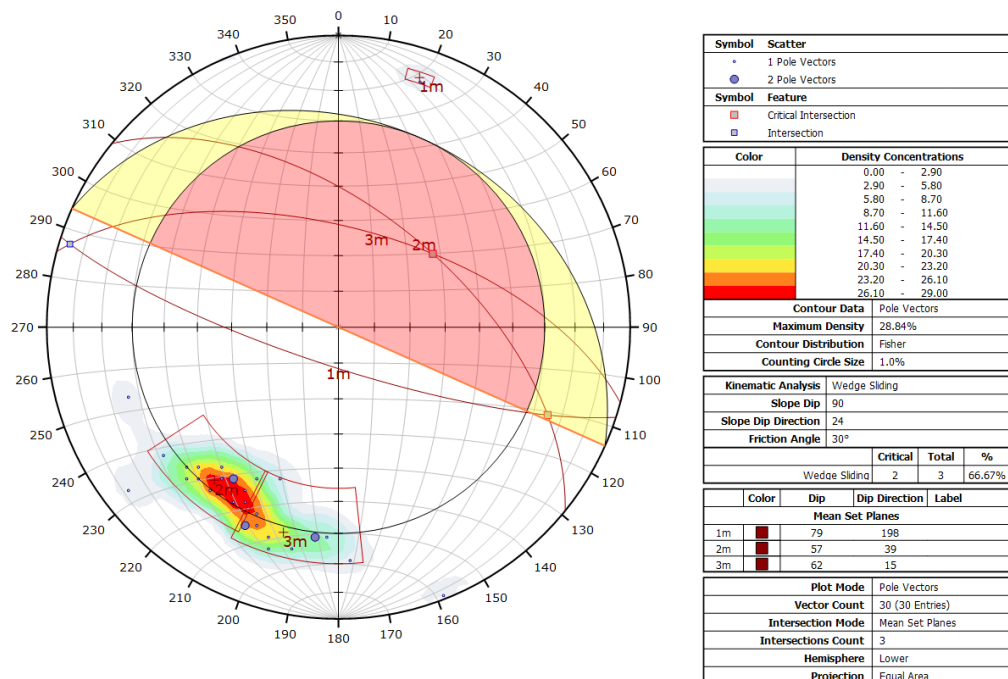


Figura 112

Interpretación estereográfica con SFM estación 06



Se tiene como resultado de este mapeo convencional, una densidad máxima en el plano equiareal de 30.91 y un total de 13 puntos. De la misma manera se obtuvo con la técnica SFM una densidad máxima de 28.84 con un procesamiento total de 30 puntos.

4.1.13 Mapeo de la estación geomecánica N°07

La estación 07 se encuentra a 60m de la estación 06, con dimensión de 1.7x2.5m, teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Figura 113

Referencia fotográfica de la estación 07



Figura 114

Vista lateral derecha de la estación 07



Figura 115

Procesamiento de las 50 imágenes de la estación 07



Figura 116

Modelo de texturas de la estación 07



Figura 117

Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 07



Como resultado del mapeo geomecánico en la estación 07 se tiene un cálculo de un RMR'b de 69 siendo ésta considerada entre roca Tipo II B (buena) y un índice Q de 15 correspondiente a la clasificación de roca Regular, como se muestra en la siguiente cartilla.

Figura 118
Cartilla de mapeo estación 07

U.M. POMASI		FORMATO DE MAPEO GEOMECANICO POR VENTANAS - RMR, Q Y GSI										AREA GEOMECANICA			Escala 10 metros	
NIVEL:		4970										REALIZADO POR:			21	36
FECHA: 20/03/23		LABOR										RESISTENCIA DE LA ROCA			24	36
FOUDO N° 05		PROCESADA: 06.228.56										Estudio vertical (σ _v) =			0.027	7h
LABOR Rumbos		ESTADO DE LA EXCAVACIÓN: Buena										Roca (Resistencia σ _v) =			90.71	36
VERSIÓN: 01		DESCRIPCIONES: roca meteorizada con presencia de agua, excavación de 3.5 ancho x 2.7 alto, ventana de 2.50 ancho x 1.70 alto.										UCS =			102	36
FECHA: 08/30/2023		230°-45°										Compresión uniaxial			8	UC5e1x15
												Compresión triaxial			33	50
												UC5e1x15			34	51
												R (Mpa)			65	36
												R (Mpa)			115	33.5
												RQD (%)			115	49

Coordenadas:		Tipo de estructura:		Orientación:		SISTEMA DE CLASIFICACION RMR															CLASIFICACION RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
A:		B:		C:		CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES (DESCRIPCIONES)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
N:		E:		T:		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
VENTANA/ CELDA N°		D:		E:		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
1		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
2		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
3		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
4		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
5		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
6		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
7		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
8		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
9		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
10		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
11		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
12		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
13		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
14		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
15		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
16		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
17		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
18		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
19		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
20		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
21		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
22		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
23		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
24		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
25		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
26		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
27		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
28		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
29		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	
30		D		E		RCS (RCS)															RMR		#Vent/ m		RQD (%)	

SISTEMA DE CLASIFICACION Q		Clasificación Q	
RQD %	84.420	Q	15.008
Índice de discontinuidades (Jn)	9	DESCRIPCION	REGULAR
Índice de rugosidad (Jr)	3	DESCRIPCION	REGULAR
Índice de alteración (Ja)	0.75	DESCRIPCION	REGULAR
Índice de agua subterránea (Jw)	1	DESCRIPCION	REGULAR
Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional)	2.5	DESCRIPCION	REGULAR
Q = (RQD/m) x (Jr / Ja) x (Jw / SRP)	Q = 15.008	DESCRIPCION	REGULAR
Q' = (RQD/m) x (Jr / Ja)	Q' = 37.52	DESCRIPCION	REGULAR
INDICE DE RESISTENCIA	GSI = RMR-S = 64.275	DESCRIPCION	REGULAR

FOTOGRAFIA DE LA ESTACION	

4.1.14 Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°07

Los resultados del estereograma del mapeo manual y con la identificación de discontinuidades por el método SFM, a fin de comparar las familias principales con ambos métodos, se presentan a continuación.

Figura 119

Interpretación estereográfica estación 07

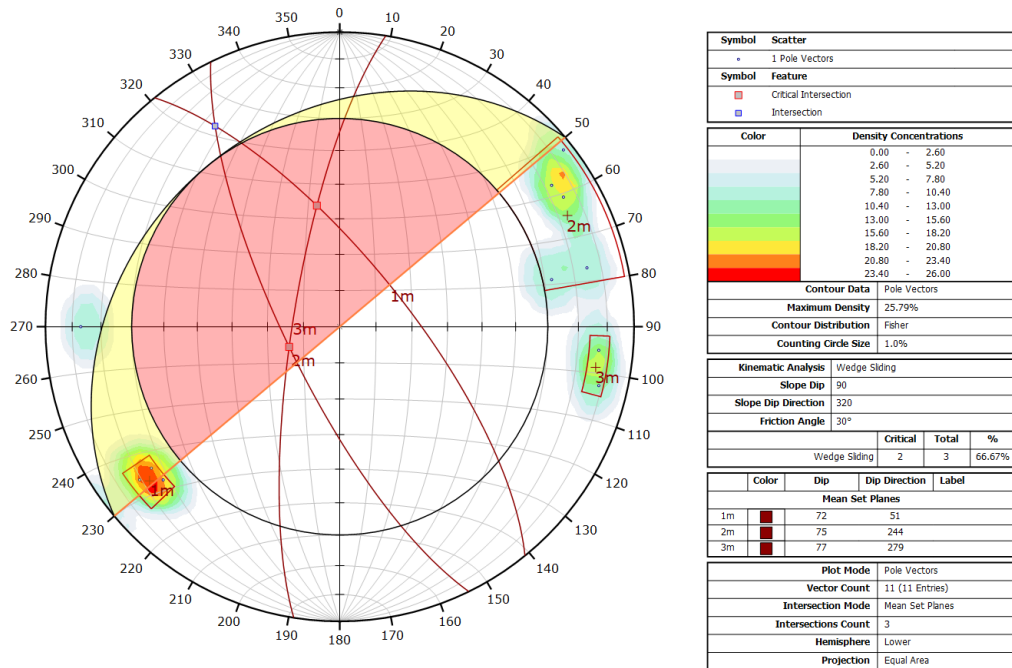
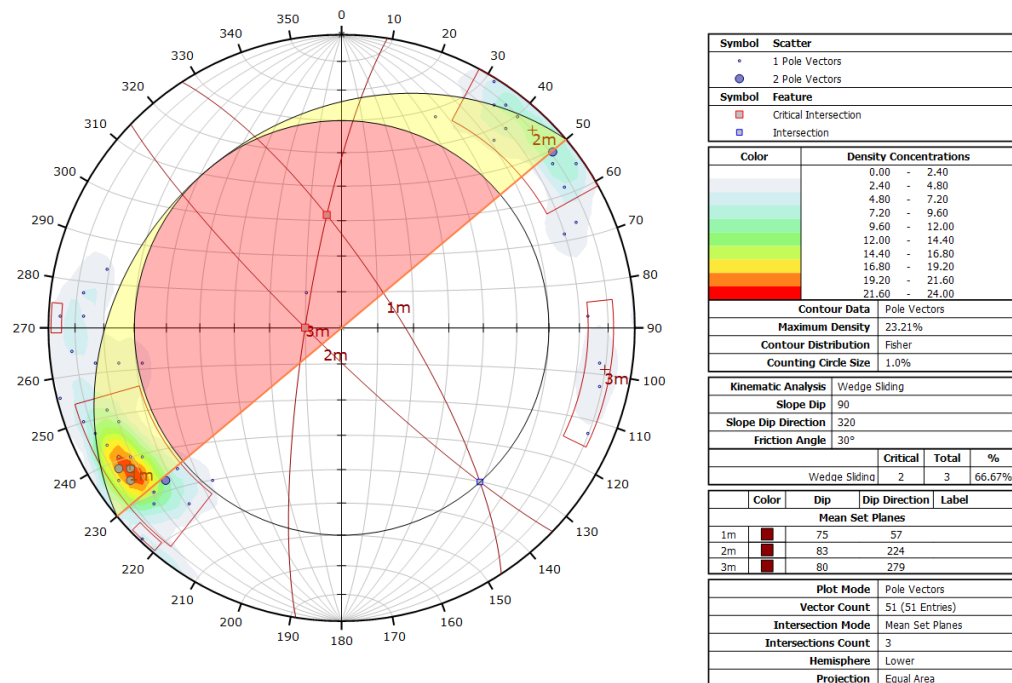


Figura 120

Interpretación estereográfica con SFM estación 07



Se tiene como resultado de este mapeo convencional, una densidad máxima en el plano equiareal de 25.79 y un total de 11 puntos. De la misma manera se obtuvo con la técnica SFM una densidad máxima de 23.21 lo cual

indica una mayor presencia de puntos en la densidad de polos presentes, con un procesamiento total de 51 puntos.

4.1.15 Mapeo de la estación geomecánica N°08

La estación 08 se encuentra a 55m de la estación 07, con dimensión de 1.5x2.5m, teniendo como resultado el siguiente modelamiento.

Figura 121

Referencia fotográfica de la estación 08



Figura 122

Vista lateral izquierda de la estación 08



Figura 123

Procesamiento de las 41 imágenes de la estación 08



Figura 124

Modelo de texturas de la estación 08



Figura 125

Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 08



indica una mayor presencia de puntos en la densidad de polos presentes, con un procesamiento total de 47 puntos.

4.1.17 Mapeo de la estación geomecánica N°09

La estación 09 se encuentra a 60m de la estación 08, con dimensión de 1.7x2.5m, teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Figura 129

Referencia fotográfica de la estación 09



Figura 130

Vista lateral izquierda - derecha de la estación 09



Figura 131

Procesamiento de las 55 imágenes de la estación 09

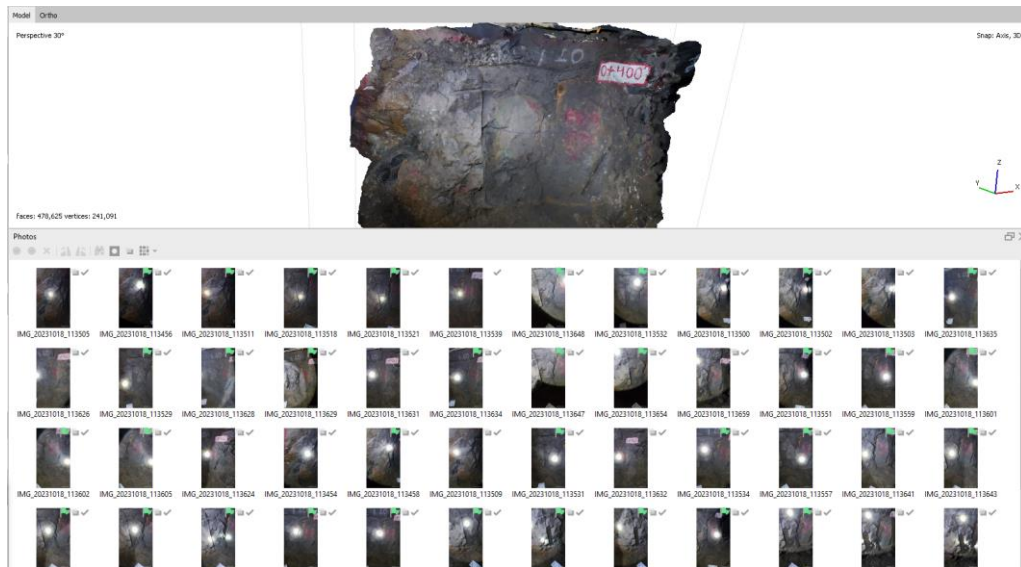


Figura 132

Modelo de texturas de la estación 09



Figura 133

Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 09



El resultado del mapeo geomecánico en la estación 09 es de un RMR^b de 68 siendo ésta considerada entre roca Tipo II B (buena) y un índice Q de 10.1 correspondiente a la clasificación de roca Regular, como se muestra en la siguiente cartilla.

Figura 134
Cartilla de mapeo estación 09

U.M. POMASI		FORMATO DE MAPEO GEOMECANICO POR VENTANAS - RMR, Q Y GSI										AREA GEOMECANICA			Escala 10 metros		
NIVEL:		4970										REALIZADO POR:			20	34	
FECHA: 20/03/23		LABOR: 06.228.56										RESISTENCIA DE LA ROCA			21	34	
FOYUD N° 02		PROYECTO: 09.09 - a 60m de la estación 08										Estudio vertical (Q1) =			0.027	7h	
LABOR Rumbos		ESTADO DE LA EXCAVACIÓN: Buena										Roca (Resistencia) (MPa)			22	35	
VERSION: 01		DESCRIPCIONES: roca fracturada con grietas pronunciadas, excavación de 2.70 ancho x 2.45 alto, ventana de 2.30 ancho x 1.70 alto.										UCS* (MPa)			102	143	
FECHA: 08/30/2023												UCS* (MPa)			102	143	
												Comportamiento			UCS* E-15	31	43
												Comportamiento Alta			UCS* E-15	32	44
												R (Mpa-l)			54	31	43
												R (Mpa-l)			82	31.5	43.1

Coordenadas:	Tipo de ventana	Orientación	SISTEMA DE CLASIFICACION RMR										CLASIFICACION RMR		# Vent.	RQD (%)					
			RCS	RCS	RQD	Condición de discontinuidades (estado de fracturas)	RMR	RMR	RMR	RMR	RMR	RMR	RMR	RMR			RMR	RMR	RMR		
1	D	70	297	7	-	17	10	4	6	3	-	6	3	15	71	-5	66	76	Ninguna	10	28.29
1	D	80	302	7	-	17	8	4	6	3	-	6	3	15	69	-5	64	74	Ninguna	11	29.52
1	D	81	139	7	-	17	8	4	6	3	-	4	3	15	67	-5	62	72	Ninguna	12	28.24
1	D	84	260	7	-	17	5	2	6	3	-	4	1	10	55	-5	50	60	Ninguna	13	26.82
1	D	79	247	7	-	17	5	2	6	5	-	6	3	10	61	-5	56	66	Ninguna	14	28.18
1	D	85	36	7	-	17	8	4	6	5	-	6	3	15	71	-5	66	76	Ninguna	15	28.78
2	D	82	45	7	-	17	5	4	6	3	-	6	3	15	66	-5	61	71	Ninguna	16	27.49
2	D	78	231	7	-	17	10	4	6	3	-	6	3	15	71	-5	66	76	Ninguna	17	28.25
2	D	81	8	7	-	17	10	4	6	3	-	6	3	15	71	-5	66	76	Ninguna	18	28.24
2	D	75	14	7	-	17	10	6	5	5	-	4	1	10	65	-5	60	70	Ninguna	19	27.15
2	D	86	196	7	-	17	10	6	5	5	-	4	1	10	65	-5	60	70	Ninguna	20	27.15
3	D	43	24	7	-	20	8	6	6	5	-	6	3	15	76	0	76	81	Ninguna	21	35.57
3	D	55	32	7	-	20	8	6	6	5	-	6	3	10	71	0	71	76	Ninguna	22	33.05
3	D	39	15	7	-	20	10	6	6	5	-	6	3	15	78	0	78	83	Ninguna	23	37.84
																				24	28.73
																				25	28.73
																				26	26.73
																				27	24.86
																				28	23.10
																				29	21.45
																				30	19.51

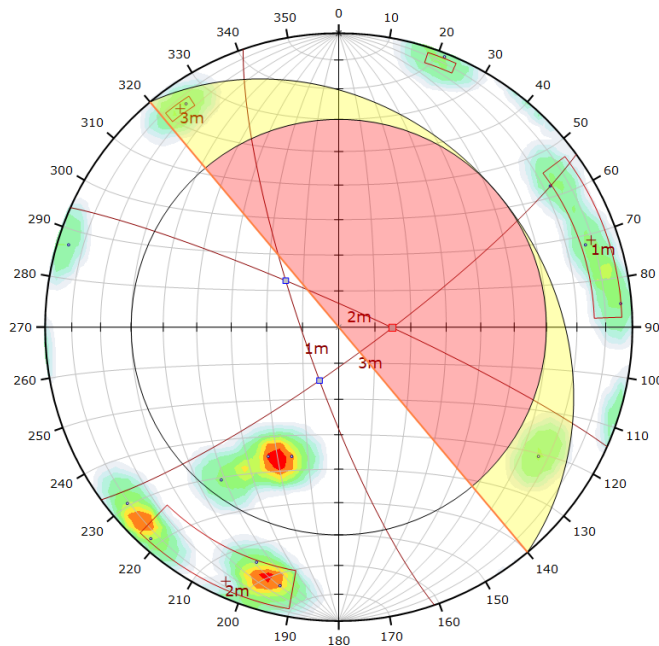
SISTEMA DE CLASIFICACION Q		Clasificación Q	
RQD %	80.878	80.0-100	BUENA
Índice de discontinuidades (Jn)	12	0-10	BUENA
Índice de rugosidad (Jr)	3	0-20	BUENA
Índice de alteración (Ja)	2	0-4	BUENA
Índice de agua subterránea (Jw)	1	0-2	BUENA
Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional)	1	1-4	BUENA
Q = (RQD/Jn) x (Jr/Ja) x (Jw/SRF)	Q = 10.11	0-10	REGULAR
Q' = (RQD/Jn) x (Jr/Ja)	Q' = 10.11	0-10	REGULAR
INDICE DE RESISTENCIA	GSI = RMR-S = 63.357	0-25	BUENA

4.1.18 Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°09

Los resultados del estereograma del mapeo manual y con la identificación de discontinuidades por el método SFM, a fin de comparar las familias principales con ambos métodos, se presentan a continuación.

Figura 135

Interpretación estereográfica estación 09



Symbol	Scatter
*	1 Pole Vectors
Symbol Feature	
■	Critical Intersection
■	Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.40
	1.40 - 2.80
	2.80 - 4.20
	4.20 - 5.60
	5.60 - 7.00
	7.00 - 8.40
	8.40 - 9.80
	9.80 - 11.20
	11.20 - 12.60
	12.60 - 14.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	13.50%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

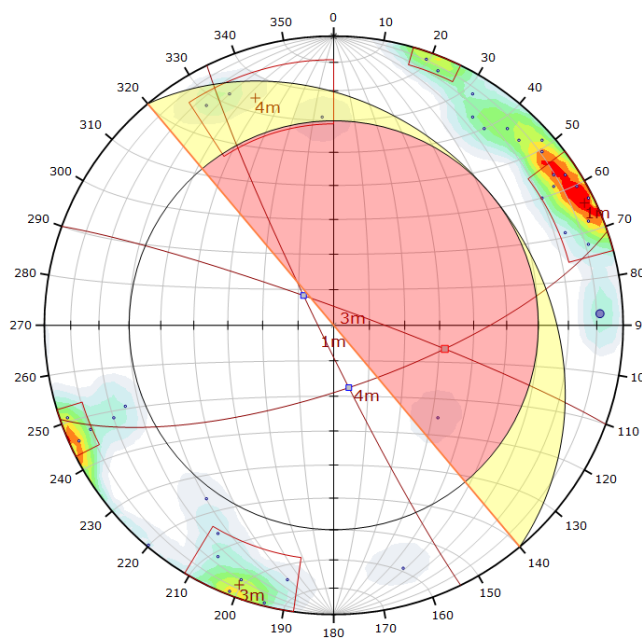
Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip	90			
Slope Dip Direction	50			
Friction Angle	30°			
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		1	3	33.33%

Color	Dip	Dip Direction	Label
1m	80	251	
2m	84	24	
3m	81	144	

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	14 (14 Entries)	
Intersection Mode	Mean Set Planes	
Intersections Count	3	
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Area	

Figura 136

Interpretación estereográfica con SFM estación 09



Symbol	Scatter
*	1 Pole Vectors
●	2 Pole Vectors
Symbol Feature	
■	Critical Intersection
■	Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.60
	1.60 - 3.20
	3.20 - 4.80
	4.80 - 6.40
	6.40 - 8.00
	8.00 - 9.60
	9.60 - 11.20
	11.20 - 12.80
	12.80 - 14.40
	14.40 - 16.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	15.33%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip	90			
Slope Dip Direction	50			
Friction Angle	30°			
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		1	3	33.33%

Color	Dip	Dip Direction	Label
1m	86	244	
3m	85	20	
4m	72	161	

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	38 (38 Entries)	
Intersection Mode	Mean Set Planes	
Intersections Count	3	
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Area	

Se tiene como resultado de este mapeo convencional, una densidad máxima en el plano equiareal de 13.50 y un total de 14 puntos. De la misma manera se obtuvo con la técnica SFM una densidad máxima de 15.33 lo cual

indica una mayor presencia de puntos en la densidad de polos presentes, con un procesamiento total de 38 puntos.

4.1.19 Mapeo de la estación geomecánica N°10

La estación 10 se encuentra a 16m de la estación 09, con dimensión de 3x1.7m, teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Figura 137

Referencia fotográfica de la estación 10



Figura 138

Vista lateral derecha de la estación 10



Figura 139

Procesamiento de las 38 imágenes de la estación 10

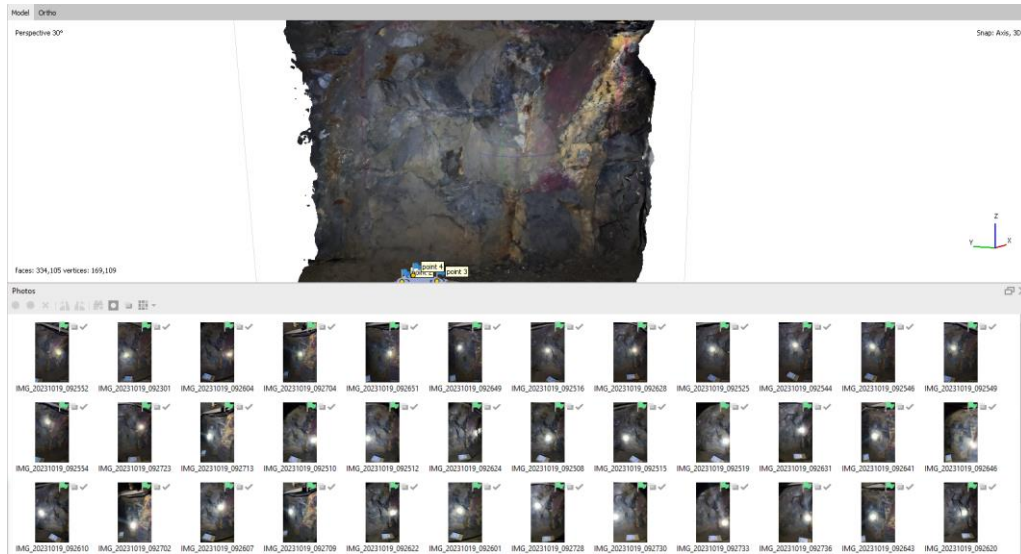


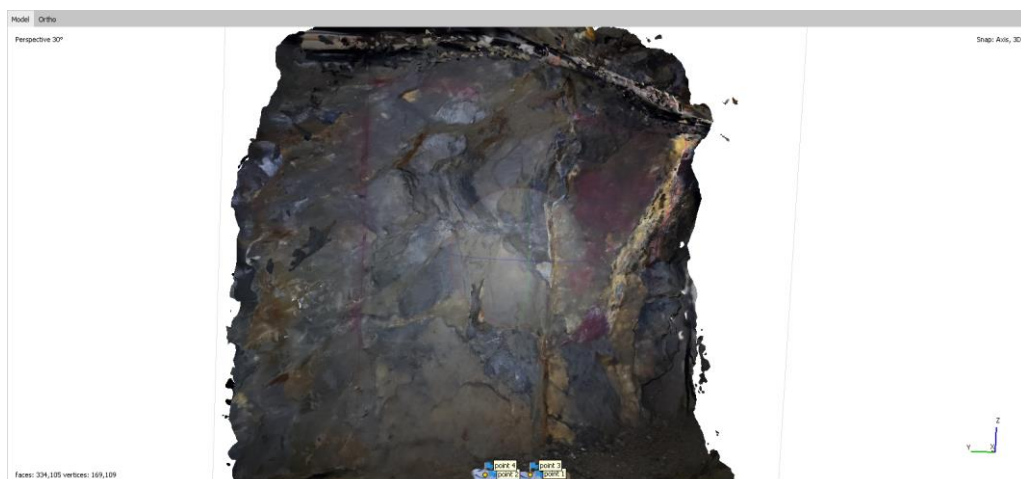
Figura 140

Modelo de texturas de la estación 10



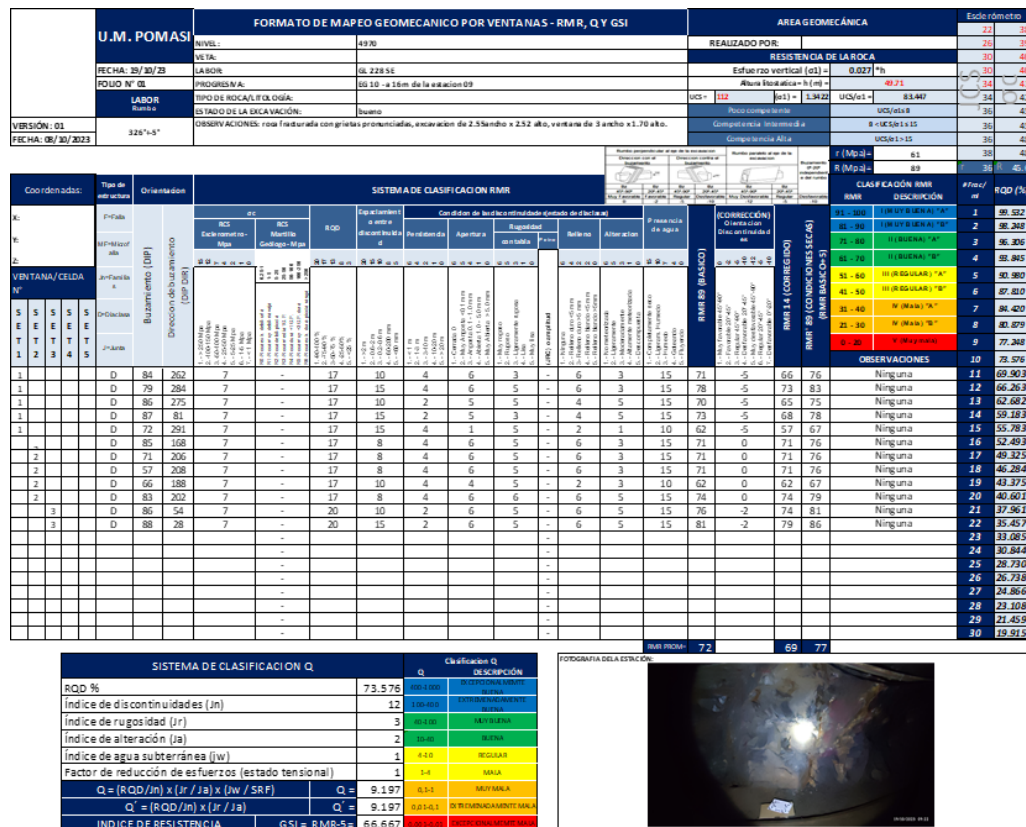
Figura 141

Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 10



El resultado del mapeo geomecánico en la estación 10 es de un RMR^b de 72 siendo ésta considerada entre roca Tipo II A (regular) y un índice Q de 9.1 correspondiente a la clasificación de roca Regular, como se muestra en la siguiente cartilla.

Figura 142
Cartilla de mapeo estación 10

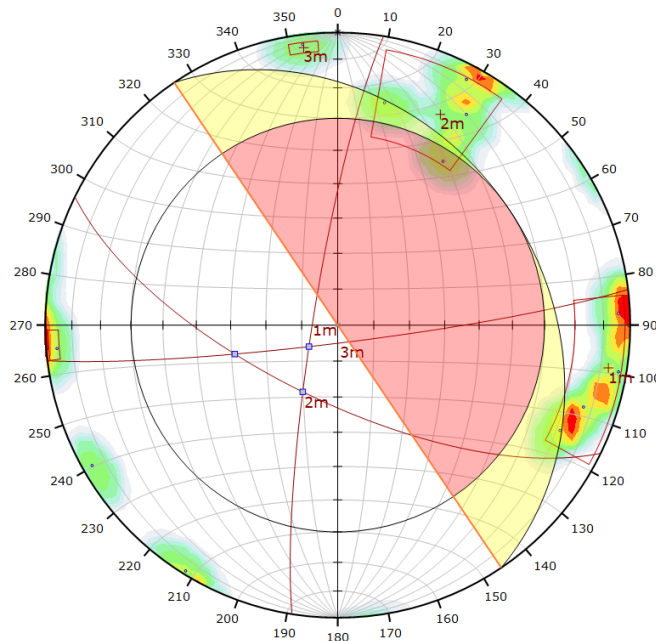


4.1.20 Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°10

Los resultados del estereograma del mapeo manual y con la identificación de discontinuidades por el método SFM, a fin de comparar las familias principales con ambos métodos, se presentan a continuación.

Figura 143

Interpretación estereográfica estación 10



Symbol	Scatter
*	1 Pole Vectors
Symbol	Feature
■	Critical Intersection
□	Intersection

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.50	
1.50 - 3.00	
3.00 - 4.50	
4.50 - 6.00	
6.00 - 7.50	
7.50 - 9.00	
9.00 - 10.50	
10.50 - 12.00	
12.00 - 13.50	
13.50 - 15.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	14.88%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

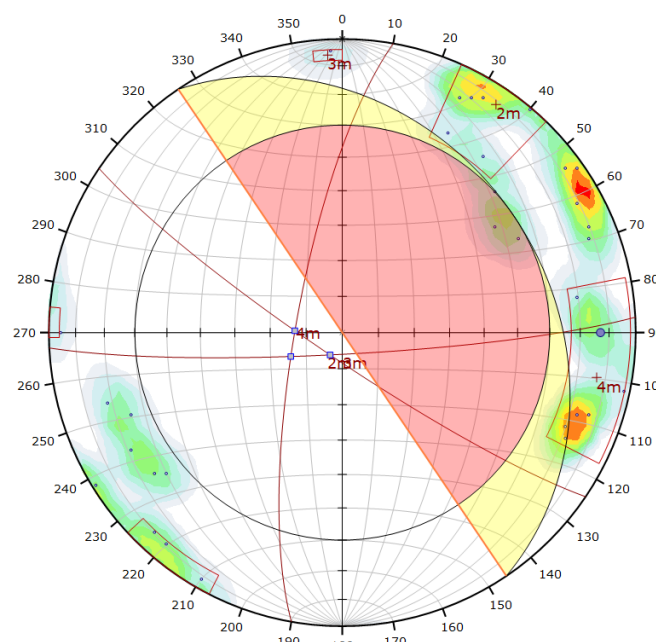
Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	90
Slope Dip Direction	56
Friction Angle	30°
	Critical Total %
Wedge Sliding	0 3 0.00%

Color	Dip	Dip Direction	Label
1m	83	279	
2m	69	206	
3m	85	173	

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	12 (12 Entries)
Intersection Mode	Mean Set Planes
Intersections Count	3
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 144

Interpretación estereográfica con SFM estación 10



Symbol	Scatter
*	1 Pole Vectors
●	2 Pole Vectors
Symbol	Feature
■	Critical Intersection
□	Intersection

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.30	
1.30 - 2.60	
2.60 - 3.90	
3.90 - 5.20	
5.20 - 6.50	
6.50 - 7.80	
7.80 - 9.10	
9.10 - 10.40	
10.40 - 11.70	
11.70 - 13.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.17%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	90
Slope Dip Direction	56
Friction Angle	30°
	Critical Total %
Wedge Sliding	0 3 0.00%

Color	Dip	Dip Direction	Label
2m	83	214	
3m	84	177	
4m	77	280	

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	33 (33 Entries)
Intersection Mode	Mean Set Planes
Intersections Count	3
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Se tiene como resultado de este mapeo convencional, una densidad máxima en el plano equiareal de 14.88 y un total de 12 puntos. De la misma manera se obtuvo con la técnica SFM una densidad máxima de 12.17 lo cual

indica una mayor presencia de puntos en la densidad de polos presentes, con un procesamiento total de 33 puntos.

4.1.21 Mapeo de la estación geomecánica N°11

La estación 11 se encuentra a 32m de la estación 10, con dimensión de 2.3x1.7m, teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Figura 145

Referencia fotográfica de la estación 11



Figura 146

Vista lateral izquierda de la estación 11



Figura 147

Procesamiento de las 32 imágenes de la estación 11

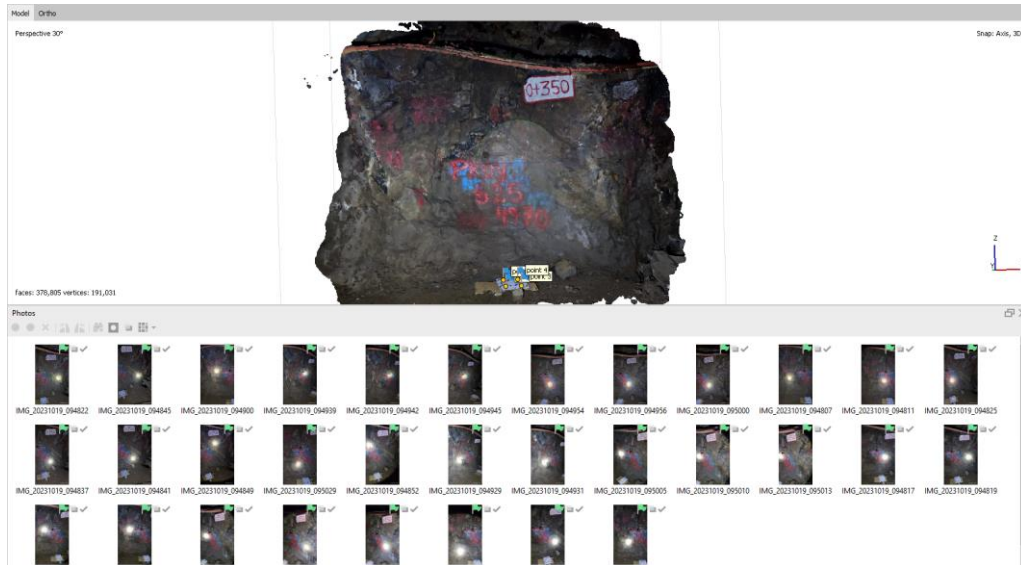


Figura 148

Modelo de texturas de la estación 11



Figura 149

Vista iso izq. del modelo de texturas de la estación 11



Figura 151

Interpretación estereográfica estación 11

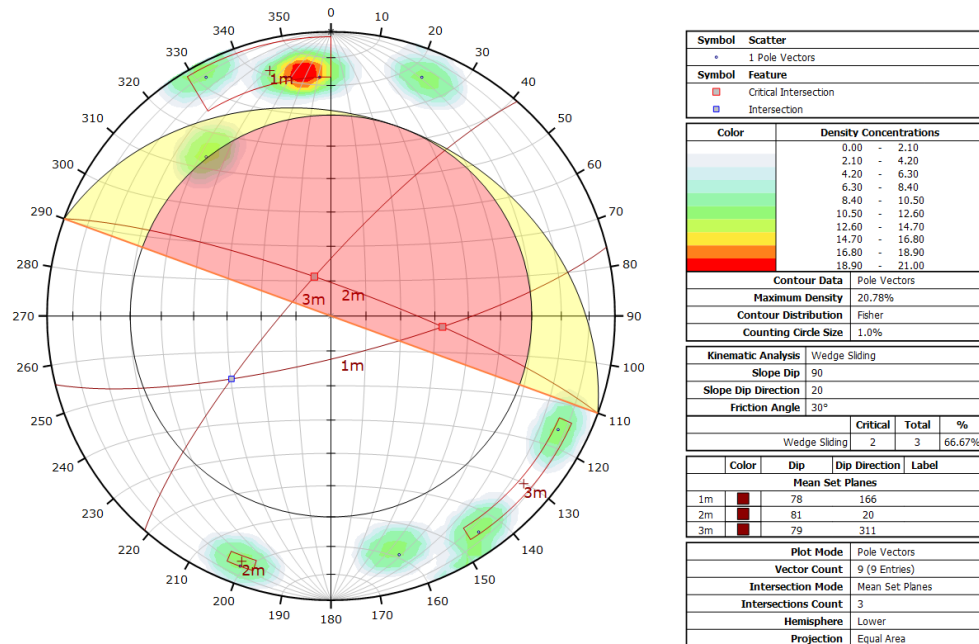
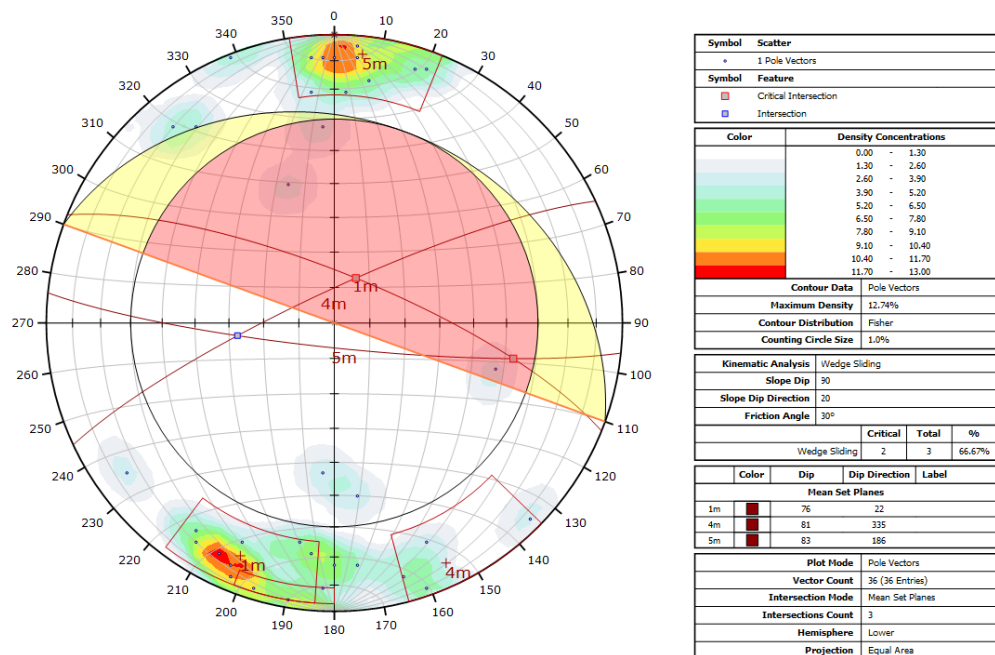


Figura 152

Interpretación estereográfica con SFM estación 11



Se tiene como resultado de este mapeo convencional, una densidad máxima en el plano equiareal de 20.78 y un total de 9 puntos. De la misma manera se obtuvo con la técnica SFM una densidad máxima de 12.74 lo cual indica una

mayor presencia de puntos en la densidad de polos presentes, con un procesamiento total de 36 puntos.

4.1.23 Mapeo de la estación geomecánica N°12

Por último, la 12va estación de control se encuentra a 40m de la estación 11, con dimensión de 1.7x2.5m, teniendo como resultado el siguiente modelamiento 3D.

Figura 153

Referencia fotográfica de la estación 12



Figura 154

Vista lateral derecha de la estación 12



Figura 155

Procesamiento de las 43 imágenes de la estación 12

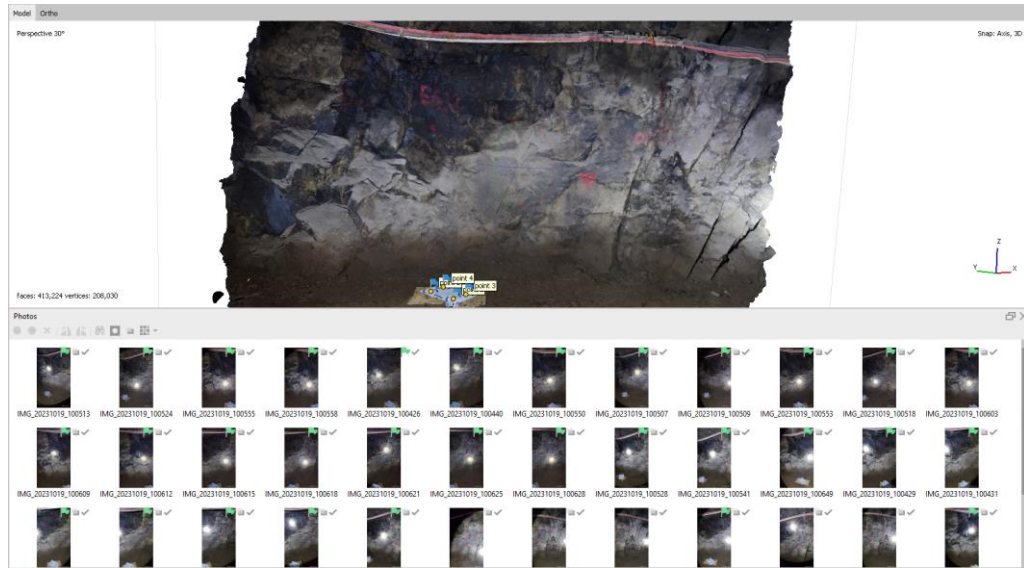


Figura 156

Modelo de texturas de la estación 12

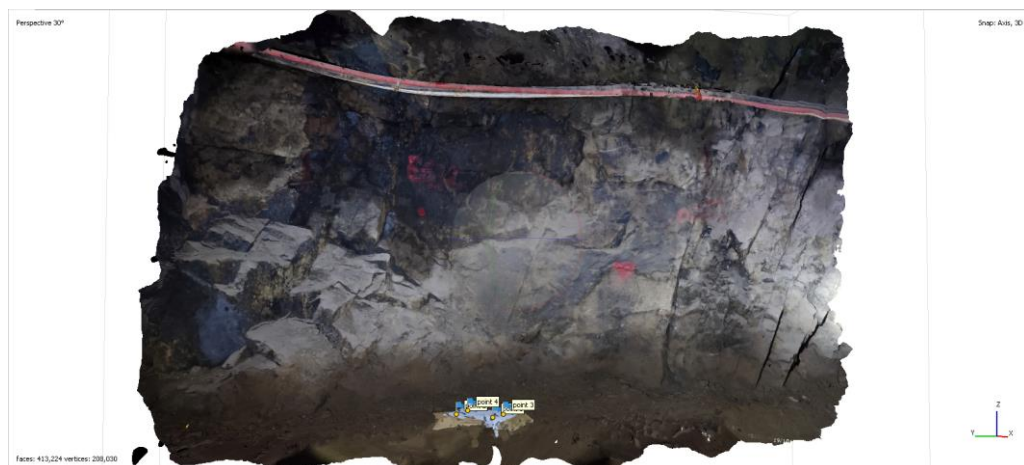


Figura 157

Vista iso der. del modelo de texturas de la estación 12



El resultado del mapeo geomecánico en esta estación es de un RMR'b de 69 siendo ésta considerada entre roca Tipo II B (buena) y un índice Q de 17.4 correspondiente a la clasificación de roca Buena, como se muestra en la siguiente cartilla.

Figura 158
Cartilla de mapeo estación 12

U.M. POMASI		FORMATO DE MAPEO GEOMECANICO POR VENTANAS - RMR, Q Y GSI										AREA GEOMECANICA			Escala 10 metros	
NIVEL:		4970										REALIZADO POR:			21	37
FECHA: 20/03/23		06.22856										RESISTENCIA DE LA ROCA			24	35
FOYD N° 02		60.12 - a 40m de la estación 11										Estudio vertical (σ _v) =			0.027	7h
LABOR Rumbos		BUENO										Roca: Resistencia = 81			28	41
TIPO DE ROCA/LITOLOGIA:		BUENO										UCS = 102			30	45
ESTADO DE LA EXCAVACIÓN:		BUENO										UCS σ _v = 83.447			33	46
OBSERVACIONES: roca fracturada, excavación de 2.51 ancho x 2.2 alto, ventana de 2.3 ancho x 1.70 alto.												Poco compacta			34	47
VERSION: 01		308°-15°										Compactación Intensiva			36	48
FECHA: 08/30/2023												Compactación Alta			36	49
												f (Mpa) =			58	50
												R (Mpa) =			93	48

Coordenadas:		Tipo de estructura:		Orientación:		SISTEMA DE CLASIFICACION RMR														CLASIFICACION RMR		#Frec/ RQD (%)	
A:		E		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
VENTANA/CELDA N°		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
1		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
2		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
3		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
4		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
5		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
6		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
7		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
8		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
9		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
10		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
11		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
12		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
13		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
14		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
15		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
16		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
17		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
18		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
19		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
20		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
21		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
22		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
23		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
24		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
25		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
26		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
27		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
28		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
29		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	
30		D		D		RCS, RSD, RQD, etc.														RMR		RQD (%)	

SISTEMA DE CLASIFICACION Q		Clasificación Q	
RQD %	69.903	Q	17.476
Índice de discontinuidades (j _n)	12	Q	17.476
Índice de rugosidad (j _r)	3	Q	17.476
Índice de alteración (j _a)	1	Q	17.476
Índice de agua subterránea (j _w)	1	Q	17.476
Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional)	1	Q	17.476
INDICE DE RESISTENCIA	GSI = RMR-S = 64.335	Q	17.476

FOTOGRAFIA DE LA ESTACION:

69

66

74

4.1.24 Extracción de discontinuidades principales de la Est. N°12

Los resultados del estereograma del mapeo manual y con la identificación de discontinuidades por el método SFM, a fin de comparar las familias principales con ambos métodos, se presentan a continuación.

Figura 159

Interpretación estereográfica estación 12

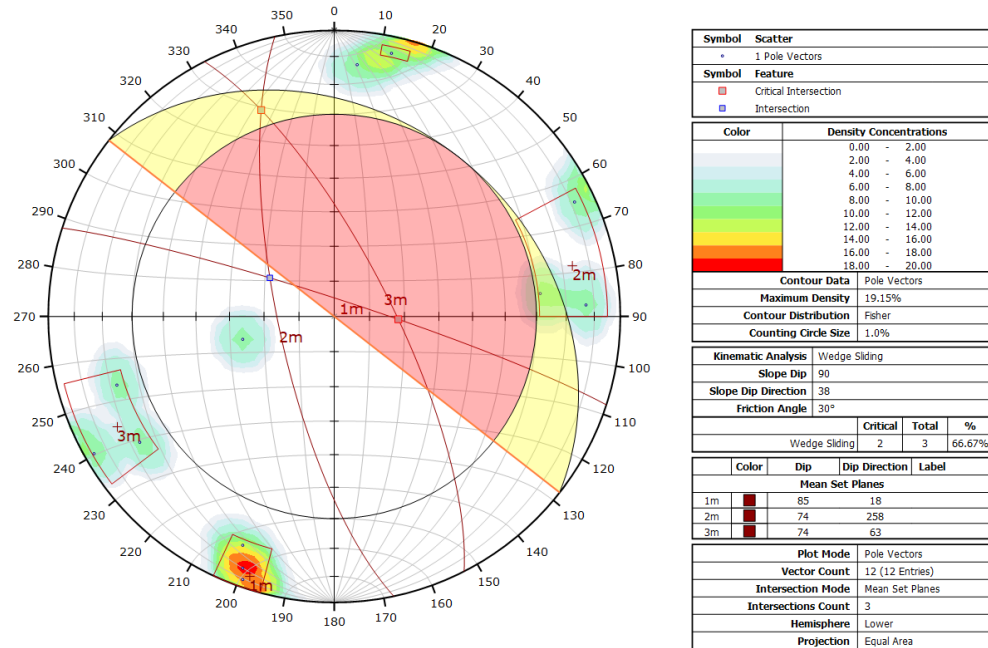
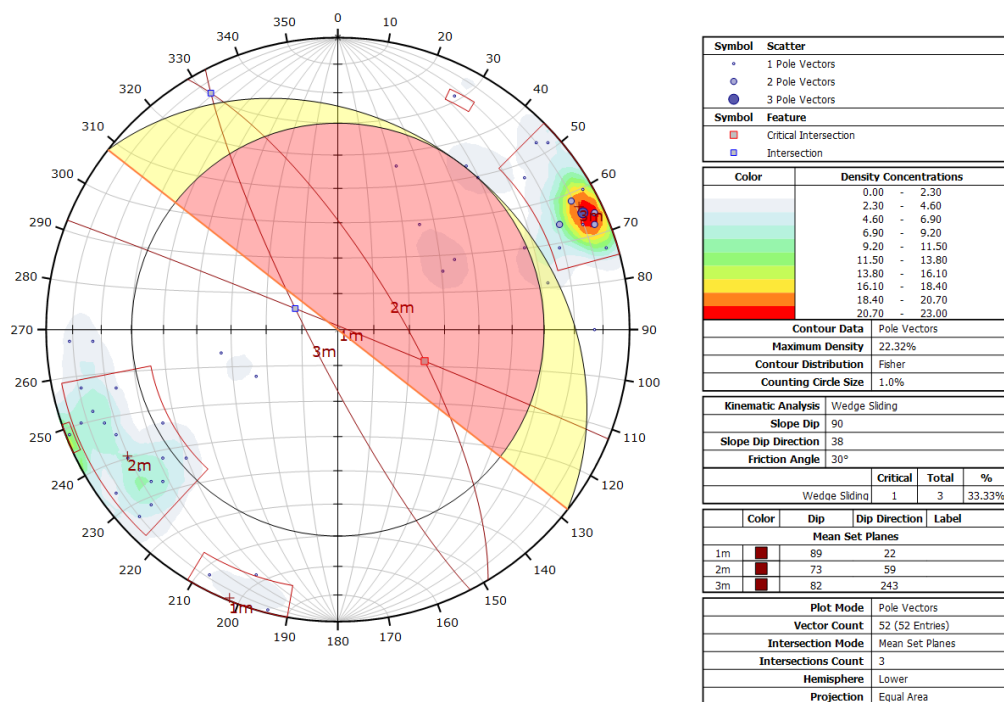


Figura 160

Interpretación estereográfica con SFM estación 12



Se tiene como resultado de este mapeo convencional, una densidad máxima en el plano equiareal de 19.15 y un total de 12 puntos. De la misma

manera se obtuvo con la técnica SFM una densidad máxima de 22.32 lo cual indica una mayor presencia de puntos en la densidad de polos presentes, con un procesamiento total de 52 puntos.

4.1.25 Comparación de los datos obtenidos con ambos métodos

Tabla 9

Extracción de familias de discontinuidades – comparación

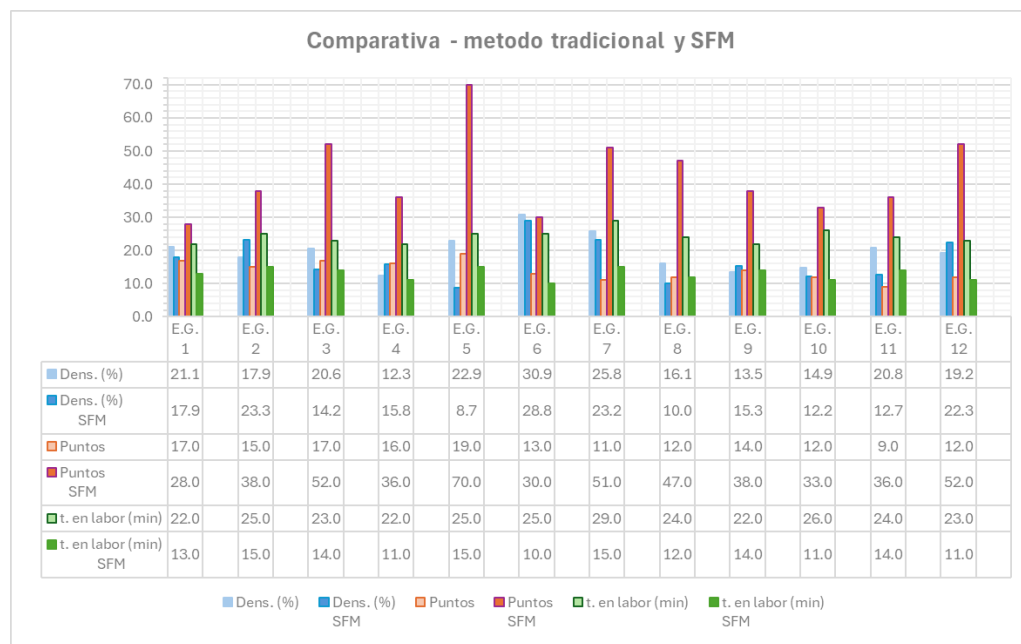
E. G	Mapeo						Mapeo SFM					
	Di p	Dip Dir	Den s. (%)	Pun tos	t. en labor (min)	Cuña s	Di p	Dip Dir	Den s. (%)	Pun tos	t. en labor (min)	Cuñas
1	10	046					73	094				
	65	099	21.1	17.0	22.0	F2:F3	52	347	17.9	28.0	13.0	F2:F3
	69	004					48	299				
2	71	095					89	110				F1:F2
	86	289	17.9	15.0	25.0	F2:F3	81	203	23.3	38.0	15.0	F2:F3
	85	208					73	258				F1:F3
3	67	336					80	347				
	88	353	20.6	17.0	23.0	F1:F2 F1:F3	64	045	14.2	52.0	14.0	F1:F2 F1:F3
	62	051					83	184				
4	66	060					75	212				
	83	200	12.3	16.0	22.0	F2:F3	78	060	15.8	36.0	11.0	F2:F3 F2:F1
	77	247					78	255				
5	42	028					89	298				F1:F2
	87	251	22.9	19.0	25.0	F1:F3	81	083	8.7	70.0	15.0	F1:F3
	85	109					46	021				F2:F3
6	63	193					79	198				
	43	031	30.9	13.0	25.0	F2:F3	57	039	28.8	30.0	10.0	F2:F3
	66	058					62	015				
7	72	051					75	057				
	75	244	25.8	11.0	29.0	F2:F3 F1:F3	83	224	23.2	51.0	15.0	F2:F3 F1:F3
	77	279					80	279				
8	82	360					82	232				
	73	223	16.1	12.0	24.0	F1:F3	85	088	10.0	47.0	12.0	F1:F3
	87	075					89	011				
9	80	251					86	244				
	84	024	13.5	14.0	22.0	F2:F3	85	020	15.3	38.0	14.0	F2:F3
	81	144					72	161				
10	83	279					83	214				
	69	206	14.9	12.0	26.0	No	84	177	12.2	33.0	11.0	No
	85	173					77	280				
11	78	166					76	022				
	81	020	20.8	9.0	24.0	F2:F3 F1:F2	81	335	12.7	36.0	14.0	F2:F3 F1:F2
	79	311					83	186				
12	85	018					89	022				
	74	258	19.2	12.0	23.0	F1:F3	73	059	22.3	52.0	11.0	F1:F3
	74	063					82	243				

Los resultados del análisis cinemático con estereogramas son los presentados en la tabla superior.

Se puede apreciar en la tabla, que los mapeos realizados con la metodología SFM fueron realizados con mayor rapidez en comparación con los realizados manualmente. Las E.G. que tuvieron variación con los resultados fueron las est. 01 y 06, donde según las imágenes estereográficas, se nota una variación que sucede a causa de una familia de discontinuidades que fue interpretada de manera errónea en el mapeo manual, en el cual fue corregido oportunamente con la técnica SFM, llegándose a notar la presencia de cuñas que no pudieron ser vistas sin la técnica adecuada.

Figura 161

Comparativa de densidad, puntos y tiempo de ambos métodos



Por otro lado, se puede apreciar que el tiempo promedio de ejecución del mapeo geomecánico con la metodología tradicional fue de 24.12min con un maximo de 29min y un minimo de 22min, en comparación con el SFM, el cual tuvo un promedio de ejecución de 12.54min con un maximo de 15min y un minimo de 10min.

Tabla 10

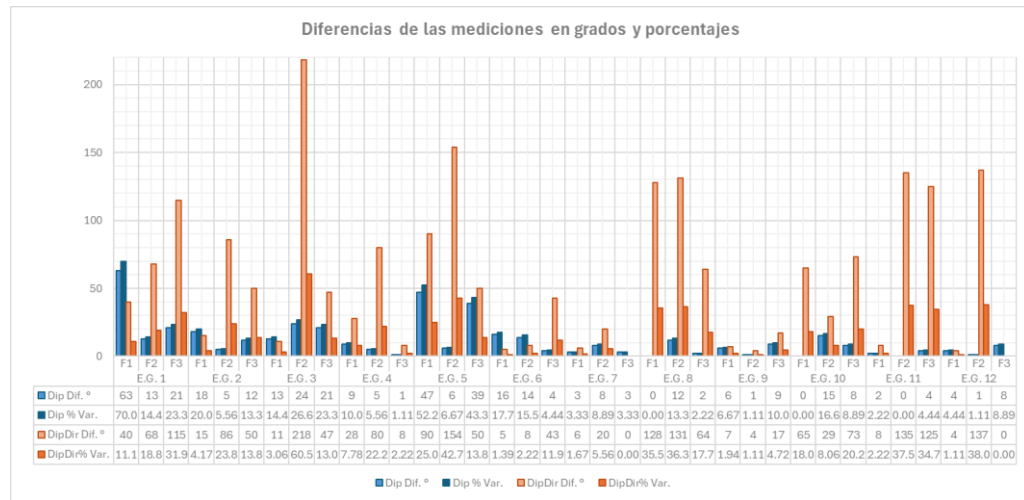
Comparación de variación en grados y porcentajes de las discontinuidades

E.G.	F.	Mapeo		Mapeo SFM		Dip		Dip Dir	
		Dip	Dip Dir	Dip	Dip Dir	Dif. °	% Var.	Dif. °	% Var.
1	F1	10	46	73	94	63	70.00	40	11.11
	F2	65	99	52	347	13	14.44	68	18.89
	F3	69	4	48	299	21	23.33	115	31.94
2	F1	71	95	89	110	18	20.00	15	4.17
	F2	86	289	81	203	5	5.56	86	23.89
	F3	85	208	73	258	12	13.33	50	13.89
3	F1	67	336	80	347	13	14.44	11	3.06
	F2	88	353	64	45	24	26.67	218	60.56
	F3	62	51	83	184	21	23.33	47	13.06
4	F1	66	60	75	212	9	10.00	28	7.78
	F2	83	200	78	60	5	5.56	80	22.22
	F3	77	247	78	255	1	1.11	8	2.22
5	F1	42	28	89	298	47	52.22	90	25.00
	F2	87	251	81	83	6	6.67	154	42.78
	F3	85	109	46	21	39	43.33	50	13.89
6	F1	63	193	79	198	16	17.78	5	1.39
	F2	43	31	57	39	14	15.56	8	2.22
	F3	66	58	62	15	4	4.44	43	11.94
7	F1	72	51	75	57	3	3.33	6	1.67
	F2	75	244	83	224	8	8.89	20	5.56
	F3	77	279	80	279	3	3.33	0	0.00
8	F1	82	360	82	232	0	0.00	128	35.56
	F2	73	223	85	88	12	13.33	131	36.39
	F3	87	75	89	11	2	2.22	64	17.78
9	F1	80	251	86	244	6	6.67	7	1.94
	F2	84	24	85	20	1	1.11	4	1.11
	F3	81	144	72	161	9	10.00	17	4.72
10	F1	83	279	83	214	0	0.00	65	18.06
	F2	69	206	84	177	15	16.67	29	8.06
	F3	85	173	77	280	8	8.89	73	20.28
11	F1	78	166	76	22	2	2.22	8	2.22
	F2	81	20	81	335	0	0.00	135	37.50
	F3	79	311	83	186	4	4.44	125	34.72
12	F1	85	18	89	22	4	4.44	4	1.11
	F2	74	258	73	59	1	1.11	137	38.06
	F3	74	63	82	243	8	8.89	0	0.00

De la tabla se puede notar que la variación máxima en grados en la determinación de Dip fue en la E.G. 01 – F1 con una variación de 63° (Dip) lo cual representa una variación del 70% respecto al estereograma comparado con la técnica SFM. Además, la variación más significativa en el DipDir fue en la E.G. 03 – F2 con una variación de 218° representando el 60.56% respecto al estereograma con la técnica SFM.

Figura 162

Diferencias de las mediciones en grados y porcentajes



Se debe mencionar que la variación promedio en la determinación del Dip en todas las E.G. analizadas es del 12.87% y la determinación del DipDir en todas las E.G. es del 15.96% en total. Siendo estos resultados considerablemente similares realizando ambas metodologías, siendo estos apreciables solo con observar los estereogramas con el análisis cinemático realizado para cada estación geomecánica como se presenta en el apartado de resultados.

4.1.26 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°01

Para la identificación de cuñas en las E.G., se obtuvo los resultados:

Figura 163

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 01 – manual

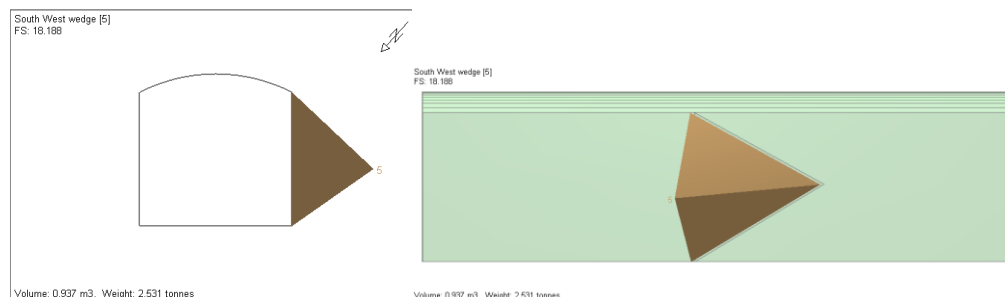
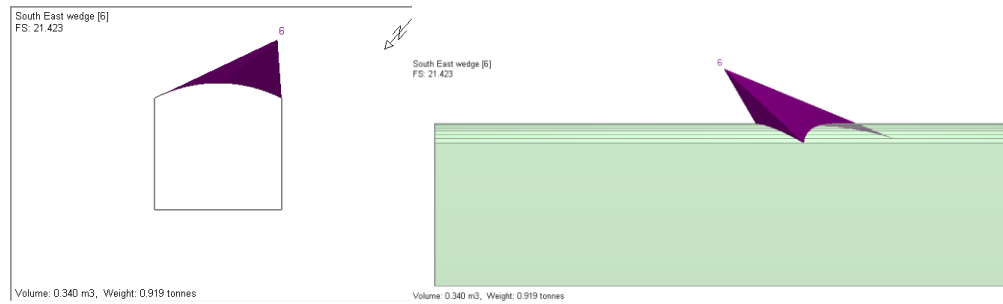


Figura 164

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 01 – SFM



De esta manera se puede apreciar la variación existente entre la ubicación de la cuña encontrada en el software UnWedge y el F.S. respectivamente, conociendo una aproximación del peso y volumen de la cuña en cuestión.

Como resultado de la variación mencionada en párrafos superiores, se puede apreciar que el volumen de la cuña generada es aproximadamente de 0.93m³ con un peso de 2.53 ton considerando los valores más desfavorables; así mismo el F.S. calculado es de 18.18 y con el método SFM es de 21.42, considerando una variación en la orientación de la cuña formada.

4.1.27 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°02

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 165

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 02 – manual

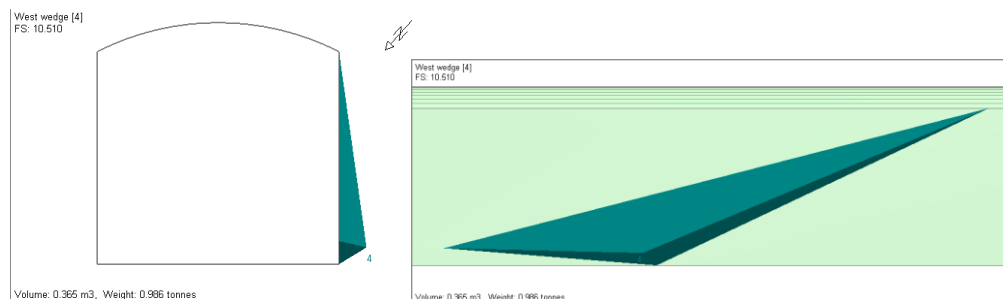
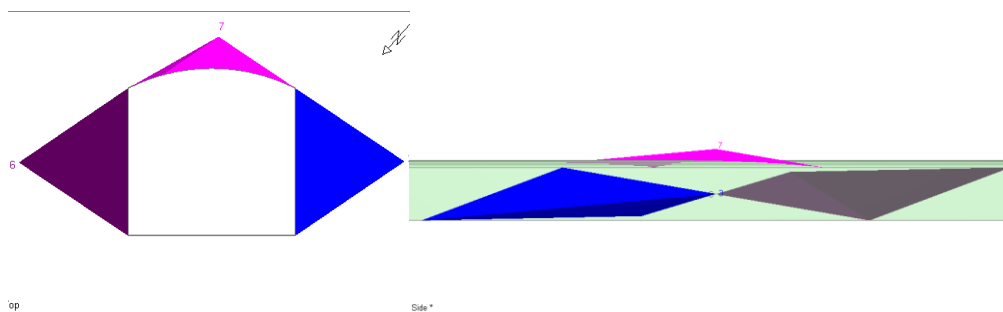


Figura 166

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 02 – SFM



Se puede apreciar que con el mapeo convencional se forma solamente una cuña en esta estación, con un F.S. de 10.5 el cual a primera vista no es de gran volumen, sin embargo, comparándolo con el SFM, se aprecia la formación de dos cuñas con F.S. estable, 8.36 y 25.75 con volúmenes considerables de más de 5m³.

4.1.28 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°03

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 167

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 03 – manual

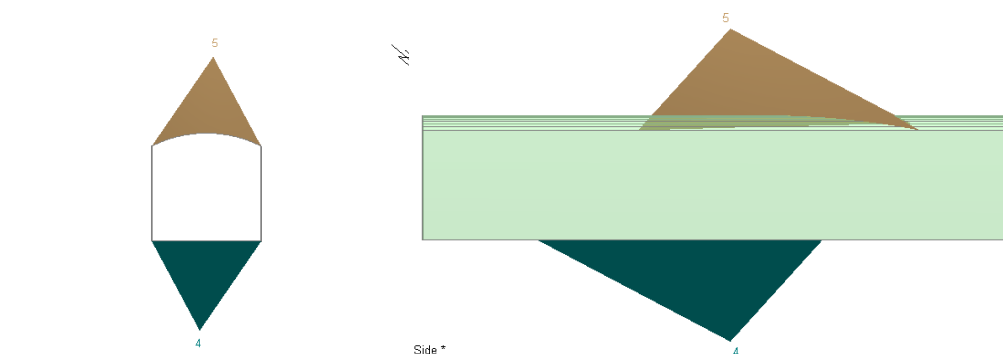
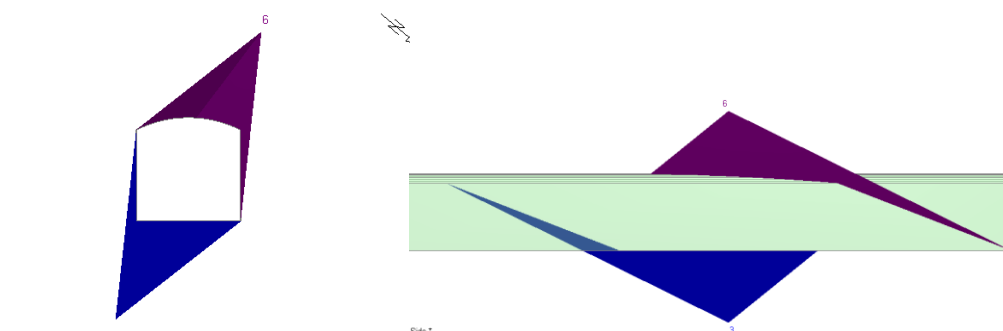


Figura 168

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 03 – SFM



De esta E.G. se aprecia la formación de dos cuñas en ambos métodos, en el primero los F.S. son de 22.14 y 5.58 respectivamente; y en la SFM se presentan F.S. de 18.27 y 12.61 siendo estos desplazados levemente de manera diagonal acorde a los puntos mapeados.

4.1.29 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°04

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 169

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 04 – manual

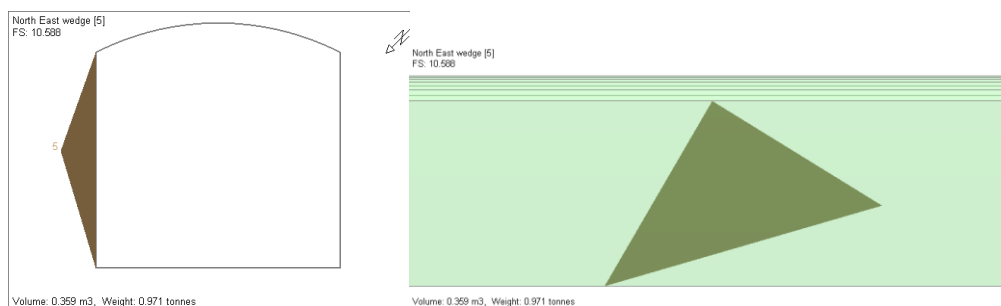
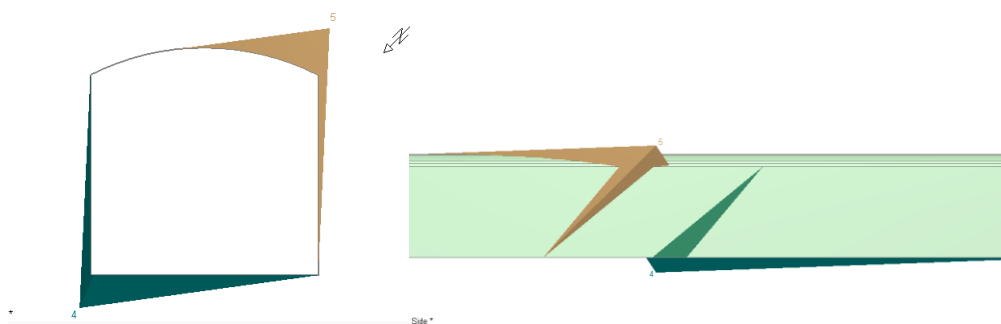


Figura 170

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 04 – SFM



En esta E.G. con el primer método, se tiene la presencia de solo una cuña con un F.S. de 10.58 y con el método SFM se determinaron 2 cuñas considerables con F.S. de 43.16 y 88.52, que son considerados estables, los mismos que con el respectivo desatado de rocas fueron eliminados.

4.1.30 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°05

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 171

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 05 – manual

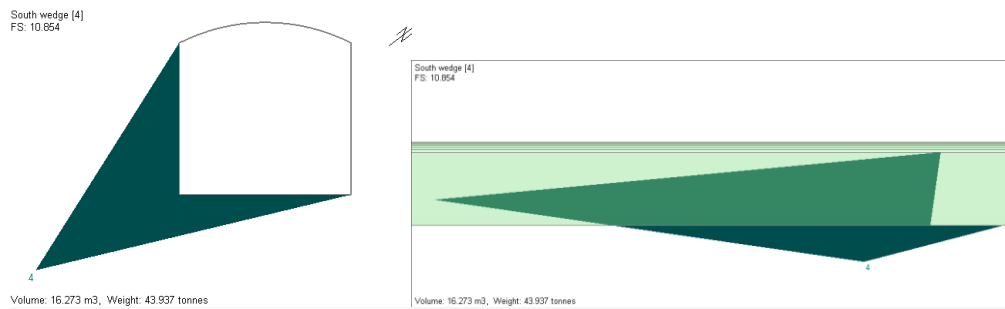
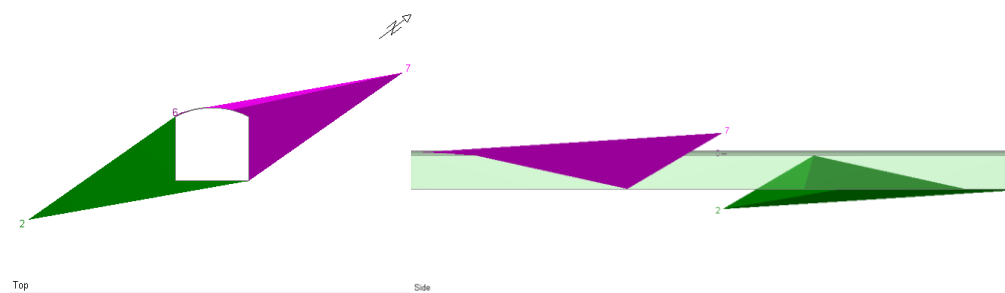


Figura 172

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 05 – SFM



Se aprecia en la imagen superior la presencia de una cuña en el hastial izquierdo que se extiende hasta la corona de la galería, con un F.S. de 10.85; sin embargo, con el método SFM se puede notar la presencia de una cuña extendida en el hastial derecho además del izquierdo previamente mencionado, con F.S. de 12.72 y el otro estable.

4.1.31 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°06

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 173

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 06 – manual

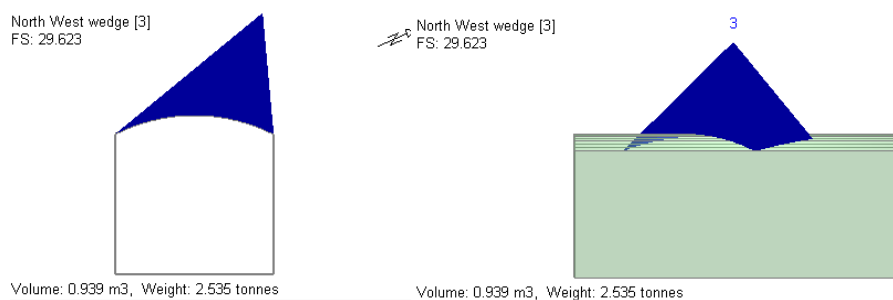
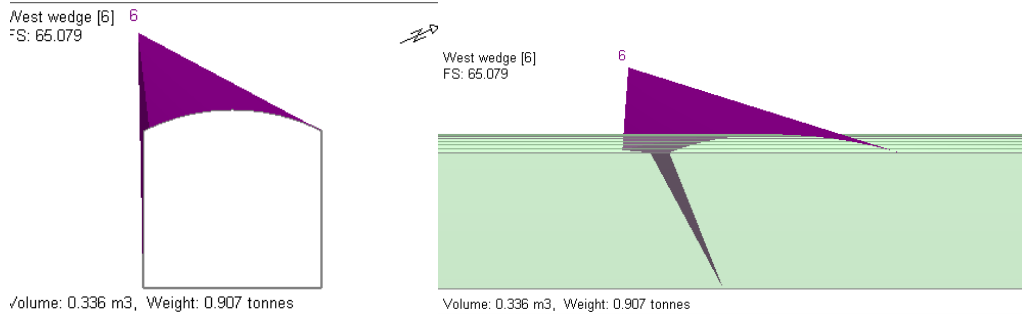


Figura 174

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 06 – SFM



En esta E.G. se nota la presencia de solo una cuña, la cual presenta un F.S. estable de 29.62 en la parte de la corona, con el método SFM la cuña presenta un menor volumen con un F.S. mucho más estable de 65.07.

4.1.32 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°07

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 175

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 07 – manual

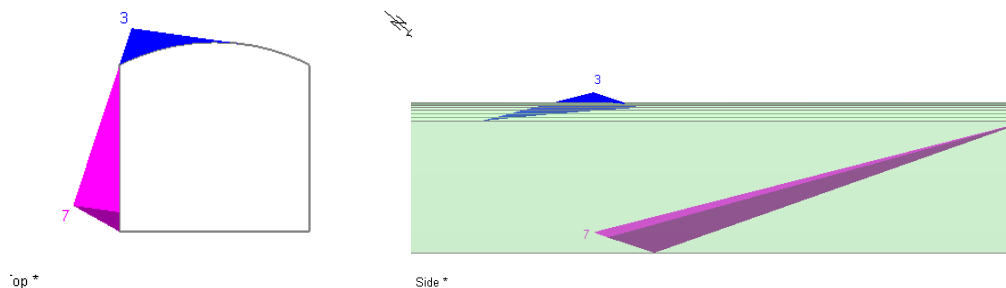
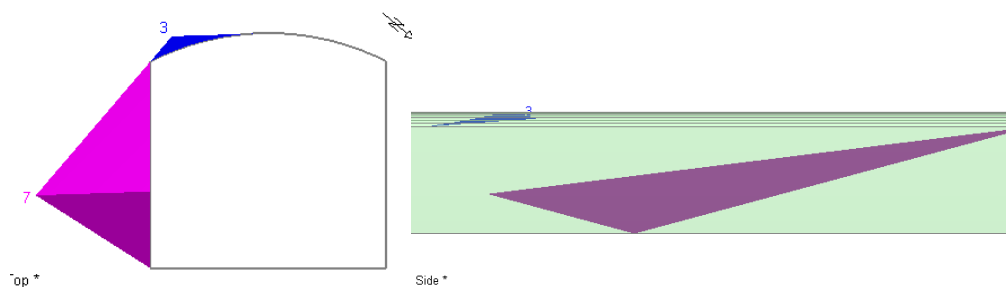


Figura 176

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 07 – SFM



En esta estación, las cuñas se presentan en los mismos lugares en las mismas circunstancias, con F.S. estables de 43.41 y 33.58 respectivamente de la

manera convencional y con SFM los F.S. son de 51.52 y 10.82 respectivamente mostrando un aumento en el volumen de la cuña del hastial derecho.

Se puede apreciar que el volumen de la cuña generada es aproximadamente de 0.93m³ con un peso de 2.53 ton considerando los valores más desfavorables.

4.1.33 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°08

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 177

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 08 – manual

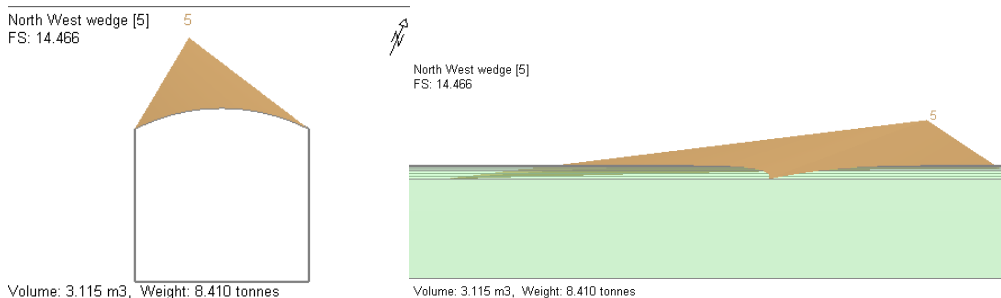
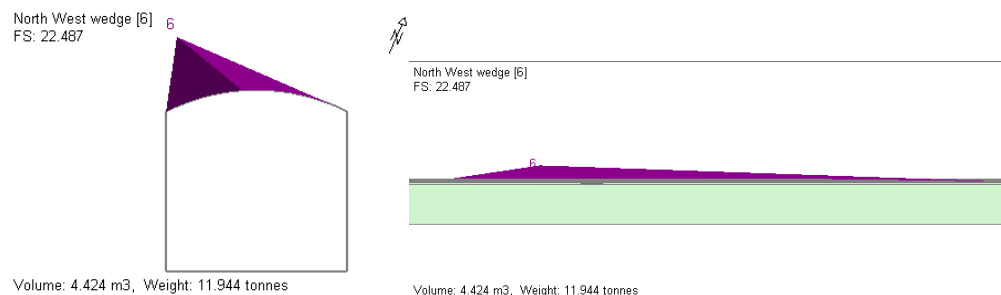


Figura 178

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 08 – SFM



Se nota la presencia de una cuña en la corona de la galería, con un F.S. de 14.46 con el método convencional y con SFM la cuña aumenta su F.S. a 22.48 considerando casi el mismo volumen.

4.1.34 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°09

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 179

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 09 – manual

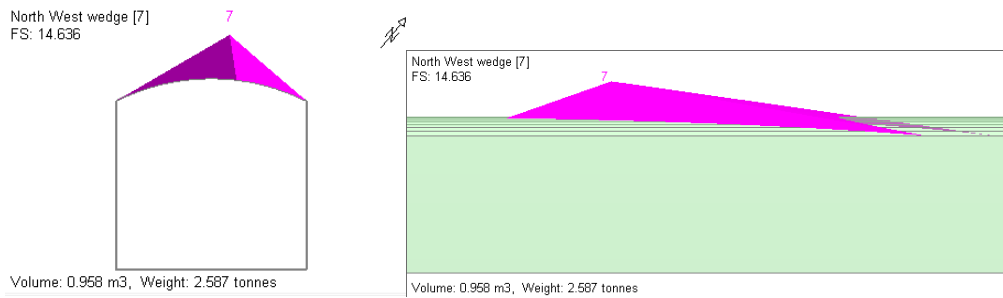
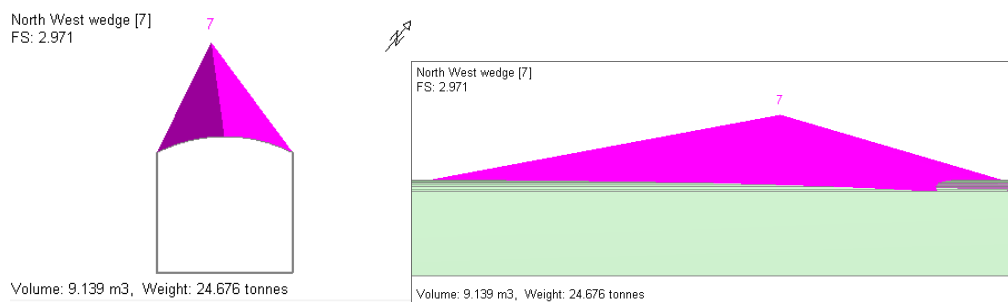


Figura 180

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 09 – SFM



En esta estación se tiene características similares a la anterior, donde la presencia de la cuña se extiende por mayor parte de la corona de la galería, el F.S. fue de 14.63 inicialmente, y con SFM se tiene un mayor volumen en consideración con un F.S. de 9.13.

4.1.35 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°10

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 181

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 10 – manual

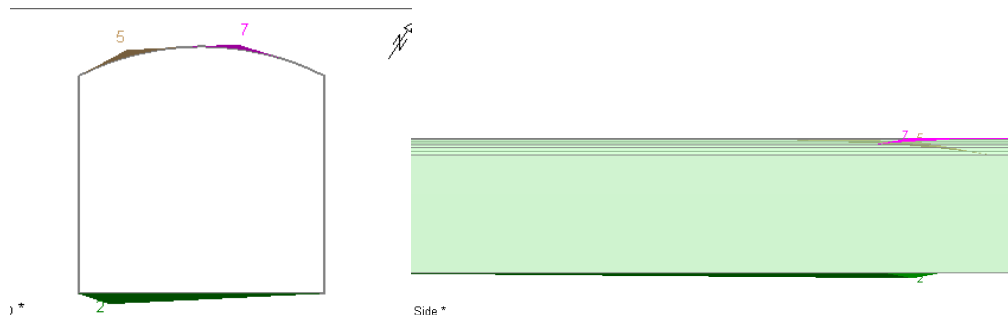
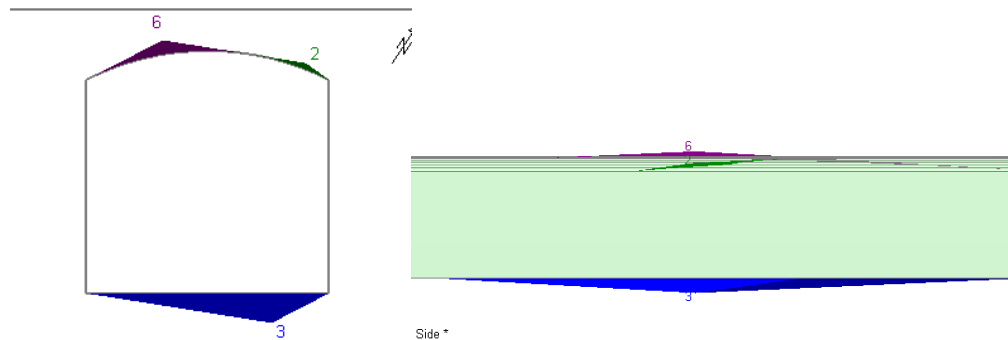


Figura 182

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 10 – SFM



En esta estación, no se notaron la presencia de cuñas considerables con ambas metodologías, las formaciones que se presentaron fueron eliminadas con el control de desate de rocas periódico en la galería.

4.1.36 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°11

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 183

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 11 – manual

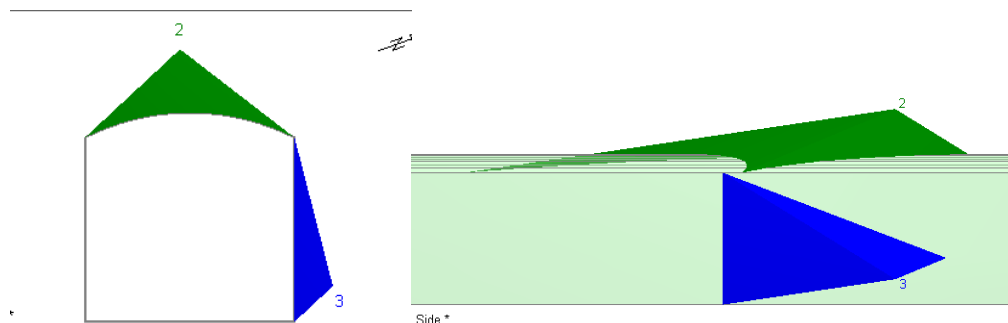
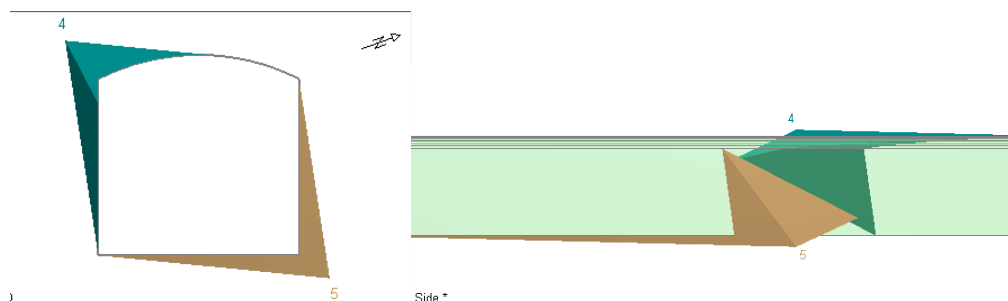


Figura 184

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 11 – SFM



Se nota que las cuñas de la corona y el hastial derecho se encuentran estables con F.S. de 18.72 y 18.9 respectivamente, a comparación del método

SFM con F.S. de 28.1 y 38.81, siendo estas estables con volúmenes menores a 1m³

4.1.37 Análisis de estabilidad de la estación geomecánica N°12

Los resultados obtenidos en esta E.G. son los siguientes:

Figura 185

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 12 – manual

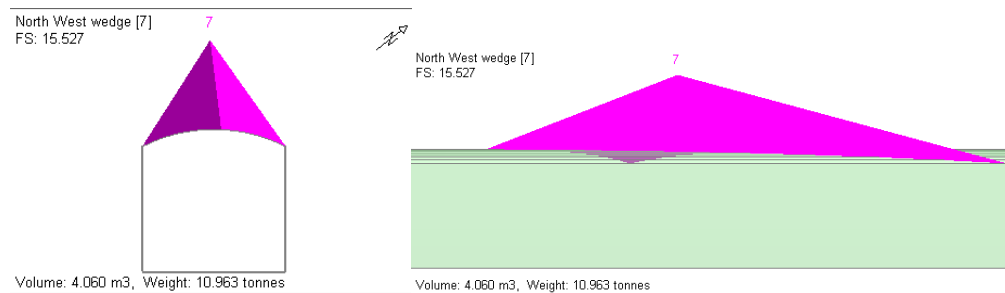
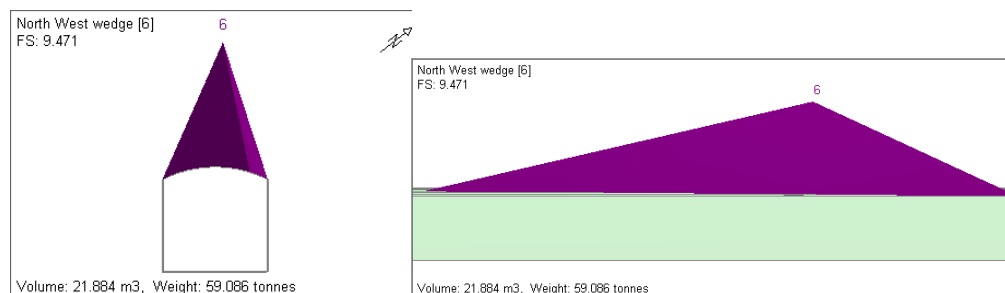


Figura 186

Análisis de estabilidad de las cuñas presentes en la estación 12 – SFM



Por último, en esta estación se tiene solo una cuña presente en la corona de la excavación, la cual con la metodología convencional se nota que su volumen es menor al del real, con 4m³ y un F.S. de 15.52. Por otro lado, con SFM el valor se ajustó al real con un volumen de 21.8m³ y se extiende en gran dimensión por la corona de la galería con un F.S. de 9.47.

4.1.38 Comparación de los F.S. obtenidos con ambos métodos

Los resultados obtenidos luego del análisis cinemático y su posterior cálculo de F.S. de cada E.G. en párrafos anteriores, se resumen en la siguiente tabla; donde se puede apreciar las familias de discontinuidades que interactúan en la generación de las cuñas representativas en cada estación realizadas de manera manual y con SFM:

Tabla 11

Comparación de cuñas con F.S.

E.G.	Mapeo		Mapeo SFM	
	Cuñas	F.S.	Cuñas	F.S.
1	F2:F3	18.188	F2:F3	21.433
2	F2:F3	10.51	F1:F2	Est.
			F2:F3	8.369
			F1:F3	25.754
3	F1:F2	22.143	F1:F2	18.277
	F1:F3	5.588	F1:F3	12.618
4	F2:F3	10.588	F2:F3	43.169
			F2:F1	88.529
5	F1:F3	10.854	F1:F2	12.723
			F1:F3	129.388
			F2:F3	Est.
6	F2:F3	29.623	F2:F3	65.079
7	F2:F3	43.41	F2:F3	51.525
	F1:F3	33.587	F1:F3	10.824
8	F1:F3	14.466	F1:F3	22.487
9	F2:F3	14.636	F2:F3	2.971
10	No	-	No	-
11	F2:F3	18.725	F2:F3	28.101
	F1:F2	18.901	F1:F2	38.814
12	F1:F3	15.527	F1:F3	21.884

De la tabla mostrada se puede deducir que con la metodología SFM se pueden identificar más fácilmente las cuñas presentadas que no se apreciaron a simple vista en el terreno al momento de realizar el mapeo geomecánico, como en el caso de las E.G. 02, 04 y 05 donde se identificaron cuñas extra acorde al análisis cinemático, que no fueron identificadas con la metodología convencional. Considerando también que siendo preferible tomar en cuenta las peores condiciones de un terreno, fue preferible utilizar la data con las mayores cuñas encontradas.

Se puede notar que el F.S. sufre un ajuste en su cálculo, sin embargo, considerando que las cuñas analizadas se encuentran en los mismos lugares en ambos métodos y que con el SFM se tiene una mayor cantidad de planos analizados, los datos resultantes más confiables son los de los realizados con fotogrametría, obviamente considerando los datos específicos del terreno que se pudieron observar al momento de tomar las fotografías y hacer el mapeo manual.

4.2 Discusión

Se determinó que la caracterización del macizo puede darse por varios parámetros como los del RMR de Bieniawski, donde la medición de la orientación de discontinuidades tradicionalmente se realiza con la utilización de una brújula. Se probó también que las técnicas de escaneo partiendo de la fotogrametría permiten la determinación de la orientación de las discontinuidades (Dip_DipDir). Esta técnica de medición (SFM) en la presente investigación probó un error máximo de 12.87% y 15.96% en las mediciones de Dip y Dip Dir respectivamente, así como también una exactitud similar con el método tradicional. Así mismo los autores Karsli et al. (2024); Riquelme et al. (2017); Roberto et al. (2017) mencionan que la generación de nubes de puntos 3D obtenidas a partir de SFM y escaneo laser 3D permite realizar una extracción de orientaciones con un error de ajuste inferior a 3mm en macizos superficiales. Apoyando el argumento de que la generación de nubes de puntos muestra una correlación cuasi exacta en superficies ortogonales a la línea de visión del operador; y sobre la utilización de nubes de puntos LiDAR utilizando un enfoque de Octree precisan resultados superiores al 90% en exactitud.

Poniendo en comparación los resultados obtenidos entre ambas metodologías, se demostró que, el SFM ofrece mucha más información gracias a su generación de nubes de puntos y su cobertura en la densidad generada y gracias a la triangulación generada con dicha densidad, sin embargo las limitaciones o dificultades encontradas en la realización de esta técnica en macizos superficiales o subterráneos son las superficies reflectantes y la capacidad de refracción en elementos con poca iluminación, siendo esto argumentado también por los autores Fernández (2021); Saiz (2022) que analizaron también este método apoyando lo argumentado y añadiendo que el método aplicado en corto alcance con cámaras fotográficas no métricas solo permite la generación de puntos con un solapamiento de pares y puntos de control adecuados, siendo estos resultados no aceptables para utilidades como las requeridas en minería subterránea ya que la representatividad, precisión y distancias varían significativamente. En tal sentido, se concuerda también con Wroblewski et al (2024) y también los autores Gharehdash et al (2024) en que para la realización de mapeos con fotogrametría móvil lo recomendable es la utilización de cámaras profesionales a fin de minimizar los errores de ajuste, suavizar ángulos y vértices de la triangulación de los modelamientos.

CONCLUSIONES

PRIMERO: Se concluye que los mapeos realizados con la metodología tradicional tuvieron un tiempo de ejecución prom. de 24.12min, siendo el tiempo máx. de realización del mapeo en una E.G. de 29min, en comparación con el método structure from motion, en el cual el tiempo de ejecución promedio fue de 12.54min, siendo el tiempo máx. de realización del mapeo en una E.G. de 15min., demostrando que la metodología de mapeo structure from motion fue la de mayor rapidez. A la vez, en la exactitud del mapeo de cada estación, se determinó que con el SFM se puede realizar la medición de una mayor cantidad de puntos de orientación en Dip_DipDir, lo cual brindó la posibilidad de poder realizar un ajuste en la promediación de la densidad de puntos generados en el software Dips, teniendo datos más ajustados a la realidad del terreno, incluso al tener la posibilidad de conocer exactamente que orientaciones fueron consideradas, se pudo realizar el ajuste necesario a fin de minimizar los errores presentados.

SEGUNDO: Se concluye que la caracterización realizada, al ser un ajuste del mapeo tradicional, brindó también la posibilidad de poder ser utilizada en el cálculo del factor de seguridad (F.S.) en los diferentes tipos de falla presentes con una mayor exactitud e incluso pudiendo identificar la presencia de planos de falla y cuñas que no se encontraban visibles en las zonas críticas en los análisis cinemáticos de cada estación geomecánica realizada. La utilización de SFM en la realización de mapeos geomecánicos, logró mejorar la comprensión de la caracterización del macizo rocoso debido al modelamiento tridimensional; sin embargo, se encontró también un margen de inexactitud en esta metodología, que afectó específicamente y solo en planos o superficies subhorizontales o plegamientos de superficie flexural debido a la curvatura oblicua presente en dichas superficies.

RECOMENDACIONES

- PRIMERO:** Se recomienda continuar con la investigación de la utilización de esta técnica, con la finalidad de poder perfeccionar la metodología de realización y poder compartir su utilización en diferentes unidades; ya que puede ser beneficioso para la creación de numerosos modelamientos tridimensionales que representen la realidad a escala de los macizos en interior mina; y al ser de muy bajo costo, tiene la posibilidad de ser implementado en diferentes unidades mineras, además de representar un mejor control en la realización de cálculos de estabilidad en excavaciones subterráneas.
- SEGUNDO:** Se recomienda continuar con la investigación de la combinación de la técnica fotogramétrica con el escaneo laser de secciones a fin de crear conjuntos de datos mejor tratables en combinación, el cual brindarían un mayor potencial en la extracción de información en la caracterización de macizos rocosos. De ser posible una automatización de la misma magnitud que la de teledetección remota, en la técnica SFM tendría resultados de mayor beneficio en la práctica a fin de tener mejores resultados debido a la generación de nubes de puntos, manteniendo los mismos costos bajos; resultados con el nivel combinado de estas metodologías permitirían un mejor cálculo del F.S. de las estaciones geomecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aerosar. (2024, enero). *Fotogrametría y teledetección*.
https://aerosar.es/modelos_digitales/
- Alvarado Valdés, F. (2020). *Modelamiento geoestadístico de la clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)* [Universidad de Chile].
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176858>
- An, P., Yong, R., Song, J., Du, S., Wang, C., Xu, H., Fang, K., & Tong, S. (2024). Exploring the potential of smartphone photogrammetry for field measurement of joint roughness. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114055>
- Apaza Chino, J. (2023). *Análisis estadístico de los accidentes mortales en la minería peruana para mejorar la implementación de procedimientos de gestión y prevención de riesgos (2010 - 2021)* [Universidad Nacional del Altiplano].
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19449>
- Belandria, N., & Bongiorno, F. (2022). *Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Hoek y Brown y Romana*.
<https://www.academia.edu/17400474>
- Bieniawski, Z. T. (1978). Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories. En • *Int. J. Rdck Mech. Min. Sci. & Geomech, Abstr* (Vol. 15). Pergamon Press. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90956-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90956-7)
- Bustamante Vilca, D. A. (2022). *Optimización de levantamientos topográficos aplicado a stocks de mineral mediante uso de fotogrametría con dron Phantom 4 en una mina superficial de hierro en la costa sur del Perú* [Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/11978>
- Cai, M., Kaiser, P. K., Uno, H., Tasaka, Y., & Minami, M. (2004). Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), 3-19. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00025-X)

- Carrillo Cuesta, J. (2022). *Fotogrametría submarina para la caracterización de ecosistemas - Aplicación al fondo marino de Punta de Antequera (Tenerife)* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/70548/>
- Castro Díaz, J. H., & Pflura Monterola, E. (2020). *Uso del Drone como alternativa para reducir el tiempo de levantamiento topográfico en minería* [Universidad Tecnológica del Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/4545>
- Chen, Y., & Medioni, G. (1992). *Object modelling by registration of multiple range images*. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(92\)90066-C](https://doi.org/10.1016/0262-8856(92)90066-C)
- Custodio Melendez, K. A. (2022). *Aplicación de la fotogrametría con RPA para ubicar los pozos construidos en la margen izquierda de la desembocadura del Río Pisco* [Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/33516>
- De Matías Bejarano, J. (2013). *Técnicas de fotogrametría y visión por computador para el modelado 3D de estructuras geomorfológicas dinámicas* [Universidad de Extremadura]. <http://hdl.handle.net/10662/539>
- De Matías, J., De Sanjosé, J. J., López-Nicolás, G., Sagüés, C., & Guerrero, J. J. (2009). Photogrammetric methodology for the production of Geomorphologic maps: Application to the Veleta Rock Glacier (Sierra Nevada, Granada, Spain). *Remote Sensing*, 1(4), 829-841. <https://doi.org/10.3390/rs1040829>
- Díaz Sotomayor, M. G. (2019). *Aplicación de fotogrametría y termografía aérea como herramientas para la gestión de un tramo de río* [Universidad de Concepción]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/1154>
- Douglas, A., Langenderfer, M., & Johnson, C. (2024). Road Condition Monitoring Utilizing UAV Photogrammetry Aligned to Principal Curve of Mine Haul Truck Path. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 41(1), 61-72. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00877-0>
- D.S. N° 023-2017-EM, Modificatoria del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional , República del Perú (2017). <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1555418-2>

- D.S. N° 024-2016-EM, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, República del Perú (2016). <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/741887-024-2016-em>
- Espejo Arco, M. (2018). *Evaluación de Structure from Motion en el levantamiento de piezas industriales simples* [Universidad de Sevilla]. <https://hdl.handle.net/11441/84960>
- Estruch Serra, M., & Tapia Gómez, A. (2003). *Topografía subterránea para minería y obras: Vol. I*. Ediciones UPC. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788476539637>
- Fernández Rivera, D. E. (2021). *Mapeo geotécnico en base a fotogrametría con drones y estaciones robóticas* [Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://hdl.handle.net/11673/50662>
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 421-430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>
- García Anchundia, M. I. (2020). *Estudio geomecánico aplicando fotogrametría para la determinación de la calidad del macizo rocoso en las canteras Uruzca, Cerro Guayabal, Cantón Montecristi, provincia de Manabí, Ecuador* [Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/49998>
- Geoinnova. (2024). *Configuración de cámara fotogramétrica*. <https://geoinnova.org/>
- Gharehdash, S., Shelyag, S., & Costa, S. (2024). Particle morphology characterization of waste-tyre-stabilized rock aggregates via computational geometric modellings. *Powder Technology*, 433. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119187>
- Gläßer, C., & Seyfert, E. (2024). Analog photogrammetry for terrestrial thematic applications in selected spectral ranges | Die analoge Photogrammetrie für terrestrische thematische Anwendungen in ausgewählten Spektralbereichen. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 92(1), 75-92. <https://doi.org/10.1007/s41064-024-00274-2>

- Hoek, E., & Brown, E. T. (1985). *Excavaciones subterráneas en roca*. Mc Graw-Hill.
<https://www.academia.edu/31948813>
- Hoek, E., Marinos, V., & Marinos, P. (2005). The geological strength index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), 55-65. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0270-5>
- Hu, H., Tan, Q., Kang, R., Wu, Y., Liu, H., & Wang, B. (2024). Building extraction from oblique photogrammetry point clouds based on PointNet++ with attention mechanism. *Photogrammetric Record*, 39(185), 141-156. <https://doi.org/10.1111/phor.12476>
- I.G.N. (2023). *Mapa Político 2M - Perú*.
<https://www.idep.gob.pe/geovisor/VisorDeMapas/>
- James, M. R., & Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(3). <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Jordá Bordehore, L., Tomás Jover, R., Arlandi Rodríguez, M., & Abellán Fernández, A. (2016). *Manual de estaciones geomecánicas descripción de macizos rocosos en afloramientos* (1.^a ed.). Universidad Politécnica de Madrid. <https://www.researchgate.net/publication/315798937>
- Karsli, B., Yilmazturk, F., Bahadir, M., Karsli, F., & Ozdemir, E. (2024). Automatic building footprint extraction from photogrammetric and LiDAR point clouds using a novel improved-Octree approach. *Journal of Building Engineering*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108281>
- Llena, M., Vericat, D., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2017). Aplicación de algoritmos Structure from Motion (SfM) para el análisis histórico de cambios en la geomorfología fluvial. *Cuaternario y Geomorfología*, 31(3-4), 7-26. <https://doi.org/10.17735/cyg.v31i3-4.55240>
- Lucieer, A., Jong, S. M. de, & Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV

- photography. *Progress in Physical Geography*, 38(1), 97-116.
<https://doi.org/10.1177/0309133313515293>
- MAPTEK. (2023). *Sistema de monitoreo geotécnico y táctico de estabilidad de taludes, labores subterráneas y tranques de relaves*.
<https://www.maptek.com/video/sistema-de-monitoreo-geotecnico-y-tactico-de-estabilidad-de-taludes-labores-subterraneas-y-tranques-de-relaves/>
- Matías Ayma, R. F. (2020). *Aplicación de un dron para mejorar los procesos productivos en Minera Chinalco Perú S. A., Morococha 2020* [Universidad Continental].
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8698>
- Mattie, N. (2020, julio). *Fotogrametría Satelital: Una alternativa tecnológica para el desarrollo de Latinoamérica?*
<https://www.linkedin.com/pulse/fotogrametr%C3%ADa-satelital-una-alternativa-tecnol%C3%B3gica-para-mattie/?originalSubdomain=es>
- McAnuff, C., Samson, C., Melanson, D., Polowick, C., & Bethell, E. (2019). Structural mapping of rock walls imaged with a lidar mounted on an unmanned aircraft system. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(1), 21-38.
<https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0015>
- Melo Ramírez, A. P., & Castellanos Hernández, A. C. (2022). *Generación de un modelo tridimensional de un talud rocoso para un sector de Bogotá a partir de fotografías tomadas con teléfono inteligente* [Universidad Católica de Colombia].
<https://hdl.handle.net/10983/30501>
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *British Society for Geomorphology Geomorphological Techniques*, 2(2). www.photosynth.net
- MINEM. (2020). *Perú: País Minero*. Ministerio de Energía y Minas.
https://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149&idCateg=159#:~:text=Destacados de la Industria Minera,de depósitos minerales del mundo.

- NASA ARSET. (2020). *Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota) NASA ARSET*. https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-02/Fundamentals_of_RS_Span.pdf
- Nauticexpo. (2023). *Submarinos de intervención ROV*. <https://www.nauticexpo.es/prod/boxfish-research/product-195482-535468.html>
- Neria Alvarez, H. H. (2010). *Fotogrametría Satelital* [Instituto Politecnico Nacional]. <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/6350/1/FOTOGRAMET.pdf>
- Ocsa Mellado, M., & Barreda Yabar, R. V. (2022). *Aplicación de drone para elaborar modelos digitales en frente de minado, Unidad Minera Las Bambas* [Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12090>
- Oppikofer, T., Bunkholt, H. S. S., Fischer, L., Saintot, A., Hermanns, R. L., Carrea, D., Longchamp, C., Derron, M.-H., Michoud, C., & Jaboyedoff, M. (2012). Investigación and monitoring of rock slope instabilities in Norway by terrestrial laser scanning. *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through*, 1-7. <https://www.researchgate.net/publication/257289801>
- Pacheco Arotinco, C. L., & Poon, C. (2016). Determinación de sistemas de discontinuidades mediante mapeo por fotogrametría en proyectos de tajo abierto. *Sociedad geológica del Perú, XVIII*, 1-4. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG18-42.pdf>
- Paucar Hinojosa, A. (2019). *Aplicación de fotogrametría digital de objeto cercano en infraestructura mina, proyecto minero Las Bambas-Apurímac* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/5088>
- Pérez Álvarez, J. A. (2009). *Estimación de los parámetros internos de sensores utilizados en cámaras digitales de resolución media y alta mediante modelización de técnicas fotogramétricas* [Universidad de Extremadura]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=200764>
- Pimienta, J., & De La Orden, A. (2017). *Metodología de la investigación* (3.^a ed., Vol. 3). Pearson Hispanoamérica. <http://repositorio.uasb.edu.bo/handle/54000/1268>



- Redondo Herrero, J. (2012). *Desarrollo de Software fotogramétrico para la elaboración de modelos digitales de elevaciones de alta resolución a partir de múltiples tomas convergentes* [Universidad de Salamanca]. <http://hdl.handle.net/10366/118511>
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., & Abellán, A. (2017). Identification of rock slope discontinuity sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: a comparative analysis. *ScienceDirect - Procedia Engineering*, 191, 838-845. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.251>
- Roberto Tomás, Adrian Riquelme, M. C., Antonio Abellán, & Luis Jordá. (2017). *Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos*. 1-7. <https://www.researchgate.net/publication/309611177>
- Ruiz Ortiz, V. (2019). *Contribución de la fotogrametría y de la modelización numérica a la gestión conjunta agua superficial/subterránea. aplicación a cuencas de la provincia de Cádiz* [Universidad de Cádiz]. <http://hdl.handle.net/10498/21269>
- Saiz Oslé, C. (2022). *Aplicación de técnicas de modelización 3D de bajo coste al patrimonio geológico y minero* [Universidad de Cantabria]. <http://hdl.handle.net/10902/25422>
- Salas Alvarado, L. A. (2013). *Geomecánica básica: fundamentos* (1.^a ed.). <https://editorial.ucr.ac.cr/ingenieria/item/1922-geomecanica-basica-fundamentos-sobre-mecanica-de-suelos.html>
- Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. <http://repositorio.uasb.edu.bo/handle/54000/1292>
- Sánchez García, M. (2017). *Uso y aplicaciones de drones en minería* [Universidad Central de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2117/112714>
- Santamaría Peña, J., & Sanz Méndez, T. (2011). *Fundamentos de fotogrametría*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/492591.pdf>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). «Structure-from-Motion» photogrammetry: A low-cost, effective tool for



geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Wingtra. (2024, enero). *Drones de mapeo para fotogrametría*. <https://wingtra.com/es/>

Wroblewski, A., Kujawa, P., Wodecki, J., & Ziętek, B. (2024). Design of structured meshes of mining excavations based on variability trends of real point clouds from laser scanning for numerical airflow modeling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1295(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1295/1/012006>

Zhu, H., Bi, G., & Jiang, X. (2024). Application of the UAV Photogrammetry to Monitor the Progressive Surface Subsidence with a Time-Dependent Model. *Indian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-00955-0>

Zhu, X., Yang, H., Bian, H., Mei, Y., Zhang, B., & Xue, P. (2023). Multi-Scalar Oblique Photogrammetry-Supported 3D webGIS Approach to Preventive Mining-Induced Deformation Analysis. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/app132413342>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

IMPLEMENTACIÓN DE STRUCTURE FROM MOTION EN MINERÍA SUBTERRÁNEA PARA MEJORAR EL PROCESO DE MAPEOS GEOMECÁNICOS Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – UNIDAD MINERA POMASI – CIEMSA

Problemas	Objetivos	Hipótesis	VARIABLES	Dimensiones	Indicadores	Definición operacional
PG. ¿Cuál es el efecto de la implementación de structure from motion en minería subterránea para mejorar el proceso de mapeos geomecánicos en la U.M. Pomasi - CIEMSA?	OG. Mejorar el proceso de mapeos geomecánicos en minería subterránea implementando structure from motion en la U.M. Pomasi - CIEMSA.	HG. La implementación de structure from motion en minería subterránea mejora el proceso de mapeos geomecánicos en la U.M. Pomasi - CIEMSA.	VI. Implementación de estructura from Motion.	Parámetros de la toma de datos en campo.	Tiempo de ejecución de la toma de datos.	Metodología: Enfoque: Cuantitativo Nivel/Alicance: Exploratorio - Correlacional Diseño: No experimental - descriptivo Método: Hipotético - Deductivo Est. Comparativa:
PE 1. ¿Cuál es la influencia de la fotogrametría en la exactitud y celeridad en el proceso de mapeo geomecánico subterráneo en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA?	OE 1. Demostrar que la fotogrametría brinda mayor exactitud y celeridad en el proceso de mapeo geomecánico subterráneo en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA.	HE 1. Las técnicas fotogramétricas brindan mayor exactitud y celeridad en el proceso de mapeo geomecánico subterráneo en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA.	VD. Mejoramiento del proceso de mapeos geomecánicos en exactitud y la realización de mapeos geomecánicos.	Exactitud y la realización de mapeos geomecánicos.	Similitud al terreno en 3D.	Enfoque: Cuantitativo Nivel/Alicance: Exploratorio - Correlacional Diseño: No experimental - descriptivo Método: Hipotético - Deductivo Est. Comparativa:
PE 2. ¿De qué manera se utiliza el sistema structure from motion para mejorar la caracterización geomecánica en 3D para realizar un mejor análisis de estabilidad en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA?	OE 2. Demostrar cómo se utiliza el sistema structure from motion para mejorar la caracterización geomecánica en 3D para realizar un mejor análisis de estabilidad en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA.	HE 2. La utilización del sistema structure from motion permite mejorar la caracterización geomecánica en 3D para realizar un mejor análisis de estabilidad en las labores de la U.M. Pomasi – CIEMSA.	Realización de un análisis de estabilidad con los datos de cada mapeo geomecánico manual y con fotogrametría.	Análisis comparativo de la realización de mapeo sin y con el método SFM.	Estadística comparativa.	Análisis comparativo de datos con y sin SFM para la realización de un adecuado análisis de estabilidad con software geomecánico.

Anexo 2. Implementos y herramientas necesarias para realizar los mapeos



Anexo 3. Medición de dirección de buzamiento de discontinuidades y plano de control



Anexo 4. Medición del buzamiento de discontinuidades y punto de control



Anexo 5. Medición de la orientación de la galería



**Anexo 6. Direccionamiento de los puntos de control para toma de imágenes de las
E.G.**



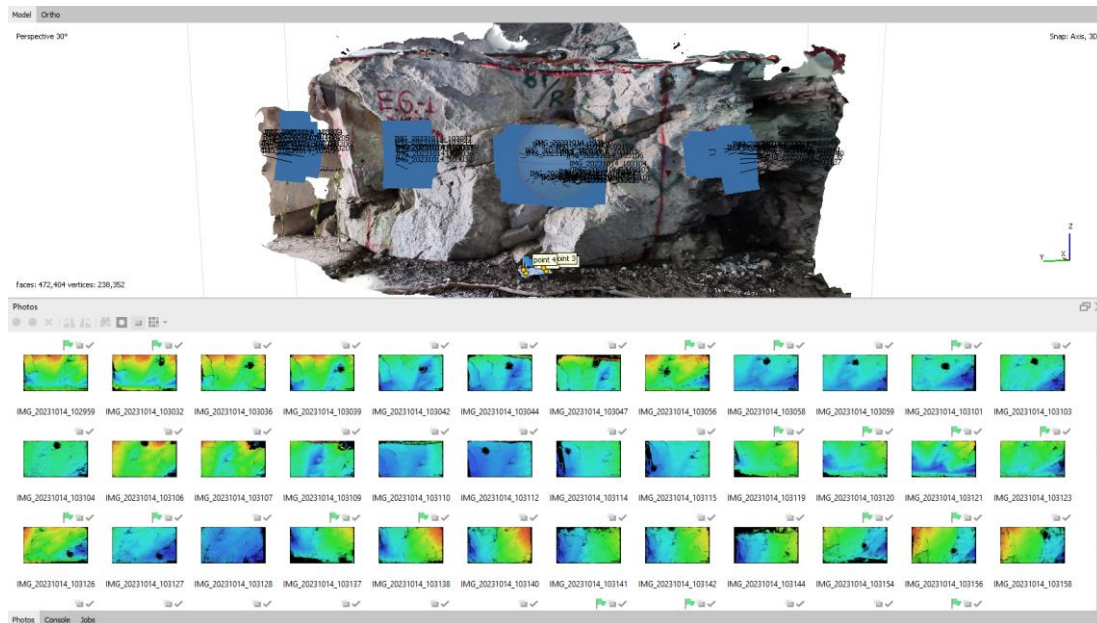
Anexo 7. Direccionamiento de los puntos de control con el norte.



Anexo 8. Estimación de UCS con la medición de los I.R. del martillo Schmidt



Anexo 9. Procesamiento de imágenes para el modelamiento 3D de la E.G.N°01



Anexo 10. Parámetros de configuración de las imágenes de la E.G.N°01

Etiqueta	Size	Alineación	Apertura diafragma	ISO	Obturación	35mm foco
20231014_102959	4000x2250	true	F/1.79	401	1/17	25
20231014_103159	4000x2250	true	F/1.79	723	1/33	25
20231014_103201	4000x2250	true	F/1.79	671	1/33	25
20231014_103221	4000x2250	true	F/1.79	802	1/33	25
20231014_103216	4000x2250	true	F/1.79	814	1/33	25
20231014_103101	4000x2250	true	F/1.79	605	1/33	25
20231014_103218	4000x2250	true	F/1.79	889	1/33	25
20231014_103056	4000x2250	true	F/1.79	624	1/33	25
20231014_103058	4000x2250	true	F/1.79	624	1/33	25
20231014_103059	4000x2250	true	F/1.79	633	1/33	25
20231014_103219	4000x2250	true	F/1.79	889	1/33	25
20231014_103103	4000x2250	true	F/1.79	692	1/33	25
20231014_103104	4000x2250	true	F/1.79	579	1/33	25
20231014_103106	4000x2250	true	F/1.79	546	1/33	25
20231014_103107	4000x2250	true	F/1.79	702	1/33	25
20231014_103109	4000x2250	true	F/1.79	972	1/33	25
20231014_103110	4000x2250	true	F/1.79	778	1/33	25
20231014_103112	4000x2250	true	F/1.79	515	1/33	25
20231014_103114	4000x2250	true	F/1.79	522	1/33	25
20231014_103115	4000x2250	true	F/1.79	712	1/33	25
20231014_103119	4000x2250	true	F/1.79	778	1/33	25
20231014_103120	4000x2250	true	F/1.79	767	1/33	25
20231014_103121	4000x2250	true	F/1.79	902	1/33	25
20231014_103123	4000x2250	true	F/1.79	1016	1/33	25
20231014_103126	4000x2250	true	F/1.79	851	1/33	25
20231014_103127	4000x2250	true	F/1.79	851	1/33	25
20231014_103128	4000x2250	true	F/1.79	851	1/33	25
20231014_103137	4000x2250	true	F/1.79	767	1/33	25
20231014_103138	4000x2250	true	F/1.79	734	1/33	25
20231014_103140	4000x2250	true	F/1.79	876	1/33	25
20231014_103141	4000x2250	true	F/1.79	1126	1/33	25
20231014_103142	4000x2250	true	F/1.79	745	1/33	25
20231014_103144	4000x2250	true	F/1.79	633	1/33	25
20231014_103032	4000x2250	true	F/1.79	819	1/50	25
20231014_103036	4000x2250	true	F/1.79	882	1/50	25
20231014_103039	4000x2250	true	F/1.79	882	1/50	25
20231014_103042	4000x2250	true	F/1.79	949	1/50	25
20231014_103047	4000x2250	true	F/1.79	807	1/50	25
20231014_103044	4000x2250	true	F/1.79	844	1/50	25
20231014_103204	4000x2250	true	F/1.79	831	1/50	25
20231014_103205	4000x2250	true	F/1.79	992	1/50	25
20231014_103158	4000x2250	true	F/1.79	922	1/50	25
20231014_103207	4000x2250	true	F/1.79	949	1/50	25
20231014_103154	4000x2250	true	F/1.79	772	1/50	25
20231014_103156	4000x2250	true	F/1.79	819	1/50	25
20231014_103202	4000x2250	true	F/1.79	550	1/50	25
20231014_103206	4000x2250	true	F/1.79	992	1/50	25
			Min.	401	1/17	
			Max.	1126	1/50	

Anexo 11. Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional del
Altiplano Puno



Vicerrectorado de
Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo **JULIAN APAZA CHINO** identificado(a) con N° DNI:
72083850 en mi condición de egresado(a) de la:

MAESTRÍA EN GEOTECNIA Y GEOMECÁNICA MINERA

con código de matrícula N° 224865, informo que he elaborado la tesis denominada:

**“IMPLEMENTACIÓN DE STRUCTURE FROM MOTION EN MINERÍA
SUBTERRÁNEA PARA MEJORAR EL PROCESO DE MAPEOS GEOMECÁNICOS Y
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – UNIDAD MINERA POMASI – CIEMSA”.**

Es un tema original.

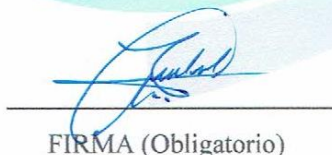
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno, 07 de Agosto del 2024.



FIRMA (Obligatorio)



Huella

Anexo 12. Autorización para el depósito de tesis en el repositorio institucional



Universidad Nacional del
Altiplano Puno



Vicerrectorado de
Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo **JULIAN APAZA CHINO** identificado(a) con N° DNI: **72083850**, en mi condición de egresado(a) del **Programa de Maestría o Doctorado: MAESTRÍA EN GEOTECNIA Y GEOMECÁNICA MINERA**, informo que he elaborado la tesis denominada:

“IMPLEMENTACIÓN DE STRUCTURE FROM MOTION EN MINERÍA SUBTERRÁNEA PARA MEJORAR EL PROCESO DE MAPEOS GEOMECÁNICOS Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – UNIDAD MINERA POMASI – CIEMSA”.

para la obtención de **Grado.**

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno, 07 de Agosto del 2024.

FIRMA (Obligatorio)



Huella