

**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA  
DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA  
VICERRECTORADO  
CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO DEL CERRO CHAUÑA Y  
ANÁLISIS COMPARATIVO**

MAGISTER EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA - VERSIÓN III  
POSTULANTE: ING. VICTOR HUGO CHAVEZ CALANCHA  
TUTORA: MSC. ING. ALISON RAISA QUIROZ VASQUEZ  
SUCRE - BOLIVIA

2025

## **Dedicatoria**

*El presente trabajo está dedicado a  
Norman Avila (Don Bigotes) †; gracias por todo tu amor,  
no estamos separados por tu ausencia física, estamos unidos por tu amor eterno.*

## Contenido

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DEL CERRO CHAUÑA Y ANÁLISIS COMPARATIVO .....	11
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....	11
1.1. Presentación .....	11
1.2. Justificación .....	12
1.3. Objetivo general .....	12
1.4. Objetivos específicos .....	12
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....	14
2.1. Marco Contextual .....	14
2.1.1. Ubicación .....	14
2.1.2. Estudios anteriores .....	14
2.2. Marco Conceptual .....	17
2.2.1. Marco geológico regional .....	17
2.2.2. Marco geológico local .....	18
2.2.2.1. Paleógeno Luribay .....	19
2.2.2.2. Cuaternario Lacustre.....	20
2.2.2.3. Cuaternario Terraza Aluvial .....	21
2.2.2.4. Cuaternario Aluvial.....	22
2.2.2.5. Cuaternario Movimientos en Masa.....	22
a) Cuaternario Flujo de Detritos .....	22
b) Cuaternario Caída de Rocas.....	23
c) Cuaternario Avalancha de Rocas.....	24
d) Deslizamiento traslacional.....	24
e) Volcamiento (Toppling) .....	25
2.2.2.6. Cuaternario Coluvio .....	25
2.2.2.7. Cuaternario Relleno .....	26
2.2.3. Mecánica de Rocas.....	26
2.2.3.1. Mecánica de rocas como una antigua practica .....	27
2.2.3.2. RQD (Rock Quality Designation).....	28
2.2.3.3. Clasificación RMR (Rock Mass Rating) .....	28
2.2.3.3.1. Resistencia a la Matriz Rocosa .....	30
2.2.3.3.2. RQD - (Rock Quality Designation) .....	30
2.2.3.3.3. Separación entre diaclasas.....	31
2.2.3.3.4. Estado de las discontinuidades.....	31
2.2.3.3.4.1. Longitud de la discontinuidad.....	31

2.2.3.3.4.2. Abertura .....	32
2.2.3.3.4.3. Rugosidad .....	32
2.2.3.3.4.4. Relleno .....	33
2.2.3.3.4.5. Alteración .....	33
2.2.3.3.5. Agua freática .....	34
2.2.3.3.6. Corrección de RMR (Rock Mass Rating) .....	35
2.2.3.4. Clasificación SMR (Slope Mass Rating) Romana, M. et al. (1985) .....	36
2.2.3.5. Clasificación Q de Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974) .....	38
2.2.3.5.1. Valores de los parámetros característicos de la clasificación Q .....	39
2.2.3.6. Clasificación Q-slope Barton, N., Bar, N. & Associates (2015) .....	43
2.2.3.6.1. Parámetros (RQD, Jn, Jr y Ja) .....	43
2.2.3.6.2. Factor de orientación de las discontinuidades (Factor O) .....	44
2.2.3.6.3. Factor de condición ambiental y geológica ( $J_{Wices}$ ) .....	44
2.2.3.6.4. Factor de reducción por esfuerzos (SRF slope) .....	45
2.2.3.6.5. Ángulo de Pendiente (Grados) .....	46
2.2.3.6.6. Diagrama de estabilidad Q-slope .....	46
2.2.4. Resistencia de la matriz rocosa .....	47
2.2.4.1. Norma ASTM D5873 "Método de Prueba Estándar para Determinar la Dureza de la Roca por el Método del Martillo de Rebote" .....	47
2.2.5. Correlación entre sistemas de clasificación .....	49
CAPÍTULO III METODOLOGÍA .....	51
3.1 Diseño .....	51
3.1.1. Etapa 1 .....	51
3.1.2. Etapa 2 .....	51
3.1.3. Etapa 3 .....	52
3.2. Población, muestra y estadística .....	52
CAPÍTULO IV DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	53
4.1 Propuesta .....	53
4.2. Clasificación Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989) .....	53
4.2.1. Parámetro Resistencia de la Matriz rocosa .....	53
4.2.2. Parámetro RQD - Rock Quality Designation .....	54
4.2.3. Parámetro separación entre diaclasas .....	55
4.2.4. Parámetros del estado de las discontinuidades .....	56
4.2.4.1. Longitud de la discontinuidad .....	57
4.2.4.2. Abertura .....	57
4.2.4.3. Rugosidad .....	58
4.2.4.4. Relleno .....	59

4.2.4.5. Alteración .....	60
4.2.5. Parámetro de agua freática.....	60
4.2.6. Resultados clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989).....	61
4.3. Clasificación SMR (Slope Mass rating) Romana, M. et al. (1985) .....	62
4.3.1. Clasificación de estabilidad SMR (Slope Mass Rating) Romana, M. et al. (1985) .....	62
4.4. Clasificación Q-slope Barton, N., Bar, N. & Associates (2015). .....	63
4.4.1. Número de sistemas de fisuras - Jn.....	64
4.4.2. Índice de rugosidad de las discontinuidades – Jr.....	65
4.4.3. Índice de alteración de las discontinuidades - Ja.....	65
4.4.4. Índice de orientación de las discontinuidades - O.....	66
4.4.5. Condiciones ambientales y geológicas – Jwice .....	68
4.4.6. Factor de reducción de resistencia - SRF slope .....	68
4.4.7. Ángulo de inclinación del talud.....	69
4.4.8. Resultados obtenidos clasificación Q-slope.....	70
4.6. Análisis comparativo .....	72
4.7. Ecuación propuesta .....	74
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
5.1. Conclusiones .....	78
5.2. Recomendaciones .....	80
5.3. Referencias bibliográficas .....	82
ANEXOS.....	85
A. Ubicación.....	85
B. Mapa geológico 2011 – GAMLP.....	86
C. Mapa geológico – geomorfológico 2025.....	87
D. Ubicación puntos de afloramiento .....	88
E. Clasificación geomecánica en base al esquema RMR modificado (Bieniawski, 1989) .....	89
F. Mapas de isógonas.....	103
a) SMR (Slope Mass Rating) datos de campo. ....	103
b) SMR (Slope Mass Rating) a partir de ecuación de Mahmoud, H., et al. (2020).....	104
c) SMR (Slope Mass Rating) a partir de ecuación propuesta .....	105
d) Sobre posición datos SMR de los tres autores .....	106
G. Ecuaciones empíricas probadas .....	107
H. Tipos de roturas .....	108
I. Registro fotográfico.....	113

## ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Formación Luribay. (Elaboración propia).....	20
Ilustración 2. Depósitos lacustres. (Elaboración propia) .....	21
Ilustración 3. Depósitos aluviales y terrazas aluviales. (Elaboración propia) .....	22
Ilustración 4. Flujo de detritos. (Elaboración propia) .....	23
Ilustración 5. Caída de Rocas (Imagen VANT). (Elaboración propia) .....	23
Ilustración 6. Avalancha de Rocas. (Elaboración propia).....	24
Ilustración 7. Volcamiento. (Elaboración propia).....	25
Ilustración 8. Depósitos coluviales. (Elaboración propia).....	26
Ilustración 9. Índice volumétrico de juntas Jv.( Ramírez y Monge (2004) .....	28
Ilustración 10. Perfiles de rugosidad. (ISRM. 1981). (En Gonzales de Vallejo, 2004) .....	33
Ilustración 11. Diagrama de estabilidad de taludes Q para alturas de talud inferiores a 30 m (Barton y Bar, 2015). .....	47
Ilustración 12. Ensayos de campo, martillo de Schmidt.....	54
Ilustración 13. Familias de diaclasas (Jv).....	55
Ilustración 14. Separación entre diaclasas.....	56
Ilustración 15. Representación esquemática de las propiedades geométricas de discontinuidades (Hudson, 1989) .....	56
Ilustración 16. Longitud.....	57
Ilustración 17. Abertura.....	58
Ilustración 18. Discontinuidad rellena con precipitación química. ....	60
Ilustración 19. Grafico circular SMR en base al parámetro “Descripción”.....	63
Ilustración 20. Diagrama de rosas de las familias de diaclasas.....	67
Ilustración 21. Medición del ángulo de inclinación del talud.....	70
Ilustración 22. Gráfico de estabilidad de taludes usando el sistema Q Slope.....	71
Ilustración 23. Diagrama circular resultados finales Q-slope. ....	71
Ilustración 24. Gráfico de relación empírica SMR-Q-slope. ....	74
Ilustración 25. Grafico lineal SMR.....	76
Ilustración 26. Izq. Mapa de isógonas de la clasificación geomecánica de resultados Izq. SMR a partir de datos de campo, Centro SMR a partir de ecuación propuesta, Der. SMR a partir de la ecuación de Mahmoud, H., et al. (2020) .....	77

## ECUACIONES

Ecuación 1. RQD. ....	28
Ecuación 2. SMR (Slope Mass Rating).....	36
Ecuación 3. Clasificación Q (Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974). ....	38
Ecuación 4. Método Q-slope. (Barton y Bar, 2015).....	43
Ecuación 5. Mohammad A. et al. (2020).....	50
Ecuación 6. Propuesta empírica de ecuación.....	74

## TABLAS

Tabla 1.Límites del área de estudio. (Elaboración propia).....	14
Tabla 2. Puntos de afloramiento Fm. Luribay. (Elaboración propia).....	20
Tabla 3. Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski 1989) (Gonzales de Vallejo, 2004).....	29
Tabla 4. Parámetro y puntuación de resistencia de la matriz rocosa (MPa). (Gonzales de Vallejo, 2004).....	30
Tabla 5. Parámetro y puntuación RQD. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	31
Tabla 6. Parámetro y puntuación de separación entre diaclasas. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	31
Tabla 7. Parámetro y puntuación de longitud de la discontinuidad. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	32
Tabla 8. Parámetro y puntuación para abertura. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	32
Tabla 9. Parámetro y puntuación para la rugosidad. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	33
Tabla 10. Parámetros y puntuación de relleno. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	33
Tabla 11. Parámetros y puntuación para la alteración. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	34
Tabla 12. Puntuación y clasificación para agua freática. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	35
Tabla 13. Corrección por la orientación de las discontinuidades (Bieniawski, 1989) (Gonzales de Vallejo, 2004).....	35
Tabla 14. Clasificación RMR. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	35
Tabla 15. Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR. (Gonzales de Vallejo, 2004).....	36
Tabla 16. Clasificación SMR Romana (1985). ....	37
Tabla 17. Clases de estabilidad SMR Romana (1985). ....	38
Tabla 18. Índice Q - Barton. (Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974). ....	39
Tabla 19. Calidad RQD, Barton, et al; 1974) (Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974). ....	39
Tabla 20. Índice de diaclasado, (Barton, et al; 1974) Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).....	40
Tabla 21. Índice de rugosidad de las discontinuidades, Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974). ....	40
Tabla 22. Índice de alteración de las discontinuidades, Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).....	41
Tabla 23. Factor de reducción por la presencia de agua, Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).....	41
Tabla 24. Condiciones tensionales de la roca, Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974). ....	42
Tabla 25. Factor de orientación de las discontinuidades (Factor O). (Barton y Bar, 2015).....	44

Tabla 26. Factor de condición ambiental y geológica (JWices) (Barton y Bar, 2015).	44
Tabla 27. SRFa Condiciones físicas. (Barton y Bar, 2015).	45
Tabla 28. SRFb: Esfuerzo y resistencia. (Barton y Bar, 2015).	45
Tabla 29. SRFc: Discontinuidad mayor. (Barton y Bar, 2015).	46
Tabla 30. Rango de variables r.	50
Tabla 31. Tabla resumen de resultados para la resistencia de compresión uniaxial (Mpa). (El autor)	54
Tabla 32. RQD.	55
Tabla 33. Tabla resumen de separación entre diaclasas. (RMR)	56
Tabla 34. Tabla resumen longitud de diaclasas. (RMR).	57
Tabla 35. Tabla resumen abertura de diaclasas. (RMR)	58
Tabla 36. Tabla resumen Rugosidad. (RMR).	59
Tabla 37. Tabla resumen rellenos. (RMR)	59
Tabla 38. Tabla resumen alteración. (RMR).	60
Tabla 39. Agua freática. (RMR).	61
Tabla 40. Tabla resumen calidad de macizo rocoso (sin corrección).	61
Tabla 41. Tabla resumen de clasificación SMR.	62
Tabla 42. Tabla resumen de clasificación de estabilidad SMR.	63
Tabla 43. Tabla índice de diaclasado.	64
Tabla 44. Tabla del índice de rugosidad de las discontinuidades.	65
Tabla 45. Tabla del índice de alteración de las discontinuidades.	66
Tabla 46. Orientación de las discontinuidades (DIP).	67
Tabla 47. Tabla resultados, factor O.	68
Tabla 48. Resultados tabla de factor de reducción por esfuerzos - SRF slope.	69
Tabla 49. Ángulo de inclinación del talud.	69
Tabla 50. Q-slope tabla resumen.	70
Tabla 51. Tabla SMR a partir de Q-slope.	73
Tabla 52. Tabla SMR a partir de ecuación propuesta.	75
Tabla 53. Análisis de métodos de correlación.	75

## Resumen

El presente trabajo se realizó en el sur de la ciudad de La Paz, dentro del Macro-distrito Mallasa, al oeste del Cerro Chauña y hacia el margen izquierdo del río La Paz. La investigación aborda la creciente problemática de inestabilidad en el área de estudio, la cual ha experimentado eventos recurrentes de remoción en masa. La necesidad de abordar esta problemática impulsó un análisis de caracterización del macizo rocoso, centrándose en la aplicación de dos métodos de clasificación geomecánica: Clasificación SMR (Slope Mass rating) Romana, M. et al. (1985), basado en la clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989) y el sistema Q-slope Barton, N., Bar, N. & Associates (2015). Posteriormente, se efectuó un análisis comparativo entre ambos métodos con el propósito de identificar sus ventajas, limitaciones y alcances. Finalmente, a partir de los datos obtenidos en los 14 puntos de afloramiento, se estableció una correlación entre ambos métodos utilizando la línea de tendencia que presentó el mejor ajuste a la información recopilada.

La investigación es de carácter descriptivo, pues cada método de clasificación de macizos rocosos requirió describir sus características principales y obtener resultados específicos. Se llevó a cabo la caracterización con observación y mediciones en campo para recopilar la información necesaria.

Los resultados obtenidos por el método de clasificación SMR (Slope Mass rating) y el sistema Q-slope de Barton, de forma general determinan al macizo rocoso como estable.

A través de una correlación empírica entre el sistema Q-slope de Barton y el sistema de clasificación SMR (Slope Mass Rating), se obtuvieron resultados consistentes y satisfactorios.

Asimismo, resulta esencial realizar más estudios de caso en los macizos rocosos de la Formación Luribay aplicando métodos utilizados en el presente trabajo y otros, para establecer criterios de evaluación más sólidos.

La información recolectada, procesada y presentada en este trabajo es preliminar; sin embargo, puede ser útil para evaluar la estabilidad del cerro Chauña.

**Palabras clave:** Macizo rocoso, análisis comparativo, Clasificación SMR, Clasificación “Q-slope”, correlaciones empíricas, análisis comparativo.

## Summary

This study was conducted in the southern part of La Paz, within the Mallasa Macrodistrict, west of Cerro Chauña and toward the left bank of the La Paz River. This research addresses the growing problem of instability in the study area, which has experienced recurrent mass displacement events. The need to address this problem prompted a rock mass characterization analysis, focusing on the application of two geomechanical classification methods: SMR (Slope Mass Rating) classification by Romana, M. et al. (1985), based on the modified Rock Mass Rating (RMR) geomechanical classification (Bieniawski, 1989), and the Q-slope system by Barton, N., Bar, N. & Associates (2015). Subsequently, a comparative analysis between both methods was conducted with the purpose of identifying their advantages, limitations, and scope. Finally, based on the data obtained from the 14 outcrop points, a correlation between both methods was established using the trend line that best fit the collected information.

The research is descriptive in nature, as each rock mass classification method required describing its main characteristics and obtaining specific results. Characterization was carried out through field observation and measurements to gather the necessary information.

The results obtained using the SMR (Slope Mass Rating) classification method and Barton's Q-slope system generally determine the rock mass as stable.

Through an empirical correlation between Barton's Q-slope system and the Slope Mass Rating (SMR) classification system, consistent and satisfactory results were obtained.

Furthermore, it is essential to conduct further case studies on the rock masses of the Luribay Formation, applying methods used in this work and others, to establish more robust evaluation criteria.

The information collected, processed, and presented in this work is preliminary; however, it may be useful for assessing the stability of Chauña Hill.

**Keywords:** Rock mass, comparative analysis, SMR classification, Q-slope classification, empirical correlations, comparative analysis.

# CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DEL CERRO CHAUÑA Y ANÁLISIS COMPARATIVO

## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

### 1.1. Presentación

El área de estudio que aborda esta investigación se localiza al occidente de la Cordillera Real de Los Andes, al norte del Altiplano de Bolivia, al sur de la ciudad de La Paz, dentro del Macro-distrito Mallasa, específicamente se sitúa al oeste del Cerro Chauña y hacia las proximidades del margen hidráulico izquierdo del Río La Paz.

Según Espejo, R. et al. (2011), la región ha experimentado un marcado hiatus erosivo entre los sistemas Paleozoico y Cenozoico, el macizo rocoso objeto del presente estudio corresponde a depósitos de la Formación Aranjuez, esta denominación hasta la década del 80 del siglo pasado. Estudios subsiguientes de geología regional, correlación estratigráfica y paleontológica han permitido identificar esta unidad como la Formación Luribay asignada al Paleógeno. En este trabajo, se adoptará la denominación de Formación Luribay para referirse litológicamente a los depósitos de este macizo rocoso.

La morfología del área de estudio, ha sido moldeada por procesos geológicos asociados principalmente a tectonismo y procesos de remoción en masa, principalmente caídas en bloque. Ante este escenario, se ha visto la necesidad de llevar a cabo un análisis de caracterización del macizo rocoso en el área, este análisis contribuirá a una comprensión más profunda del grado de estabilidad del talud proporcionando información a partir de su caracterización. Para lograr este cometido, se ha caracterizado al macizo rocoso a través del método de clasificación **Slope Mass Rating (SMR)** Romana, M. et al. (1985), basado en la clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989) y el sistema **Q-slope Barton**, N., Bar, N. & Associates (2015), identificando alcances y limitaciones. Posteriormente, se estableció una correlación entre ambos métodos mediante una ecuación empírica y una ecuación propuesta, con el fin de realizar un análisis comparativo.

## **1.2. Justificación**

La relevancia de esta investigación radica en los recurrentes problemas de inestabilidad evidenciados en el área de estudio, la presencia de una vía de circulación masiva emplazada al pie del talud. Los procesos referidos a caídas en bloques, han ocasionado afectación significativa tanto en propiedad pública como propiedad privada, generando impactos negativos en comunidades de constante crecimiento poblacional y desarrollo urbanístico.

La necesidad imperante de abordar esta problemática ha inspirado realizar un análisis de caracterización del macizo rocoso en esta área. El enfoque de la investigación se centra en la aplicación de dos métodos de clasificación geomecánica: el método de clasificación SMR (Slope Mass rating) que es una adaptación de la clasificación RMR de Bieniawski para taludes y el sistema Q-slope.

La importancia de esta investigación radica en clasificar al macizo rocoso, y posteriormente con los resultados obtenidos realizar un análisis comparativo para identificar posibles áreas de mayor o menor vulnerabilidad.

## **1.3. Objetivo general**

Como objetivo general para construir una hipótesis sobre el comportamiento del macizo rocoso se tiene:

- Realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso del Cerro Chauña aplicando el método de clasificación Slope Mass Rating (SMR) y el sistema Q-slope, con el propósito de determinar su grado de estabilidad y realizar un análisis comparativo entre ambos métodos.

## **1.4. Objetivos específicos**

Como objetivos específicos necesarios para cumplir el objetivo general se tiene:

- Aplicar el sistema SMR (basado en RMR de Bieniawski) para la caracterización geomecánica del macizo rocoso.

- Aplicar el sistema de clasificación Q-slope de Barton, para caracterizar la estabilidad del macizo rocoso.
- Realizar un análisis comparativo entre ambos métodos para identificar similitudes, diferencias, limitaciones o complementariedades en la caracterización del macizo rocoso.
- Proponer una ecuación empírica de correlación entre los métodos de clasificación geomecánica SMR y Q-slope para la aplicación en macizos rocosos de la Formación Luribay.
- Correlacionar el método de clasificación de SMR (Slope Mass Rating) y el sistema Q-slope de Barton.

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco Contextual

#### 2.1.1. Ubicación

El área de estudio se encuentra en el Departamento de La Paz, Municipio de nuestra señora de La Paz, el mismo es capital de la Provincia Murillo, limita al Norte con el Municipio de Guanay, al Noreste con el Municipio de Caranavi, al Este con los Municipios de Coroico y Yanacachi, al Sureste con el Municipio de Palca, al Sur con los Municipios de Mecapaca y Achocalla, al Suroeste limita con el Municipio de El Alto y al Oeste con el Municipio de Pucarani.

De manera específica el área de estudio, se localiza al sur de la Ciudad de La Paz, dentro del Macro-distrito Mallasa, hacia el margen hidráulico este del Río La Paz, al oeste del cerro Chauña (Ver Anexo A). El conjunto del área se encuentra delimitada entre las siguientes coordenadas del sistema UTM, Zona 19 Sur, Datum WGS84.

<b>Nro</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
1	596700.00 W	8169600.00 N
2	596900.00 E	8169600.00 N
3	596700.00 E	8169300.00 S
4	596900.00 E	8169300.00 S

Tabla 1. Límites del área de estudio. (Elaboración propia)

#### 2.1.2. Estudios anteriores

El valle de La Paz, presenta una evolución geológica compleja, donde los depósitos más estudiados son de edad Cuaternaria, por lo que esta cuenca en gran parte presenta material de origen sedimentario, siendo pocas las áreas donde se puede evidenciar rocas de edades anteriores; es así, que pocos son los trabajos relacionados a la mecánica de rocas en la región, a continuación se presenta los trabajos realizados en la cuenda del área de trabajo:

- D'Orbigny (1842) fue el primer científico en documentar la geología de una gran parte del territorio de Bolivia. Concluyó que los depósitos del valle de La Paz y sus alrededores tenían origen diluvial.
- Forbes (1861) preparó una sección geológica desde la costa del Pacífico a través de La Paz y describió la Cinerita Chijini como una traquita.
- Conway (1901) estuvo en La Paz y sus alrededores por varios meses durante los años 1898 y 1900; en su viaje para ascender al típico Illimani, observó un gran torrente de barro que se originó en el valle de Achocalla.
- Bowman (1909, 1914, 1916) nombró y delineó el lago Ballivián, antecesor del lago Titicaca y definió la región andina central como una provincia fisiográfica.
- Hauthal (1911) consideraba que la parte superior de los depósitos en el valle de La Paz eran de edad Pleistoceno.
- Gregory (1913) describió algunos de los depósitos próximos a la ciudad y comparó los rasgos de erosión con los "badlands" (tierras malas) de los estados de Dakota del Norte y del Sur.
- Troll (1927, 1928, 1935) permaneció durante varios años en Bolivia estudiando los depósitos del Terciario y Pleistoceno y preparó dos mapas topográficos; desgraciadamente su plano geológico del área de La Paz fue destruido antes de su publicación. Troll reconoce tres periodos de glaciación y también reconoció el Torrente de Barro de Achocalla.
- Ahlfeld (1945, 1946) y Ahlfeld y Branisa (1960), cuyos trabajos contienen los estudios geológicos más detallados de la ciudad de La Paz como también del territorio boliviano. Los informes de Ahlfeld incluyen resúmenes y recopilaciones de publicaciones anteriores sobre el origen del valle de La Paz, muchas de sus propias observaciones relacionadas con la historia estructural y varios mapas planimétricos.

- Dobrovolny, E. (1956), en su trabajo Geología del Valle Superior de La Paz, Bolivia, realiza un mapa geológico del Valle Superior de La Paz describiendo unidades litológicas y estudios específicos sobre procesos de remoción en masa, asentamientos en sectores por relleno que perturban el desarrollo urbano, estudio de aguas subterráneas y un plan de desarrollo urbanístico de la Ciudad de La Paz. Este documento es un inicio e inspiración para trabajos posteriores; se menciona que la escala del mapa geológico es regional con descripciones litológicas de forma general.
- Bless, M. et al. (1977), a través de las consultoras BRGM – BCEOM Prudencio Claros y Asociados, elaboran para la municipalidad de La Paz el documento denominado “Características Litoestratigráficas de la Cuenca de La Paz y Alrededores” el cual caracteriza unidades litológicas que afloran en el área de estudio; en una primera parte se destaca la caracterización de diferentes procesos de remoción en masa de mayor importancia que fueron desarrollados en diferentes épocas de erosión.
- Espejo, R. et al. (2011), a través de la memoria descriptiva del mapa de riesgos de los distritos urbanos del municipio de La Paz 2011, para el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, describe los procesos de remoción en masa asociadas a procesos geológicos, climáticos y antrópicos; así también, como el documento de Bless, M. et al. (1977), hace mención a periodos de erosión. El trabajo de Bless, M. et al. (1977) y el trabajo de Espejo, R. et al. (2011), presentan similitudes, ambos trabajan con cuatro épocas de erosión; también se destaca que, en gran número los procesos de remoción en masa recientes se emplazan sobre procesos de remoción en masa antiguos y/o laderas de cursos de ríos; se destaca que gran parte de los procesos de remoción en masa suprayacen a depósitos de la Formación La Paz, siendo esta unidad de composición fina por lo que el contacto con esta unidad actuaría como un plano de debilidad; también se observa la falta de estudios para definir si los grandes flujos de barro de la tercera época de erosión dentro del área de estudio están asociados o no a procesos sísmicos. Finalmente, indicar que se presenta un mapa geológico a escala local. (Ver anexo B)
- Botello, G., 2006, en su trabajo que se denominó “Estimación de los parámetros físico-mecánicos para el cálculo de estabilidad de taludes en macizos rocosos”, realizó una estimación de parámetros físico-mecánicos en cinco macizos rocosos altamente

fracturados, en áreas pequeñas, basadas en investigaciones de campo, ensayos de laboratorio, para su aplicación al cálculo de estabilidad de taludes.

## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1. Marco geológico regional**

Como se menciona en el compendio de geología de Bolivia (Suarez, 2000), la geología de Bolivia inicia en el siglo pasado, con apoyo de renombrados geólogos europeos como Alcides D'Orbigny, hacia los años treinta con geólogos bolivianos, como Jorge Muñoz Reyes, e investigadores extranjeros, como Federico Ahlfeld y Leonardo Branisa, contribuyendo a la enseñanza de las ciencias geológicas. Definiendo grandes ciclos tectosedimentarios y orogénicos en Bolivia, cuatro de ellos en la era Proterozoico, y otros cuatro para la era Fanerozoica, en esta última, desde el Jurásico Superior al Reciente se clasifica como ciclos Andinos. El ciclo Andino comienza con la disgregación del Gondwana (200 Ma), que separa Sudamérica de África, se generan grandes esfuerzos extensionales, especialmente en la actual Cordillera Oriental. A partir del Jurásico las secuencias se continentalizan, formando cuencas de trasarco con llanuras aluviales, eólicas, fluviales y lagunares, la etapa más importante del plegamiento del ciclo Andino que se produjo alrededor de los 26 a 30 Ma (Oligoceno tardío – Mioceno temprano). Esta acción está ligada a la colisión y subducción de la Placa de Nazca, formando un gran arco volcánico a lo largo de la costa pacífica de Sudamérica, comprimiendo y plegando todas las secuencias previas.

Según Bles et al. (1978) en Espejo, R. et al. (2011), los depósitos en el valle de La Paz inician con sedimentos paleozoicos y paleógenos plegados y fallados tal como las Formaciones Belén y Sica Sica asignadas al Devónico y la Formación Luribay al Paleógeno, sobre estos materiales, se han depositado facies de abanicos proximales y distales de la Formación Huacallani sintectónicos a la deformación de esta región, una serie de cuerpos ígneos de pequeñas dimensiones muy alterados constituyen los cuerpos subvolcánicos de la Muela del Diablo, estas últimas unidades corresponden al Neógeno. Un nuevo sollevamiento de la Cordillera cambia la cuenca de relleno que inicia con sedimentos de facies distales fluviolacustres someras y facies proximales de abanicos aluviales que irán colmatando este valle, esta sedimentación Neógena ocurrirá durante el Plioceno inferior, y finalizando en el Plioceno

Superior. El relleno final de la cuenca del valle de La Paz lo constituyen las denominadas Gravas del Altiplano, marcan la colmatación total del valle.

La erosión retrograda del río Beni disecciona la Cordillera Oriental y captura una parte del drenaje endorreico del Altiplano, dando origen al desarrollo del valle del río La Paz; la profundización del valle alcanza los 2400 metros de desnivel en comparación con la Ceja del Altiplano, posteriormente se considera Cuatro Épocas de Erosión, siendo la primera caracterizada por los primeros indicios de procesos de remoción en masa manifestados como flujos de barro, generalmente gravosos tal como el del valle de Achocalla, en la segunda etapa de erosión destacan los depósitos desarrollados sobre los principales drenajes mayores del valle de La Paz que ya estaban individualizados para esa época, estos son los ríos Choqueyapu, Orkojahuira e Irpavi, la formación de los depósitos aluviales que dieron lugar a la denominada terraza Miraflores de amplia distribución en la zona homónima, finaliza con grandes flujos de barro. La Tercera época de erosión está caracterizada por grandes deslizamientos, y entre los más notables tenemos el de Achocalla, Alpacoma y Llojeta, sincrónicamente se han desarrollado algunas terrazas como Obrajes y Bolognia. La Cuarta época de erosión se caracteriza por los flujos de barro recientes tal como el de Cota Cota, Ovejuyo, Apaña y grandes procesos de remoción en masa como el de Villa Armonía, Santa Bárbara, Las Dalias Pampahasi Bajo Central y Callapa. En el anexo B se presenta el mapa geológico elaborado por Espejo, et al. (2011), para el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz el año 2011, a escala 1:50.000.

### **2.2.2. Marco geológico local**

Hoek (2007) en su libro *Practical Rock Engineering*, indica que en la práctica la piedra angular para cualquier análisis de mecánica de rocas es el modelo geológico. Los métodos para la recopilación de datos geológicos no han cambiado mucho en el último cuarto de siglo y todavía no existe un sustituto aceptable para el mapeo de campo y el registro geológico.

De manera local, el sector presenta un contexto geológico complejo donde la influencia por procesos de remoción en masa ha modificado el paisaje, el trabajo de Bless et al. (1977) destaca la influencia de periodos de erosión en la configuración actual. El estudio realizado por Botello (2006) sobre la estimación de parámetros físico-mecánicos en macizos rocosos para La Paz revela la existencia de inestabilidad de taludes. Por otra parte, Espejo et al. (2011), menciona que los procesos de remoción en masa en la cuenca están estrechamente vinculados a la

caracterización geológica, a condiciones climáticas y factores antrópicos. Por lo mencionado, se ha visto necesario realizar un mapa geológico – geomorfológico del área de estudio, el cual fue elaborado a escala 1:15, entre diciembre de 2022 a mayo de 2025, dicho trabajo se plasma en el anexo “C”, las diferentes unidades litológicas se describen a continuación:

### **2.2.2.1. Paleógeno Luribay**

El Compendio de Geología de Bolivia (Suarez, 2000). Ahlfeld (1946) describe a la Formación Luribay como una secuencia de conglomerados gruesos con intercalación de arenas que se depositaron discordantemente sobre sedimentos Mesozoicos y Paleozoicos anteriores, llenando la cuenca en un régimen aluvial y fluvial. Guaygua, (2008), destaca que la Formación Luribay presenta conglomerados con intercalaciones de arenas, mal seleccionadas, con niveles de arcillas angulosas a subangulosas y una matriz arenosa de color rojo oscuro, presenta un predominio de bancos de conglomerados. En base al mapeo geológico, se evidencia que dentro el área de estudio, los depósitos de la Formación Luribay de manera general están representados por conglomerados compactos, con presencia de areniscas, líticas y cuarzo. Cada punto de afloramiento presenta características particulares, las mismas se describen en la tabla a continuación:

<b>Punto de afloramiento</b>	<b>Descripción</b>
1	Paraconglomerado, areniscas rojizas con vetillas de cuarzo, partículas de ruditas sub angulosas a angulosas desde 1 a 10 cm.
2	Conglomerado polimictico, areniscas con cuarzoes sub redondeados, presencia de espejos de falla, zona de cizalla, tamaño de partículas de 5 a 25 cm.
3	Paraconglomerado, areniscas color rojo a marrón, partículas de ruditas sub angulosas a sub redondeadas entre 5 a 12 cm. Conglomerado polimictico, areniscas cuarzoes sub redondeadas a redondeadas, tamaño de partículas de 5 a 30 cm.
4	Conglomerado polimictico, partículas sub redondeadas a sub angulosas de 2 a 20 cm, presencia de estrías de falla y zonas de cizalla.
5	Paraconglomerado, areniscas líticas cuarzoes color rojo a marrón, partículas de ruditas angulosas a sub angulosas de 6 a 15 cm.
6	Conglomerado polimictico, ruditas con tamaño de partícula de 5 a 30 cm, presencia de estrías. Areniscas líticas bajo contenido de cuarzo y micas sub ordenadas.

Punto de afloramiento	Descripción
7	Conglomerado polimictico, ruditas tamaño de partícula de 6 a 70 cm, areniscas líticas con cuarzo y micas, redondeadas a sub angulosas.
8	Paraconglomerados, areniscas rojas a marrones, tamaño de partículas de 3 a 30 cm presencia de líticas, cuarzo y micas, clastos sub redondeados a sub angulosos. Aglomerado, ruditas líticas con cuarzo y micas, redondeadas a sub redondeadas, matrix limo arcilloso.
9	Ortoconglomerado, ruditas sub redondeadas a sub angulosas color rojo a marrón, con arenisca lítica cuarzosa, micas sub ordinadas. Partículas de 2 a 20 cm.
10	Ortoconglomerado, ruditas sub redondeadas a sub angulosas color rojo a marrón, con arenisca lítica cuarzosa, micas sub ordinadas. Partículas de 2 a 20 cm.
11	Ortoconglomerado, partículas de 1 a 50 cm, areniscas líticas, cuarzosas con micas sub ordinadas, clastos redondeados, sub redondeados y sub angulosos.
12	Conglomerado polimictico, partículas sub redondeadas a angulosas, areniscas líticas cuarzosas y micáceas, color gris, rojizas a marrones, clastos de 2 cm a 8 cm.
13	Ortoconglomerado, partículas de 2 a 20 cm, color marrón rojizo oscuro, areniscas líticas micáceas y cuarzosas, sub redondeadas a sub angulosas.
14	Conglomerado pilimictico, gravas angulosas, redondeadas a sub redondeadas de 2 a 40 cm, areniscas líticas rojas cuarzo feldespáticas micas sub ordinadas

Tabla 2. Puntos de afloramiento Fm. Luribay. (Elaboración propia)



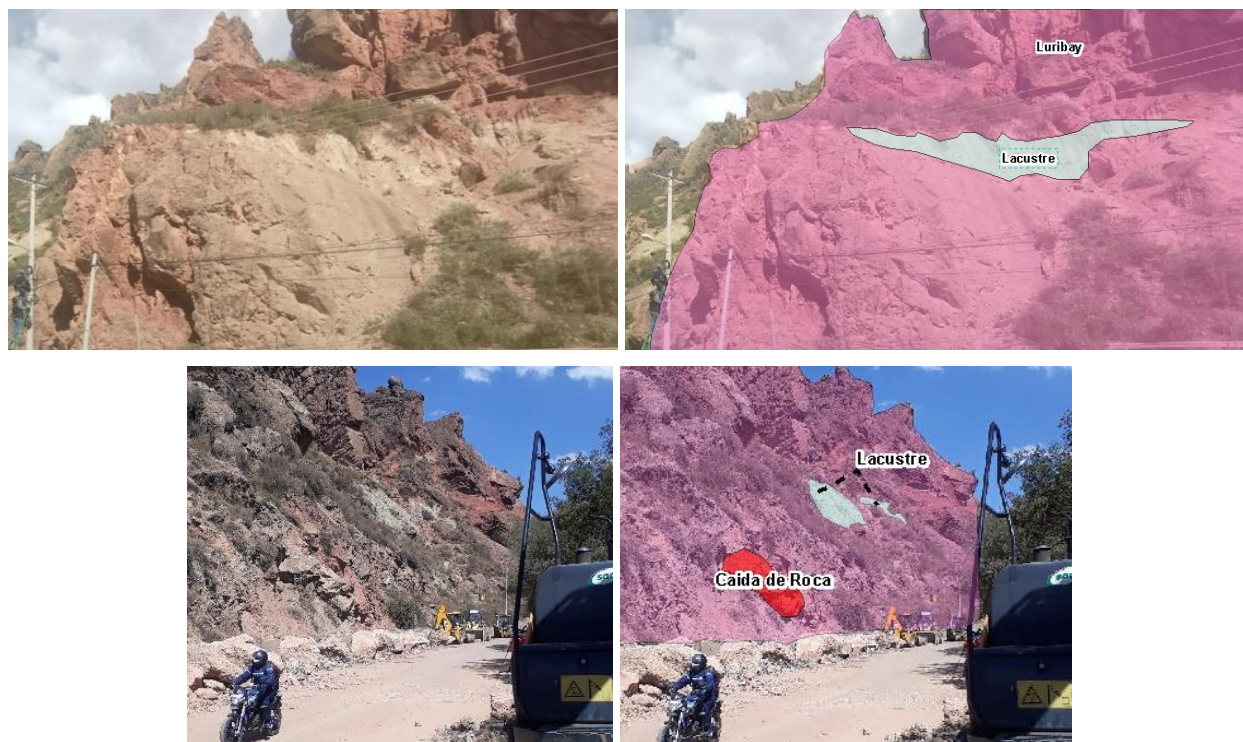
Ilustración 1. Formación Luribay. (Elaboración propia)

#### 2.2.2.2. Cuaternario Lacustre

Según Espejo et al. (2011), como consecuencia del proceso de remoción en masa conocido como flujo de barro de Achocalla (primera fase de erosión), se produjo el represamiento

del río La Paz, lo que dio origen a un lago temporal y, posteriormente, a los depósitos lacustres denominados Calacoto. Estos depósitos están constituidos por capas de arcillas gris-beige con estratificación laminar, alcanzando espesores de hasta 20 metros. Hasta la década de 1950, se encontraban bien representados en la zona de Calacoto; sin embargo, el crecimiento de la mancha urbana los cubrió casi en su totalidad, quedando actualmente expuestos únicamente en el sector de Aranjuez

En el área de estudio, estos depósitos se presentan de manera esporádica y restringida a las zonas bajas, conformados principalmente por arcillas de tonalidades beige-amarillentas con estratificación laminar, alcanzando espesores de hasta 10 m.



*Ilustración 2. Depósitos lacustres. (Elaboración propia)*

### **2.2.2.3. Cuaternario Terraza Aluvial**

Estos depósitos, presentan superficies con leve inclinación en dirección sur, se hallan ubicadas en las márgenes a lo largo del curso del río La Paz, siendo indicadores de antiguos niveles de base del río. Los depósitos de las terrazas en el sector se encuentran compuestos de

material gravoso y arenoso, clasto soportado con mátrix areno limoso, los espesores varían de decenas de centímetros hasta algunos metros.

#### **2.2.2.4. Cuaternario Aluvial**

Los depósitos aluviales se encuentran emplazados en el cauce del río La Paz, conformados por grava y arena sueltas, mal seleccionados, con variedad de tamaños de partículas, formas sub-redondeados a bien redondeados, compuestos principalmente por granitos, areniscas, lutitas y cuarcitas con espesores variables.



*Ilustración 3. Depósitos aluviales y terrazas aluviales. (Elaboración propia)*

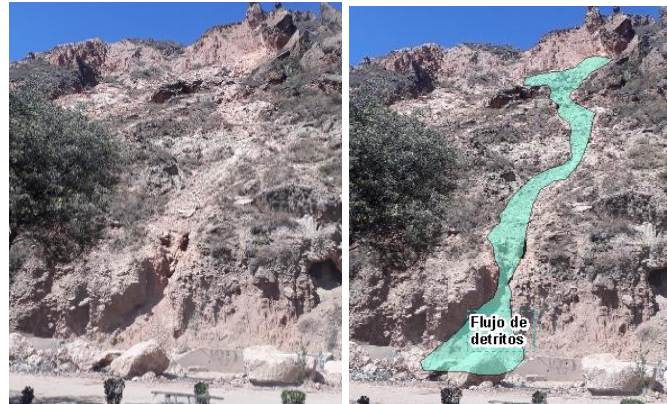
#### **2.2.2.5. Cuaternario Movimientos en Masa**

##### **a) Cuaternario Flujo de Detritos**

El Grupo de Estándares para Movimientos Masa GEMA (2007) para la región andina menciona que los flujos de detritos son flujos muy rápidos de detritos saturados, que transcurren principalmente confinados a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes. Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender en el canal y finalmente se depositan como abanicos de detritos.

Dentro del área de estudio se observan estos depósitos en sectores restringidos a canales con pendiente alta, conformado por gravas, arenas y arcillas clasto soportado

sin estratificación, tamaño de partícula variado hasta los 80 cm de diámetro, la forma de los clastos varían desde angulosos a redondeados, los depósitos presentan espesores variables no mayores a los 2 metros.



*Ilustración 4. Flujo de detritos. (Elaboración propia)*

#### **b) Cuaternario Caída de Rocas**

El Grupo de Estándares para Movimientos Masa GEMA (2007) indica que la caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento. Una característica importante de las caídas es que el movimiento no es masivo ni del tipo flujo.

En el área de estudio se evidencia este tipo de movimientos en masa en varios sectores, los bloques que se aprecian corresponden a conglomerados de la Formación Luribay descrito anteriormente.



*Ilustración 5. Caída de Rocas (Imagen VANT). (Elaboración propia)*

### **c) Cuaternario Avalancha de Rocas**

El Grupo de Estándares para Movimientos Masa GEMA (2007) para la región andina menciona que las avalanchas de rocas son flujos de gran longitud extremadamente rápidos, de roca fracturada, que resultan de deslizamientos de roca de magnitud considerable (Hungar et al., 2001). Pueden ser extremadamente móviles y su movilidad parece que crece con el volumen. Sus depósitos están usualmente cubiertos por bloques grandes, aun cuando se puede encontrar bajo la superficie del depósito material fino derivado parcialmente de roca fragmentada e incorporada en la trayectoria. Las avalanchas de rocas pueden ser muy peligrosas, pero afortunadamente no son muy frecuentes incluso en zonas de alta montaña.

En el área de estudio se ha evidenciado este tipo de movimiento en masa, por su peligrosidad y elevados volúmenes de material este tipo de movimiento es considerado como una amenaza latente en el sector. Estos materiales provienen de conglomerados pertenecientes a la Formación Aranjuez. Los depósitos alcanzan diámetros mayores a los 4 metros en muchas ocasiones y presentan formas sub redondeadas.



*Ilustración 6. Avalancha de Rocas. (Elaboración propia)*

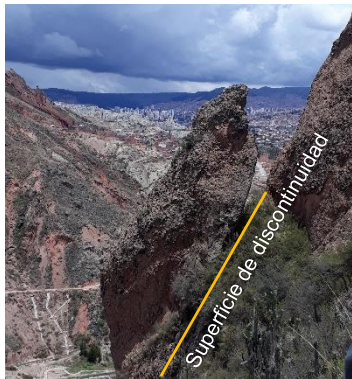
### **d) Deslizamiento traslacional**

El Grupo de Estándares para Movimientos Masa GEMA (2007) para la región andina lo define como un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En un macizo rocoso, este mecanismo de falla ocurre cuando una discontinuidad geológica tiene una dirección aproximadamente paralela a la de la cara del talud y buza hacia ésta con un ángulo mayor que el ángulo de

fricción (Hoek y Bray, 1981, en GEMA (2007). Se evidencia este tipo de movimiento en masa, se tomará en cuenta este tipo de movimiento para las clasificaciones posteriores en el presente trabajo.

#### e) **Volcamiento (Toppling)**

El Grupo de Estándares para Movimientos Masa GEMA (2007), en Varnes, 1978 indica que para se denomina así a un tipo de movimiento en masa en el cual existe rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas.



*Ilustración 7. Volcamiento. (Elaboración propia)*

#### **2.2.2.6. Cuaternario Coluvio**

En base a Vargas (1992), los depósitos que se acumulan en las laderas como resultado de la acción combinada de la gravedad y el agua corriente se denominan, de manera general, depósitos coluviales.

Estos depósitos forman encapes en gran parte de la ladera, se encuentran conformados por sedimentos de granulometría variada: arcillas, limos, arenas y gravas, por lo general son de empaquetamiento matriz soportado, mal seleccionados, no consolidados y procedentes de la Formación Luribay.



*Ilustración 8. Depósitos coluviales. (Elaboración propia)*

### **2.2.2.7. Cuaternario Relleno**

En el área de estudio, estos depósitos son identificados en proximidad a los márgenes del río La Paz, en determinados sectores. Corresponden a acumulaciones de materiales externos al área, dispuestos principalmente con el propósito de rellenar desniveles o regularizar el alineamiento del río La Paz.

### **2.2.3. Mecánica de Rocas**

Gonzales de Vallejo 2004, manifiesta que la mecánica de rocas se dedica al estudio teórico, práctico y el comportamiento de los materiales rocosos frente a fuerzas en su entorno físico. Este campo se originó debido a la utilización del entorno geológico en construcciones superficiales, subterráneas y explotación de recursos mineros. En la mayoría de los casos, las masas rocosas están afectadas por discontinuidades (diaclasas) o áreas más débiles que dividen la roca en bloques y la "roca intacta", formando lo que se conoce como macizos rocosos. Sin embargo, son principalmente los planos de discontinuidad los que diferencian la mecánica de rocas del estudio de suelos, dando al medio rocoso un carácter discontinuo y anisotrópico. Las propiedades físicas, como la composición mineralógica, densidad, estructura y fábrica, porosidad, permeabilidad, alterabilidad y dureza, controlan las características de resistencia y deformación de la matriz rocosa; son el resultado de la génesis, condiciones y procesos geológicos y tectónicos sufridos por las rocas a lo largo de su historia. En el comportamiento mecánico de los macizos rocosos influyen además de las características geológicas otras como: biológica, estratigrafía, estructura geológica, discontinuidades tectónicas o diagenéticas, estados de esfuerzos in situ, etc. A diferentes escalas la respuesta mecánica es también función de otros

factores como las condiciones hidrogeológicas y las condiciones ambientales, el clima y los fenómenos meteorológicos, que actúan sobre el medio geológico y dan lugar a los procesos de alteración y meteorización, modificando las propiedades iniciales de las rocas y macizos rocosos. El estado y comportamiento mecánico de los macizos rocosos son el resultado de la combinación de todos ellos, con diferente grado de importancia para cada situación. Así, en medios superficiales las discontinuidades y los procesos de meteorización juegan un papel muy importante en el comportamiento mecánico de los macizos, mientras que en profundidad será el estado tensional preexistente el mayor condicionante de la respuesta mecánica.

### **2.2.3.1. Mecánica de rocas como una antigua practica**

Como indica el libro *Practical Rock Engineering*, (Hoek, 2007), la ingeniería de rocas no es una disciplina moderna de la ingeniería, siendo que en 1773 Coulomb incluyó resultados de pruebas en rocas de Burdeos ante el Academia Francesa de París. Otro ejemplo al respecto es el de los ingenieros franceses que comenzaron la construcción del Canal de Panamá en 1884, siendo esta tarea asumida posteriormente por el ejército de los EE.UU. Así también en 1920, Josef Stini comenzó a enseñar "Geología Técnica" en el Instituto Técnico de la Universidad Viena y antes de morir publicó 333 artículos y libros. Asimismo, Stini fundó la revista *Geologie und Bauwesen*, precursora de la revista actual *Mecánica de Rocas*; probablemente fue el primero en enfatizar la importancia de las discontinuidades en el comportamiento ingenieril de los macizos rocosos. En la primera parte de este siglo Von Karman (1911), Rey (1912), Griggs (1936), Ide (1936) y Terzaghi (1945) trabajaron todos en fracturas de materiales rocosos. En los años 60 fue importante el desarrollo en la ingeniería de rocas en el mundo ya que se suscitaron diferentes catástrofes según detallan Terzaghi y Voight, (1979), demostrando que se estaba sobrepasando los límites de capacidad de predecir consecuencias adversas.

Otro método de clasificación de macizos rocosos desarrollado en los últimos años es el sistema Q-slope de Barton, N., Bar, N. & Associates (2015), el cual será aplicado en el presente trabajo. Esta clasificación fue diseñada específicamente para taludes, incorpora diversos parámetros y relaciona el valor del índice Q obtenido con la pendiente mediante un diagrama de estabilidad.

### 2.2.3.2. RQD (Rock Quality Designation)

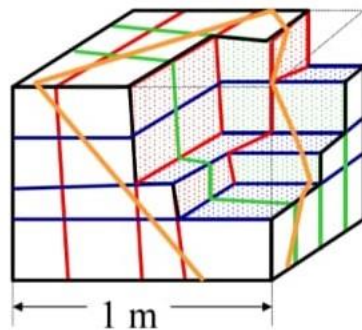
Bieniawski (1989) señala que el índice RQD se utiliza como un parámetro de clasificación, ya que, aunque por sí solo no proporciona una descripción completa del macizo rocoso, ha sido ampliamente empleado en Estados Unidos y Europa. Su aplicación se debe a que constituye un método sencillo, económico y reproducible para evaluar la calidad de los núcleos de perforación (Deere et al., 1967). No obstante, debido a las características morfológicas del macizo rocoso y a los elevados costos que implica la ejecución de perforaciones, el índice RQD debe interpretarse con precaución (Ramírez y Monge, 2004). Su valor depende no solo del grado de fracturación, sino también de otros factores como la dirección y diámetro del sondeo, entre otros. En ausencia de perforaciones, el RQD puede ser estimado a partir de datos obtenidos en afloramientos, empleando para ello la relación propuesta por Palmström (2005):

$$RQD = 110 - 2,5 * J_v$$

*Ecuación 1. RQD.*

Donde  $J_v$  es el índice volumétrico de juntas o número de juntas por metro cúbico.

Índice volumétrico de juntas ( $J_v$ ); es el número de juntas que intersecta  $1\text{m}^3$  de macizo rocoso.



$$J_v = 3 + 3 + 3 + 1 = 10$$

*Ilustración 9. Índice volumétrico de juntas  $J_v$ . (Ramírez y Monge (2004))*

### 2.2.3.3. Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

El método RMR (Rock Mass Rating), desarrollado por Bieniawski en 1973 y actualizado en 1979 y 1989, establece un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo, de excavación y

sostenimiento en túneles, como lo menciona Gonzales de Vallejo, 2004. (Ver tabla 3, cuadro de clasificación). La metodología presenta los siguientes parámetros:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD.
- Separación entre diaclasas.
- Estado entre diaclasas.
- Agua freática.
- Orientación de las discontinuidades.

1	Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25-05	05-1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		

Tabla 3. Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski 1989) (Gonzales de Vallejo, 2004)

La elaboración para obtener los parámetros de la clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989), se describen a continuación:

### 2.2.3.3.1. Resistencia a la Matriz Rocosa

Bieniawski, (1989), señala que la resistencia del material rocoso constituye un parámetro de clasificación en la mayoría de los sistemas de clasificación de macizos rocosos, dado que representa el límite de resistencia del conjunto. La resistencia a compresión uniaxial puede determinarse de manera indirecta en campo mediante el índice de resistencia a carga puntual. En este sentido, Gonzales de Vallejo, (2004) y Daetz (2017) señalan que la resistencia de la matriz rocosa también puede ser estimada in situ mediante el uso de un martillo de geólogo o del martillo Schmidt. Para el presente trabajo se utilizó este último, a fin de obtener los valores requeridos. A continuación, se presenta la tabla de ponderación de la resistencia de la matriz rocosa y la puntuación correspondiente para la clasificación geomecánica RMR modificado (Bieniawski, 1989).

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
<b>Puntuación</b>		15	12	7	4	2	1	0

Tabla 4. Parámetro y puntuación de resistencia de la matriz rocosa (MPa). (Gonzales de Vallejo, 2004)

### 2.2.3.3.2. RQD - (Rock Quality Designation)

González de Vallejo (2004) y Daetz (2017) señalan que, en ausencia de un programa de barrenación y testificación, el RQD puede estimarse mediante la fórmula propuesta por Palmström (1982), la cual fue descrita previamente en el acápite “2.2.3.2. RQD (Rock Quality Designation)” de este trabajo. A continuación, se expone la tabla de ponderación del RQD utilizada en la clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989), la cual permite asignar valores de calidad al macizo rocoso en función de los rangos del índice.

<b>RQD (%)</b>	90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25
<b>Puntuación</b>	20	17	13	6	3

Tabla 5. Parámetro y puntuación RQD. (Gonzales de Vallejo, 2004)

### 2.2.3.3.3. Separación entre diaclasas

Bieniawski, Z. (1989) indica que, el espaciamiento de las discontinuidades es la distancia media entre los planos de debilidad de la masa rocosa, en dirección perpendicular a los planos de discontinuidad. El ISRM sugirió el uso de un mínimo, la media y valores máximos de espaciado para caracterizar un conjunto de diaclasas. Este procedimiento ha sido reemplazado en la práctica por el uso de una media de la separación. A continuación se presenta la tabla de ponderación para el parámetro de separación entre diaclasas.

<b>Separación entre diaclasas</b>	> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m
<b>Puntuación</b>	20	15	10	8	5

Tabla 6. Parámetro y puntuación de separación entre diaclasas. (Gonzales de Vallejo, 2004)

### 2.2.3.3.4. Estado de las discontinuidades

Este es un parámetro que incluye varios sub parámetros los que se describen a continuación:

#### 2.2.3.3.4.1. Longitud de la discontinuidad

Bieniawski, Z. (1989) indica que la continuidad de las discontinuidades influye en el grado en que el material rocoso y las discontinuidades, por separado, afectan el comportamiento del macizo rocoso, para evaluar la continuidad, se debe determinar la longitud de la discontinuidad. Daetz (2017) indica que la longitud o continuidad de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano de buzamiento. En el siguiente cuadro se observa la puntuación y ponderación para este parámetro.

<b>Longitud de la discontinuidad</b>	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20	> 20 m
<b>Puntuación</b>	6	4	2	1	0

Tabla 7. Parámetro y puntuación de longitud de la discontinuidad. (Gonzales de Vallejo, 2004)

#### 2.2.3.3.4.2. Abertura

Bieniawski, Z. (1989) indica que este parámetro, controla el grado de entrelazamiento entre las superficies opuestas, así como la cantidad de agua que puede fluir a través de la discontinuidad. En ausencia de entrelazamiento, el relleno de la discontinuidad controla completamente la resistencia al corte de la discontinuidad. A medida que disminuye la separación, las asperezas de la pared rocosa tienden a entrelazarse más, y tanto el relleno como el material rocoso contribuyen a la resistencia al corte de la discontinuidad. Por lo tanto, la resistencia al corte a lo largo de una discontinuidad depende del grado de separación, la presencia o ausencia de materiales de relleno, la rugosidad de las paredes superficiales y la naturaleza de dicho material. Daetz (2017) describe a la abertura como la distancia perpendicular entre la pared de roca de una junta abierta o, en otras palabras: la abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad. Si la junta se encuentra rellena el término apropiado es ancho. En el siguiente cuadro se observa la puntuación ponderada para este parámetro.

<b>Abertura</b>	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm
<b>Puntuación</b>	6	5	3	1	0

Tabla 8. Parámetro y puntuación para abertura. (Gonzales de Vallejo, 2004)

#### 2.2.3.3.4.3. Rugosidad

Bieniawski, Z. (1989) indica que la rugosidad, entendida como la naturaleza de las asperezas presentes en las superficies de las discontinuidades, constituye un parámetro fundamental para caracterizar su estado. Cuando las superficies de las juntas están limpias o presentan barniz, dichas asperezas tienden a entrelazarse, lo que dificulta el movimiento por cizallamiento a lo largo de ellas:

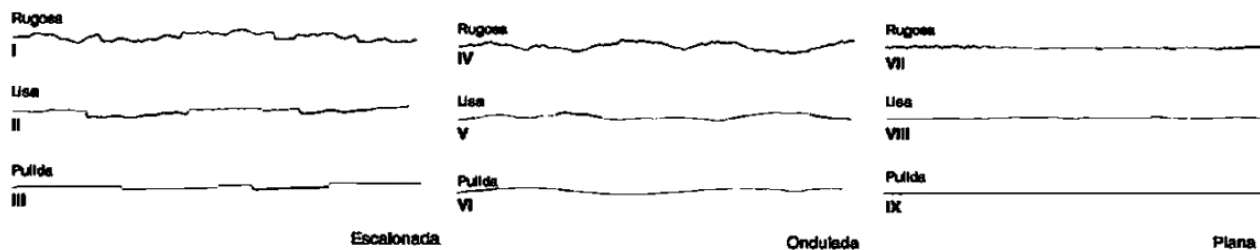


Ilustración 10. Perfiles de rugosidad. (ISRM. 1981). (En Gonzales de Vallejo, 2004)

En la tabla siguiente se muestra el parámetro y puntuación de la rugosidad.

<b>Rugosidad</b>	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
<b>Puntuación</b>	6	5	3	1	0

Tabla 9. Parámetro y puntuación para la rugosidad. (Gonzales de Vallejo, 2004)

#### 2.2.3.3.4.4. Relleno

Bieniawski, Z. (1989) indica que el relleno tiene una doble influencia: La primera dependiendo del espesor, el relleno evita el enclavamiento de las asperezas de la fractura; y la segunda que posee sus propias propiedades características, es decir, resistencia al corte, permeabilidad y características de deformación. Daetz (2017) menciona que para propósitos prácticos es necesario distinguir entre relleno consolidado y relleno suave. Relleno consolidado es el que contiene un material de alta fricción (calcita, areniscas, polvo de rocas trituradas, etc) y relleno suave es el que está compuesto con un material de baja fricción (arcillas, micas, minerales arcillosos, etc). En la tabla siguiente se muestra el parámetro y puntuación de relleno.

<b>Relleno</b>	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm
<b>Puntuación</b>	6	4	2	2	0

Tabla 10. Parámetros y puntuación de relleno. (Gonzales de Vallejo, 2004)

#### 2.2.3.3.4.5. Alteración

Bieniawski (1989) señala que la meteorización de la roca de la pared, es decir, de la roca que constituye las superficies de discontinuidad, se clasifica según las recomendaciones del Comité de Clasificación de Rocas de la ISRM de la siguiente manera:

1. No meteorizada / fresca: No se observan signos visibles de meteorización; la roca se presenta fresca con cristales brillantes.
2. Ligeramente meteorizada: Las discontinuidades muestran manchas o decoloración y pueden contener relleno fino de material alterado. La decoloración puede extenderse desde las superficies de la discontinuidad hasta un 20% del espaciamiento entre ellas.
3. Moderadamente meteorizada: La decoloración se extiende desde los planos de discontinuidad más del 20% del espaciamiento entre ellas. Las discontinuidades pueden contener relleno de material alterado y se puede observar apertura parcial de los límites de grano.
4. Muy meteorizada: La decoloración afecta a toda la roca y el material rocoso es parcialmente friable. La textura original se conserva principalmente, aunque se observa separación de los granos.
5. Completamente meteorizada: La roca está totalmente descolorida y descompuesta, presentando un estado frágil con apariencia similar a la tierra.

Daetz (2017) indica que la meteorización actúa, en la mayoría de los casos, de manera combinada con un debilitamiento estructural previo del macizo, generado por fallamiento, fracturación o diaclasado. La acción de los agentes físicos y la composición mineralógica, a través de los cuales se desarrolla la meteorización, resulta decisiva en la resistencia mecánica y, en general, en las propiedades geotécnicas del macizo rocoso. En la tabla siguiente se presenta el parámetro de meteorización y su correspondiente puntuación para la clasificación geomecánica:

<b>Alteración</b>	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta
<b>Puntuación</b>	6	5	3	1	0

*Tabla 11. Parámetros y puntuación para la alteración. (Gonzales de Vallejo, 2004)*

### **2.2.3.3.5. Agua freática**

Bieniawski, Z. (1989) indica que, en el caso de túneles o galerías mineras, se debe determinar la tasa de entrada de agua subterránea en litros por minuto por cada 10 metros de excavación. Alternativamente, las condiciones generales pueden describirse como

completamente secas, húmedas, mojadas, con goteo y fluidas. Si se dispone de datos reales sobre la presión del agua, estos deben indicarse y expresarse en términos de la relación entre la presión del agua y la tensión principal. Daetz (2017) menciona que las condiciones del agua freática pueden ser estimadas en la clasificación Rock Mass Rating (RMR), en tres diferentes maneras: la primera como influjo de agua en túneles, la segunda como la presión de poro y la última es la de condiciones generales. La clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989), propone la siguiente clasificación y puntuación como de observa en el siguiente cuadro.

<b>Agua Freática</b>	<b>Caudal general por 10 m de túnel</b>	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min
	<b>Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor</b>	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5
	<b>Estado general</b>	Seco	Ligera mente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo
<b>Puntuación</b>		15	10	7	4	0

Tabla 12. Puntuación y clasificación para agua freática. (Gonzales de Vallejo, 2004)

### 2.2.3.3.6. Corrección de RMR (Rock Mass Rating)

Gonzales de Vallejo, (2004) menciona que posteriormente de haber obtenido el valor de RMR (Rock Mass Rating) se realiza la corrección por la orientación y en este caso a la puntuación referida a taludes; en base al cuadro a continuación:

<b>Corrección por la orientación de las discontinuidades</b>						
<b>Dirección y buzamiento</b>		<b>Muy favorables</b>	<b>Favorables</b>	<b>Medias</b>	<b>Desfavorables</b>	<b>Muy desfavorables</b>
<b>Puntuación</b>	<b>Túneles</b>	0	-2	-5	-10	-12
	<b>Cimentaciones</b>	0	-2	-7	-15	-25
	<b>Taludes</b>	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 13. Corrección por la orientación de las discontinuidades (Bieniawski, 1989) (Gonzales de Vallejo, 2004)

<b>Clasificación</b>					
<b>Clase</b>	I	II	III	IV	V
<b>Calidad</b>	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
<b>Puntuación</b>	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20

Tabla 14. Clasificación RMR. (Gonzales de Vallejo, 2004)

Una vez obtenidas las puntuaciones de clasificación, se realizó la corrección por orientación de discontinuidades, obteniéndose un valor numérico que permite la clasificación final del macizo rocoso (González de Vallejo, 2004), como se muestra en el cuadro siguiente

Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR				
Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy Buena	100-81	> 4 kg/cm <sup>2</sup>	>45°
II	Buena	80-61	3-4 kg/cm <sup>2</sup>	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 kg/cm <sup>2</sup>	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm <sup>2</sup>	15°-25°
V	Muy mala	< 20	< 1 kg/cm <sup>2</sup>	< 15°

Tabla 15. Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR. (Gonzales de Vallejo, 2004)

#### 2.2.3.4. Clasificación SMR (Slope Mass Rating) Romana, M. et al. (1985)

Romana, M. et al. (2015), menciona que esta clasificación se desarrolló a partir del sistema de clasificación (RMR) de Bieniawski, que era prácticamente imposible de utilizar en taludes debido al amplio rango de factores de corrección y a la falta de definición de estos, así también que esta clasificación se ha adaptado para su aplicación en macizos rocosos heterogéneos y anisotrópicos, se ha utilizado como parámetro de susceptibilidad a la caída de rocas y se ha incluido en las normativas técnicas de varios países. La clasificación se calcula utilizando cuatro factores de corrección del RMR básico (Bieniawski, 1989). Estos factores dependen de la relación existente entre las discontinuidades que afectan al macizo rocoso y al talud, el método se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$SMR = RMRb + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

Ecuación 2. SMR (Slope Mass Rating)

Donde:

- RMRb, es el índice RMR básico resultante de la clasificación del macizo rocoso de Bieniawski.

- F1 depende del paralelismo entre la dirección de inclinación de la discontinuidad  $\alpha_j$  y la inclinación de la pendiente  $\alpha_s$ .
- F2 depende del buzamiento de la discontinuidad,  $B = \beta_j$ , en caso de falla plana. Para falla por vuelco, este parámetro adopta el valor 1,0.
- F3 depende de la relación entre la pendiente,  $\beta_s$ , y la discontinuidad,  $\beta_j$ , buzamientos.
- F4 es un factor de corrección que depende del método de excavación.

Romana et al. (2015) señalan que, cuando en un talud se identifican diferentes familias de juntas, el SMR debe calcularse para cada familia, considerando finalmente el valor más desfavorable. Los valores obtenidos en la tabla siguiente presentan los factores de ajuste y las puntuaciones asignadas a cada punto de afloramiento

<b>SMR = RMRb + (F1 x F2 x F3) + F4 (ROMANA, 1985)</b>					
FACTORES DE AJUSTE DE LAS JUNTAS (F1, F2, F3)	$\alpha_j$ = Dirección de buzamiento de la junta $\alpha_s$ = Dirección de buzamiento del talud $\beta_j$ = Buzamiento de la junta $\beta_s$ = Buzamiento del talud				
	MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
ROTURA PLANA $ \alpha_j - \alpha_s  =$ VUELCO $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ  =$ <b>F1 VALORES</b> AJUSTE ANALÍTICO	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
	$F1 = (1 - \text{sen }  \alpha_j - \alpha_s )^2$				
<b>F2 VALORES</b> ROTURA PLANA $ \beta_j  =$ VUELCO AJUSTE ANALÍTICO	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
	$F2 = \text{tg}^2 \beta_j$				
ROTURA PLANA $\beta_j - \beta_s =$ VUELCO $\beta_j + \beta_s =$ <b>F3 VALORES</b> AJUSTE ANALÍTICO	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< (-10^\circ)$
	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
	0	-6	-25	-50	-60
$F3 = (\text{SE MANTIENEN LOS VALORES PROPUESTOS POR BIENIAWSKI, 1976 / 79})$					
<b>FACTOR DE AJUSTE POR EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN</b>	$F4 = \text{VALORES EMPÍRICOS ESTABLECIDOS PARA CADA MÉTODO DE EXCAVACIÓN}$				
	TALUD NATURAL	PRECORTE	VOLADURA SUAVE	VOLADURA ó MECÁNICO	VOLADURA DEFICIENTE
	+15	+10	+8	0	-8

Tabla 16. Clasificación SMR Romana (1985).

En la tabla siguiente se muestra las diferentes clases de estabilidad del SMR encontrados empíricamente, asociados a los diferentes tipos de falla.

Clases de estabilidad					
Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descripción	Muy Mala	Mala	Normal	Buena	Muy Buena
Estabilidad	Totalmente Inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Re excavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Tabla 17. Clases de estabilidad SMR Romana (1985).

### 2.2.3.5. Clasificación Q de Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974)

Como menciona Gonzales de Vallejo (2004), esta clasificación fue desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974, a partir del estudio de un gran número de túneles, el cual constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos del macizo. Esta clasificación requiere para su evaluación seis parámetros dando como resultado nueve categorías, entre 0.001 a 1000 en escala logarítmica<sup>10</sup>.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

Ecuación 3. Clasificación Q (Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).

Donde:

- RQD = Rock Quality Designation
- J<sub>n</sub> = Índice de diaclasado.
- J<sub>r</sub> = Índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas.
- J<sub>a</sub> = Índice que indica la alteración de las discontinuidades.
- J<sub>w</sub> = Coeficiente reductor por la presencia de agua.
- SRF = (Strength reduction factor), coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso.

Los tres factores de la expresión representan:

- RQD / Jn = El tamaño de los bloques
- Jr /Ja = La resistencia al corte entre los bloques
- Jw/ SRF = La influencia del estado tensional

El índice Q adquirido a partir de los valores que varían entre 0,001 y 1.000, con la siguiente clasificación del macizo rocoso:

0,001 y 0,01	Roca excepcionalmente mala
0,01 y 0,1	Roca extremadamente mala
0,1 y 1	Roca muy mala
1 y 4	Roca mala
4 y 10	Roca media
10 y 40	Roca buena
40 y 100	Roca muy buena
100 y 400	Roca extremadamente buena
400 y 1.000	Roca excepcionalmente buena

Tabla 18. Índice Q - Barton. (Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).

### 2.2.3.5.1. Valores de los parámetros característicos de la clasificación Q

Para identificar el índice de clasificación Q se usaron las siguientes tablas creadas por Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).

Calidad del testigo RQD		RQD (%)
A	Muy mala	0-25
B	Mala	25-50
C	Media	50-75
D	Buena	75-90
E	Excelente	90-100
Notas:		
i) En intersecciones de túneles se utiliza la expresión (3/,,)		
ii) En las bocas de los túneles se utiliza la expresión (2Jm)		

Tabla 19. Calidad RQD, Barton, et al; 1974) (Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).

<b>Índice de diaclasado</b>		<b>Jn</b>
A	Roca masiva, sin diaclasas o con fisuración escasa	0,5-1,0
B	Una familia de diaclasas	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias de diaclasas	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15
J	Roca triturada, terrosa	20
Nota:		
i) Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala intermedia, por este orden.		

Tabla 20. Índice de diaclasado, (Barton, et al; 1974) Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).

<b>Índice de rugosidad de las discontinuidades</b>		<b>Jr</b>
a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad.		
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm.		
A	Diaclasas discontinuas	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares	3
C	Diaclasas onduladas, lisas	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas	1,5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares	1,5
F	Diaclasas planas, lisas	1
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas	0,5
Nota:		
i) Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala intermedia, por este orden.		
c) No existe contacto entre las caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante.		
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad	1
J	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad	1
Notas:		
i) Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 m, se debe aumentar el índice Jr en una unidad.		
ii) En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor Jr = 0,5.		

Tabla 21. Índice de rugosidad de las discontinuidades, Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).

<b>Índice de alteración de las discontinuidades</b>		<b>Φr</b>	<b>Ja</b>
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios)			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo	—	0,75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas	25°-35°	1
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	25°-30°	2
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda)	20°-25°	3
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	8°-16P	4
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm (minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	25°-30°	4
G	Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm)	16°-24°	6
H	Sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5mm)	12°-16°	8
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm). El valor de Ja depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas	6°- 12°	8-12
c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral de gran espesor)			
K L M	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H, y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	6,8 o 8-12
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no emblandecibles	—	5
O P Q	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver clases G, H y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	10-13 o 13-20
Nota: los valores expresados para los parámetros Jr y Ja se aplican a las familias de diaclasas o discontinuidades que son menos favorables con relación a la estabilidad, tanto por la orientación de las mismas como por su resistencia al corte esta resistencia puede evaluarse mediante la expresión: $T \approx \sigma_n \operatorname{tg}^{-1} (J_n/J_a)$			

Tabla 22. Índice de alteración de las discontinuidades, Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).

<b>Factor de reducción por la presencia de agua</b>		<b>Presión</b>	<b>J w</b>
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 L/min, de forma localizada	< 1	1
B	Afluencia a presión media, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades	1-2,5	0,66
C	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno	2,5-10	0,5
D	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas	2,5-10	0,33
E	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo	> 10	02-0,1
F	Afluencia excepcionalmente alta, o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable	> 10	0,1-0,05
Notas: i) Los valores de las clases C, D, E y F son meramente estimativos. Si se acometen medidas de drenaje, puede incrementarse el valor Jw. ii) No se han considerado los problemas especiales derivados de la formación de hielo.			

Tabla 23. Factor de reducción por la presencia de agua, Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).

Condiciones tensionales de la roca		SRF		
a) Las zonas débiles intersectan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando				
A	Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad)	10		
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación < 50 m)	5		
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación > 50 m)	2,5		
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)	7,5		
E	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación < 50 m)	5		
F	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de la excavación > 50 m)	2,5		
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad)	5		
Nota:				
I) Se reducen los valores expresados del SRF entre un 20-50% si las zonas de fracturas sólo ejercen cierta influencia pero no intersectan a la excavación.				
b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas		$\sigma_c / \sigma_1$	$\sigma_t / \sigma_1$	SRF
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	>200	< 0,01	2,5
J	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	200-10	0,01-03	1
K	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales	10-5	0,3-0,4	03-2
L	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas	5-3	03-0,65	5-50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas	3-2	0,65-1	50-200
N	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas	<2	> 1	200-400
Notas:				
i) Si se comprueba la existencia de campos tensionales fuertemente anisotrópicos: cuando $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ , se disminuye el parámetro $\sigma_c$ hasta $0,75 \sigma_c$ ; si $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ , se tomará el valor $0,5 \sigma_c$ , $\sigma_t$ es la resistencia a compresión simple, $\sigma_1$ y $\sigma_3$ son las tensiones principales mayor y menor y $\sigma_c$ es la tensión tangencial máxima, estimada a partir de la teoría de la elasticidad				
ii) En los casos en que la profundidad de la clave del túnel es menor que la anchura de la excavación, se sugiere aumentar el valor del factor SRF entre 2,5 y 5 unidades (véase clase H).				
c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas		$\sigma_t / \sigma_1$	SRF	
O	Presión de deformación baja	1-5	5-10	
P	Presión de deformación alta	> 5	10-20	
Nota:				
Los fenómenos de deformación o fluencia de rocas suelen ocurrir a profundidades: $H > 350 Q^{1/3}$ (Singh et al., 1992). La resistencia a compresión de macizo rocoso puede estimarse mediante la expresión: $q$ (MPa) $\approx 7 \gamma Q^{1/3}$ , donde $\gamma$ es la densidad de la roca en $g/cm^3$ (Singh, 1993).				
d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.		SRF		
R	Presión de expansión baja	5-10		
S	Presión de expansión alta	10-15		

Tabla 24. Condiciones tensionales de la roca, Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974).

### **2.2.3.6. Clasificación Q-slope Barton, N., Bar, N. & Associates (2015)**

Este método se desarrolló para evaluar la estabilidad de taludes rocosos en campo, a partir de la modificación del sistema Q de Barton, N., Bar, N. & Associates (2015). Según Barton, N., Bar, N. & Ryan C. (2016), el Q-Slope está diseñado para su aplicación en cortes de caminos de acceso sin refuerzo, así como en cortes de carreteras, vías o bancos individuales en minas a cielo abierto. El desarrollo del método se basó en registros de casos de seis países, abarcando 17 tipos de rocas —ígneas, sedimentarias y metamórficas— y algunos saprolitos, considerando alturas de taludes entre 5 y 30 m. El sistema de clasificación Q-Slope utiliza seis parámetros, al igual que el sistema Q estándar: RQD, Jn, Jr, Ja, Jw y SRF. No obstante, en Q-Slope se introdujeron modificaciones en los parámetros RQD, Jn, Jr, Ja, Jw y SRF (denominados RQDslope y SRFslope) mediante la ecuación Q-Slope, que permite evaluar de manera específica la estabilidad de taludes. La ecuación se presenta a continuación:

$$Q - \text{slope} = \frac{\text{RQD}}{\text{Jn}} \times \left( \frac{\text{Jr}}{\text{Ja}} \right) / O \times \frac{\text{Jwice}}{\text{SRFslope}}$$

*Ecuación 4. Método Q-slope. (Barton y Bar, 2015).*

Donde:

- RQD = Índice de calidad de roca.
- Jn = Índice de diaclasamiento.
- Jr = Índice de rugosidad.
- Ja = Índice de alteración.
- O = Factor de orientación de las discontinuidades.
- Jwice = Condiciones ambientales y geológicas.
- SRFslope = Factor de reducción de resistencia.

#### **2.2.3.6.1. Parámetros (RQD, Jn, Jr y Ja)**

Los parámetros: RQD, Jn, Jr y Ja permanecen sin modificaciones respecto al sistema Q original de Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974), ver título 2.2.3.5. *Clasificación Q de Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974)* y 2.2.3.2. *RQD (Rock Quality Designation)*.

### 2.2.3.6.2. Factor de orientación de las discontinuidades (Factor O)

El factor de orientación de discontinuidad “Factor O” proporciona ajustes de orientación para discontinuidades en taludes de roca. Dentro de este parámetro, se tienen dos conjuntos, el Conjunto A, se aplica a discontinuidades más desfavorables. Si es necesario, el factor de orientación del Conjunto B se aplica a discontinuidades secundarias (es decir, en caso de formaciones de cuña potencialmente inestables). (Barton y Bar, 2015).

En el presente trabajo, dado que las discontinuidades resultan más desfavorables según la información obtenida en campo, se aplica el conjunto A.

O - Descripción del factor	Set A	Set B
Orientación muy favorable	2.0	1.5
Bastante favorable	1.0	1.0
Desfavorable	0.75	0.9
Muy desfavorable	0.50	0.8
Causa falla si no tiene apoyo	0.25	0.5

Tabla 25. Factor de orientación de las discontinuidades (Factor O). (Barton y Bar, 2015).

### 2.2.3.6.3. Factor de condición ambiental y geológica ( $J_{Wices}$ )

El factor de condición ambiental y geológica,  $J_{wice}$ , se refiere a las pendientes que se encuentran a intemperie y expuestas durante largos períodos de tiempo, incluye los efectos de erosión por lluvias tropicales y los efectos de cuñas de hielo. Como también incluye factores de ajuste para las medidas de refuerzo y drenaje de las pendientes (Barton y Bar, 2015).

$J_{wice}^*$	Ambiente desértico	Ambiente húmedo	Tormentas tropicales	Acuñamiento de hielo
Estructura estable, roca competente	1.0	0.7	0.5	0.9
Estructura estable, roca incompetente:	0.7	0.6	0.3	0.5
Estructura inestable, roca competente:	0.8	0.5	0.1	0.3
Estructura inestable, roca incompetente:	0.5	0.3	0.05	0.2

\* Nota: Cuando se instalen medidas de drenaje, aplique  $J_{wice} \times 1.5$

    Cuando se instalen medidas de refuerzo de pendientes, aplicar  $J_{wice} \times 1.3$

    Cuando se instalen drenaje y refuerzo, aplique ambos factores  $J_{wice} \times 1.5 \times 1.3$

Tabla 26. Factor de condición ambiental y geológica ( $J_{Wices}$ ) (Barton y Bar, 2015).

#### 2.2.3.6.4. Factor de reducción por esfuerzos (SRF slope)

El factor de reducción por esfuerzos  $SRF_{slope}$ , (*Strength reduction factor*) se obtiene utilizando los rangos de: SRFa, SRFb y SRFc. La tabla a continuación describe los factores de reducción de resistencia (SRFa) para la condición física de la superficie de la pendiente (actual o esperada) debido a la susceptibilidad, intemperización y erosión. (Barton y Bar, 2015).

Descripción		SRF a
A	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.	2.5
B	Bloques sueltos, signos de grietas por tensión y juntas de cizallamiento, susceptibilidad a la intemperie.	5
C	Como B, pero fuerte susceptibilidad a los efectos de la intemperización.	10
D	El talud se encuentra en avanzado estado de erosión y aflojamiento debido a la erosión hídrica periódica y/o efectos de cuña de hielo.	15
E	Talud residual con importante transporte de material cuesta abajo.	20

Tabla 27. SRFa Condiciones físicas. (Barton y Bar, 2015).

La tabla siguiente describe los factores de reducción de resistencia (SRFb) para rangos adversos de esfuerzo-resistencia en el talud. (Barton y Bar, 2015).

Descripción		$\sigma_c/\sigma_1^*$	SRFb
F	Rango moderado de esfuerzo-resistencia	50-200	2.5-1
G	Rango alto de esfuerzo-resistencia	10-50	5-2.5
H	Falla localizada de roca intacta	5-10	10-5
J	Aplastamiento o fluencia plástica	2.5-5	15-10
K	Flujo plástico de material con deformación suavizada.	1-2.5	20-15

\*Nota:  $\sigma_c$  = resistencia a la compresión simple (UCS)  
 $\sigma_1$  = esfuerzo principal máximo

Tabla 28. SRFb: Esfuerzo y resistencia. (Barton y Bar, 2015).

La tabla a continuación describe los factores de reducción de resistencia (SRFc) para discontinuidades importantes como fallas, zonas de debilidad y grupos de juntas, que también pueden contener rellenos de arcilla que afectan negativamente la estabilidad del talud. (Barton y Bar, 2015).

Descripción *		SRFc
L	Discontinuidad mayor con poca o ninguna arcilla, y la orientación es:	
	1. Favorable	1
	2. Desfavorable	2
	3. Muy desfavorable	4
	4. Causante de falla si no se sostiene	8
M	Discontinuidad mayor con $RQD_{100}=0$ debido a arcilla y roca triturada, y la orientación es:	
	1. Favorable	2
	2. Desfavorable	4
	3. Muy desfavorable	8
	4. Causante de falla si no se sostiene	16
N	Discontinuidad mayor con $RQD_{300}=0$ debido a arcilla y roca triturada, y la orientación es:	
	1.. Favorable	4
	2. Desfavorable	8
	3. Muy desfavorable	12
	4. Causante de falla si no se sostiene	24

\* Nota:

$RQD_{100}$  = Muestra de discontinuidad perpendicular de 1 metro muestra perpendicular de 1 metro de discontinuidad.

$RQD_{300}$  = Muestra de discontinuidad perpendicular de 3 metros.

Tabla 29. SRFc: Discontinuidad mayor. (Barton y Bar, 2015).

### 2.2.3.6.5. Ángulo de Pendiente (Grados)

El método Q Slope es muy parecido al propuesto índice de calidad del Túnel “Q” (Barton, 1974). La ventaja de este método es que permite evaluar la estabilidad de las pendientes en campo dando la opción de realizar un ajuste de los ángulos durante la construcción “Bar Neil & Barton Nick, 2017”. En Yáñez, D. (2021).

### 2.2.3.6.6. Diagrama de estabilidad Q-slope

A través de un diagrama cartesiano, una vez obtenido los valores de Q Slope se califica la estabilidad del macizo rocoso, colocando en el eje X (ordenadas) los valores de Q Slope y en el eje de la Y (abscisas) el ángulo de inclinación del talud en grados, para ubicar el punto de intersección dentro del diagrama (Yáñez, D. 2021). El área inestable se muestra en color rojo, el área de talud estable se muestra en color verde y un corredor de estabilidad de taludes incierto en la parte central en color gris. (Barton & Bar, 2015).

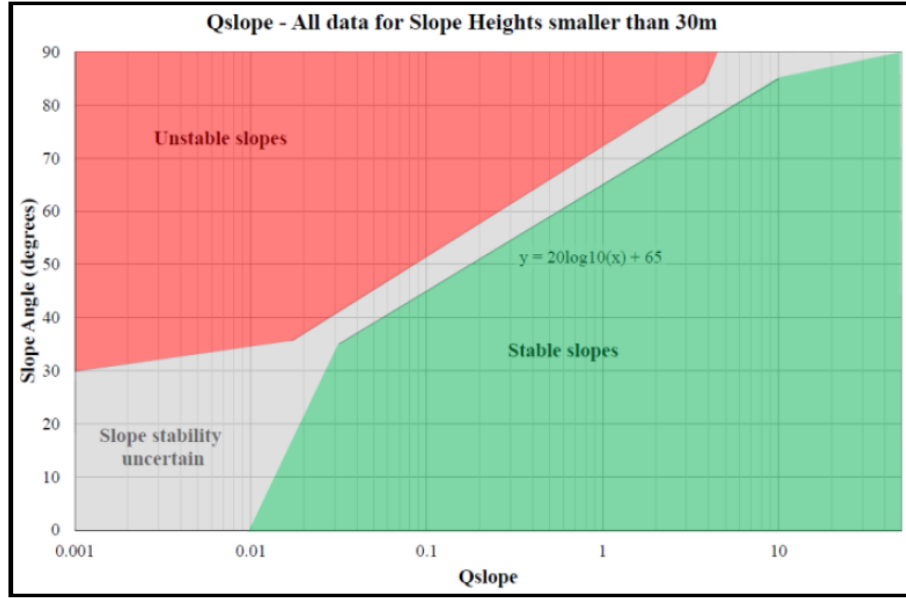


Ilustración 11. Diagrama de estabilidad de taludes Q para alturas de talud inferiores a 30 m (Barton y Bar, 2015).

## 2.2.4. Resistencia de la matriz rocosa

### 2.2.4.1. Norma ASTM D5873 "Método de Prueba Estándar para Determinar la Dureza de la Roca por el Método del Martillo de Rebote"

La norma ASTM D5873 establece que este método es especialmente adecuado para estimar la resistencia a la compresión uniaxial de materiales rocosos con valores aproximados entre 1 y 100 MPa. Además, proporciona un medio rápido para la clasificación de la dureza de la roca durante la caracterización del sitio, con fines de ingeniería, diseño, mapeo geotécnico o la elaboración de informes sobre la descripción física del núcleo de roca. El martillo de rebote consiste en un pistón cargado por resorte que se proyecta contra un yunque metálico en contacto con la superficie de la roca. Este pistón debe desplazarse a una velocidad fija y reproducible, y la distancia de rebote se mide en una escala lineal adjunta al instrumento. Esta distancia sirve como medida empírica de la dureza de la roca. Las superficies de roca probadas in situ, ya sean afloramientos naturales o superficies preparadas como paredes o pisos de túneles, deben contar con un área lisa y plana de al menos 15 cm de diámetro. En síntesis, la norma establece el siguiente procedimiento:

- Para las pruebas realizadas in situ en una masa rocosa, el martillo de rebote se puede utilizar en cualquier orientación deseada siempre que el émbolo golpee perpendicularmente a la superficie probada.
- Los resultados se corrigen a una posición horizontal o vertical utilizando las curvas de corrección proporcionadas por el fabricante.
- Antes de realizar las pruebas, asegúrese de que el martillo esté a la misma temperatura que los especímenes de prueba exponiéndolo a las condiciones ambientales del área de prueba (interiores o exteriores) durante al menos 2 h.
- Comprime el resorte del martillo presionando gradualmente el émbolo hasta que se active el martillo y ocurra el impacto.
- Lea y registre la altura del rebote del émbolo, medida en una escala arbitraria de 10 a 100 divisiones ubicadas en el lado del martillo, antes de restaurar el pistón a su extensión original.
- Repita este procedimiento en diez ubicaciones representativas del espécimen.
- Las ubicaciones de prueba deben estar separadas por al menos el diámetro del pistón y solo se puede realizar una prueba en un solo punto.
- Si un espécimen se rompe durante la prueba de rebote, se absorbe energía durante la ruptura y, en consecuencia, la lectura de rebote será más baja que si no se hubiera roto.
- Cualquier prueba de impacto individual que cause agrietamiento o cualquier otro fallo visible hará que esa prueba y el espécimen sean rechazados.
- Algunos factores que pueden afectar los resultados de la prueba incluyen: La roca a 0° C o menos puede exhibir valores de rebote muy altos. La temperatura del martillo de rebote en sí puede afectar el número de rebote. El martillo y los materiales a probar deben estar a la misma temperatura.
- Para que las lecturas sean comparables, la dirección del impacto, horizontal, hacia arriba, hacia abajo, etc., debe ser la misma.
- Usando los datos de las diez lecturas obtenidas, descartar lecturas que difieran del promedio de diez lecturas por más de siete unidades y determinar el promedio de las lecturas restantes.
- Para calcular el número de dureza de rebote (HR) del material rocoso probado, multiplique este promedio por el factor de corrección dividiendo el valor de dureza estándar del fabricante para el yunque por el promedio de las diez lecturas tomadas en el yunque.

Cabe mencionar que, para el presente trabajo se ha tomado en cuenta lo mencionado en el libro Ingeniería Geológica de Gonzales de Vallejo 2004 y la norma USBR (32), donde se menciona que se debe realizar en cada punto de medida 10 percusiones con el martillo Schmidt, eliminando los 5 valores más bajos y obtener el valor (HR) del promedio de los cinco valores más altos.

### **2.2.5. Correlación entre sistemas de clasificación**

Amine, S., et al. (2017) menciona que, en las últimas décadas, numerosos autores han publicado correlaciones empíricas entre los sistemas de clasificación de macizos rocosos, surgidos a partir de una serie de mediciones y observaciones. Esto significa que la validez de estas expresiones depende en gran medida del conocimiento de los datos originales de los que se dedujeron y que, en consecuencia, ninguna de estas expresiones es universal en la actualidad.

Por otra parte, Mahmoud, H., et al. (2010) indica que en el último medio siglo, se han realizado numerosos esfuerzos en todo el mundo para crear un sistema adecuado de clasificación de macizos rocosos de ingeniería, de modo que la evaluación preliminar de la viabilidad, el desarrollo, la estabilidad de ingeniería fuera posible y bastante fiable. Desde la clasificación por carga de roca de Terzaghi (1946) que podría considerarse el primer sistema de clasificación empírico para macizos rocosos para posteriormente, diversos investigadores propusieron diferentes sistemas de clasificación de macizos rocosos, como Bieniawski (1973), Barton et al. (1974), Hoek (1994) o Palmstrom (1995).

Palmer et al. (2001) señalan que el coeficiente de correlación de Pearson es un índice que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas a partir de la covariancia. Una limitación de este coeficiente es que su valor depende de las unidades de medida de las variables; por tanto, cualquier cambio en la escala de una de ellas modifica la covariancia. La correlación de Pearson varía en el intervalo (-1, +1):

- Un valor de 0 indica independencia total entre las dos variables; es decir, la variación de una no influye en absoluto sobre la otra.
- Un valor de -1 indica una dependencia lineal perfecta de tipo inverso, donde al aumentar una variable la otra disminuye.

- Un valor de +1 refleja una dependencia lineal perfecta de tipo directo, en la cual al aumentar una variable también lo hace la otra.

El coeficiente de correlación permite analizar la importancia estadística de la relación entre dos variables, aunque la significancia depende en gran medida del tamaño muestral. Asimismo, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) mide la fuerza de la relación entre la variable dependiente y la independiente, indicando la capacidad predictiva del modelo. Sus valores oscilan entre 0 y 1: cuanto mayor sea  $R^2$ , mayor será el poder de predicción de la variable regresora (X) sobre la variable respuesta (Y).

De acuerdo con Hernández et al. (2018), siguiendo las sugerencias de Cohen, los rangos de interpretación para el coeficiente r son:

$0,00 \leq r < 0,10$	Correlación nula
$0,10 \leq r < 0,30$	Correlación débil
$0,30 \leq r < 0,50$	Correlación moderada
$0,50 \leq r \leq 1,00$	Correlación fuerte

*Tabla 30. Rango de variables r.*

Por otro lado, Mohammad et al. (2020) destacan que el SMR (Slope Mass Rating) se ha utilizado durante más de 30 años para evaluar el comportamiento de taludes. Asimismo, el sistema de clasificación Q-slope constituye un método empírico que permite estimar la estabilidad de taludes de manera rápida, con mínimas suposiciones. Estos autores plantearon una relación empírica entre ambos índices, con un ajuste estadístico de  $R^2 = 0,756$ , mediante la siguiente ecuación:

$$SMR = 11,89 \ln(Q\text{-slope}) + 71,92$$

*Ecuación 5. Mohammad A. et al. (2020)*

## CAPÍTULO III METODOLOGÍA

### 3.1 Diseño

Se clasifica al presente trabajo, como una **investigación descriptiva**, pues por cada uno de los métodos utilizados para clasificar el macizo rocoso, en esta fase de estudio, se llevó a cabo una observación detallada en el terreno para recopilar la información necesaria y requerida y con ello adquirir resultados que arroja cada método de manera individual.

La metodología utilizada en el presente trabajo nos muestra un enfoque **cualitativo y cuantitativo**; partiendo de un desconocimiento de las condiciones intrínsecas del área de trabajo en cuanto a propiedades del macizo rocoso, se propone una metodología teórico práctico.

A continuación, se puntualizan de forma sucinta las etapas donde se describe los procedimientos que guían la ejecución del presente trabajo.

#### 3.1.1. Etapa 1.

La primera etapa consistió en realizar una recopilación, validación y análisis de información existente, a través de la clasificación bibliográfica considerando estudios realizados precedentemente a los que se tuvo acceso y que fueron tomados en cuenta por el tipo de información fidedigna y justificada para el desarrollo del presente trabajo.

#### 3.1.2. Etapa 2.

Esta etapa consistió en campañas de campo, para la caracterización de unidades geológicas, geomorfológicas y litológicas, así también la toma de datos para la caracterización de macizo rocoso en el área de trabajo, tales como: la resistencia de la matriz rocosa, la separación entre diaclasas, el espaciamiento entre diaclasas, orientación entre diaclasas, ángulos de inclinación entre otros; que son necesarios para realizar la clasificación por los métodos de clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989), la clasificación Slope Mass Rating (SMR) de Romana, M. et al. (1985), índice de calidad del Túnel “Q” (Barton, 1974) y el sistema Q-slope Barton, N., Bar, N. & Associates (2015).

### **3.1.3. Etapa 3.**

Esta fase se ejecutó de manera sistemática, siguiendo un enfoque metódico que incluyó los siguientes pasos:

- a) **Recolección de información:** Se compiló toda la información obtenida en las campañas de campo realizadas entre diciembre de 2022 y mayo de 2025. Durante este período, mediante observaciones detalladas, se identificaron 14 zonas con características geológicas similares
  
- b) **Procesamiento de datos:** La información recolectada fue analizada mediante diagramas y tablas de clasificación basadas en los siguientes sistemas:
  - Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989).
  - Slope Mass Rating (SMR) de Romana et al. (1985), adaptación de RMR.
  - Índice de calidad del túnel "Q" (Barton, 1974).
  - Sistema Q-slope (Barton, N., Bar, N. & Associates, 2015).
  
- c) **Análisis comparativo y correlación:** A partir de los resultados obtenidos se efectuó una comparación entre ambos métodos. Posteriormente, utilizando la ecuación de correlación propuesta por Mohammad et al. (2020), se estimaron los valores de SMR de Romana et al. a partir de los resultados de Q-slope. Finalmente, con los valores calculados se desarrolló una ecuación empírica destinada a correlacionar los datos de SMR con los resultados de Q-slope utilizando la línea de tendencia que presentó el mejor ajuste a la información recopilada.

### **3.2. Población, muestra y estadística**

Para el presente trabajo se emplearon técnicas de recolección de información primaria y secundaria. La información primaria fue obtenida a través de observación y mediciones realizadas en campo; la información secundaria fue obtenida a través de ecuaciones y procesamiento de datos, para cada uno de los métodos empleados de caracterización de macizo rocosos y su posterior análisis comparativo.

## CAPÍTULO IV DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1 Propuesta

Esta investigación se basa en dos clasificaciones de macizo rocoso: el primero en el método clasificación Slope Mass Rating (SMR) de Romana, M. et al. (1985) y el sistema de clasificación Q-slope Barton, N., Bar, N. & Associates (2015), con el objetivo de realizar la caracterización y posterior análisis comparativo, en el macizo rocoso emplazado el oeste del cerro Chauña (La Paz, Bolivia). Para lograr estos cometidos, inicialmente se realizó un mapeo identificando catorce áreas de afloramiento que presentan características geológicas similares con base a observaciones hechas en campo (Ver anexo D).

### 4.2. Clasificación Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989)

Al momento de emplear la clasificación RMR (Rock Mass Rating), se llevó a cabo la obtención de datos detallados referentes a las propiedades y características específicas del macizo rocoso requeridas, para cada uno de los factores se le asigna una puntuación en función de su descripción, las puntuaciones se suman para obtener el RMR en rango que varía desde 0 a 100 puntos:

El esquema se aplicó a afloramientos significativos en el macizo rocoso, donde presentan, grandes estratos individuales, con cambios en el tipo litológico de la roca respecto a otro afloramiento y diferencias importantes. Individualizando a cada punto de afloramiento por separado. Las características litológicas de manera resumida para los puntos de afloramiento se describen en el acápite 2.2.2. *Marco geológico local*.

#### 4.2.1. Parámetro Resistencia de la Matriz rocosa

Este parámetro fue realizado a través ensayos de campo con martillo de Schmidt, permitiendo estimar la resistencia a compresión simple siguiendo los pasos descritos en el acápite 2.2.4.1. *Norma ASTM D5873 Método de Prueba Estándar para Determinar la Dureza de la Roca por el Método del Martillo de Rebote*. A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos:

Numero de afloramiento	Ensayos de resistencia de compresión uniaxial (MPa)										Promedio Resistencia de compresión uniaxial (MPa)	Puntuación
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	68	50	38	70	45	65	71	40	55	66	68	7
2	202	188	94	206	198	170	199	170	195	98	200	12
3	100	121	152	166	131	150	206	90	151	140	165	12
4	62	71	110	70	62	80	45	60	64	72	79	7
5	92	120	130	102	90	122	101	60	62	93	115	12
6	85	100	113	85	112	70	101	104	99	74	106	12
7	130	245	99	125	200	255	250	109	255	270	255	15
8	100	97	90	90	88	92	100	75	101	80	98	7
9	75	69	50	65	70	66	45	68	60	68	70	7
10	47	40	25	30	40	29	20	35	30	33	39	4
11	215	200	250	260	250	262	218	155	200	180	248	12
12	70	28	35	40	60	30	33	55	27	30	52	7
13	130	138	115	118	90	80	90	129	100	60	126	12
14	90	95	93	60	35	107	95	100	89	87	98	7

	Valores más bajos (eliminados)	←	Orientación del martillo
--	--------------------------------	---	--------------------------

Tabla 31. Tabla resumen de resultados para la resistencia de compresión uniaxial (Mpa). (El autor)



Ilustración 12. Ensayos de campo, martillo de Schmdt.

#### 4.2.2. Parámetro RQD - Rock Quality Designation

El grado de fracturación del macizo rocoso fue determinado en base a datos de afloramientos, donde  $J_v$  es el índice volumétrico de juntas ( $J_v$ ) o número de juntas por metro cúbico de macizo rocoso. Una vez obtenido el valor  $J_v$ , se utilizó la Ecuación 1, para encontrar el RQD (Rock Quality Designation). A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos:

Punto de afloramiento	Juntas 1	Juntas 2	Juntas 3	J <sub>v</sub>	RQD	Puntuación
1	3	3	3	9	87,5	17
2	3	3	5	11	82,5	17
3	3	3	4	10	85	17
4	3	3	3	9	87,5	17
5	3	4	5	12	80	17
6	3	3	4	10	85	17
7	3	3	3	9	87,5	17
8	3	4	4	11	82,5	17
9	4	5	5	14	75	13
10	4	4	6	14	75	13
11	3	4	4	11	82,5	17
12	4	5	5	14	75	13
13	4	5	5	14	75	17
14	4	5	6	15	72,5	13

Tabla 32. RQD.



Ilustración 13. Familias de diaclasas (J<sub>v</sub>)

#### 4.2.3. Parámetro separación entre diaclasas

La separación entre planos de diaclasas condiciona el tamaño de los bloques, la separación será la distancia perpendicular entre dos discontinuidades de una misma familia, dicha medida se llevó a cabo utilizando una cinta métrica en una longitud representativa para cada punto de afloramiento. A continuación, se presenta la tabla resumen de los resultados adquiridos:

Numero de afloramiento	Separación entre diaclasas	Puntuación
1	0.06 a 0.2 m	8
2	0.06 a 0.2 m	8
3	0.06 a 0.2 m	8
4	0.2 a 0.6 m	10
5	0.2 a 0.6 m	10
6	0.06 a 0.2 m	8
7	0.2 a 0.6 m	10
8	0.2 a 0.6 m	10
9	0.06 a 0.2 m	8
10	0.06 a 0.2 m	8
11	0.2 a 0.6 m	10
12	0.2 a 0.6 m	10
13	0.2 a 0.6 m	10
14	0.06 a 0.2 m	8

Tabla 33. Tabla resumen de separación entre diaclasas. (RMR)



Ilustración 14. Separación entre diaclasas.

#### 4.2.4. Parámetros del estado de las discontinuidades

Gonzales de Vallejo (2004) indica que las discontinuidades son las condicionantes para las propiedades en general de los macizos rocosos.



Ilustración 15. Representación esquemática de las propiedades geométricas de discontinuidades (Hudson, 1989)

#### 4.2.4.1. Longitud de la discontinuidad

La longitud de la discontinuidad será la longitud a lo largo de la dirección del plano de buzamiento de dicha discontinuidad, la medición de la longitud se efectuó utilizando una cinta métrica, de los planos de diaclasas del afloramiento que permitan la observación más adecuada, a continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos en campo:

Punto de afloramiento	Longitud de la discontinuidad (m)	Puntuación
1	3 a 10	2
2	3 a 10	2
3	3 a 10	2
4	3 a 10	2
5	3 a 10	2
6	3 a 10	2
7	10 a 20	1
8	3 a 10	2
9	3 a 10	2
10	3 a 10	2
11	3 a 10	2
12	10 a 20	1
13	3 a 10	2
14	10 a 20	1

Tabla 34. Tabla resumen longitud de diaclasas. (RMR).



Ilustración 16. Longitud.

#### 4.2.4.2. Abertura

La abertura será la distancia perpendicular que separa ambas paredes de una discontinuidad con ausencia de materiales de relleno, la medición de la abertura se llevó a cabo

con una cinta métrica, en las campañas de campo realizadas, se obtuvo los siguientes rangos de valores en la siguiente tabla.

Punto de afloramiento	Abertura	Puntuación
1	1 a 5mm	1
2	> 5 mm	0
3	1 a 5mm	1
4	> 5 mm	0
5	> 5 mm	0
6	> 5 mm	0
7	> 5 mm	0
8	> 5 mm	0
9	1 a 5mm	1
10	> 5 mm	0
11	1 a 5mm	1
12	1 a 5mm	1
13	> 5 mm	0
14	1 a 5mm	1

Tabla 35. Tabla resumen abertura de diaclasas. (RMR)



Ilustración 17. Abertura.

#### 4.2.4.3. Rugosidad

Son observadas en las superficies de las juntas, en algunos casos presentan material de relleno, en la tabla siguiente se muestra el parámetro y puntuación del relevamiento en campo:

Punto de afloramiento	Rugosidad	Puntuación
1	Ondulada	1
2	Ligeramente rugosa	3
3	Ligeramente rugosa	3
4	Suave	0
5	Ondulada	1
6	Ligeramente rugosa	3
7	Ligeramente rugosa	3
8	Ondulada	1
9	Ligeramente rugosa	3
10	Ligeramente rugosa	3
11	Ligeramente rugosa	3
12	Ligeramente rugosa	3
13	Rugosa	5
14	Ondulada	1

Tabla 36. Tabla resumen Rugosidad. (RMR).

#### 4.2.4.4. Relleno

Es aquel material que se encuentra entre de las discontinuidades; en algunas ocasiones este relleno produce alteración química precipitando nuevos minerales, se presenta a continuación una tabla resumen el parámetro y puntuación observados en campo:

Punto de afloramiento	Relleno	Puntuación
1	Relleno duro > 5mm	2
2	Relleno blando > 5mm	0
3	Relleno blando > 5mm	0
4	Relleno blando > 5mm	0
5	Relleno blando > 5mm	0
6	Relleno blando > 5mm	0
7	Relleno blando > 5mm	0
8	Relleno blando > 5mm	0
9	Relleno blando > 5mm	0
10	Relleno blando > 5mm	0
11	Relleno blando > 5mm	0
12	Relleno blando > 5mm	0
13	Relleno blando > 5mm	0
14	Relleno blando > 5mm	0

Tabla 37. Tabla resumen rellenos. (RMR)



Ilustración 18. Discontinuidad rellena con precipitación química.

#### 4.2.4.5. Alteración

Denominamos a la alteración como un proceso que modifica rocas preexistentes, las rocas sufren estos procesos al contacto con la atmósfera, la hidrósfera y la biósfera, en la siguiente tabla se presenta el parámetro y puntuación para el parámetro de alteraciones:

Punto de afloramiento	Alteración	Puntuación
1	Moderadamente alterada	3
2	Ligeramente alterada	5
3	Inalterada	6
4	Ligeramente alterada	5
5	Inalterada	6
6	Ligeramente alterada	5
7	Ligeramente alterada	5
8	Ligeramente alterada	5
9	Ligeramente alterada	5
10	Ligeramente alterada	5
11	Ligeramente alterada	5
12	Inalterada	6
13	Ligeramente alterada	5
14	Ligeramente alterada	5

Tabla 38. Tabla resumen alteración. (RMR).

#### 4.2.5. Parámetro de agua freática

El contenido de agua en un macizo rocoso generalmente proviene de flujos que circulan a través de las discontinuidades (permeabilidad secundaria). En algunas rocas permeables, el flujo también puede ocurrir a través de filtraciones (permeabilidad primaria). Durante las campañas de campo realizadas, no se observó ningún tipo de flujo o filtración, ya sea por

permeabilidad primaria o secundaria. El parámetro de agua freática y la ponderación se presenta en la siguiente tabla:

Punto de afloramiento	Estado general	Puntuación
1	Seco	15
2	Ligera mente húmedo	10
3	Seco	15
4	Seco	15
5	Seco	15
6	Ligera mente húmedo	10
7	Ligera mente húmedo	10
8	Ligera mente húmedo	10
9	Ligera mente húmedo	10
10	Ligera mente húmedo	10
11	Ligera mente húmedo	10
12	Ligera mente húmedo	10
13	Seco	15
14	Ligera mente húmedo	10

Tabla 39. Agua freática. (RMR).

#### 4.2.6. Resultados clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) modificado (Bieniawski, 1989)

Se han examinado un total de 14 puntos de afloramiento de roca para su caracterización a través de la metodología Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989), conocido como RMR. En la siguiente tabla, se presenta los resultados obtenidos:

Punto de afloramiento	Valoración RMR
1	56
2	57
3	63
4	56
5	63
6	57
7	61
8	52
9	49
10	45
11	60
12	51
13	66
14	46

Tabla 40. Tabla resumen calidad de macizo rocoso (sin corrección).

### 4.3. Clasificación SMR (Slope Mass rating) Romana, M. et al. (1985)

El sistema de clasificación SMR (Slope Mass Rating), propuesto por Romana, M. et al. (1985), es una adaptación de la clasificación RMR de Bieniawski aplicada específicamente a taludes. El SMR se obtiene sumando el RMR básico y el producto de tres factores de ajuste: F1, F2, F3, además de un factor F4 que depende del método de excavación o del tipo de talud (ver sección 2.2.3.4).

En el presente estudio, la clasificación se realizó considerando 14 puntos de afloramiento. Para el factor F4, se asignó un valor de +15, ya que los taludes estudiados corresponden a taludes naturales, sin intervención de excavación. Este valor representa el efecto favorable de un talud no perturbado sobre la estabilidad del macizo rocoso, siguiendo las recomendaciones de Romana para este tipo de condiciones; con excepción del punto de afloramiento 9 el cual presenta potencial tipo de rotura por vuelco, el modelo de rotura es planar para el resto de los puntos de afloramiento (Ver anexo H). A continuación, se presenta la tabla resumen de los resultados obtenidos:

Numero de afloramiento	F1			F2		F3			SMR
	Dirección de buzamiento de las juntas	Dirección de buzamiento del talud	Valor	Buzamiento de las juntas	Valor	Buzamiento de las juntas	Buzamiento del talud	Valor	
	$\alpha j$	$\alpha s$		$\beta j$		$\beta s$			
1	220	11	0,15	86	1	86	58	0	71
2	288	24	0,15	82	1	82	62	0	72
3	133	8	0,15	50	1	50	48	-6	77
4	285	38	0,15	76	1	76	40	0	71
5	68	211	1	68	1,00	68	61	-6	72
6	326	16	0,15	52	1	52	53	-50	65
7	321	191	0,15	33	0,70	33	61	-60	70
8	178	177	1	80	1	80	73	0	61
9	364	220	1	60	1	60	54	-6	58
10	279	190	0,15	15	0,15	15	72	-60	59
11	218	184	0,15	65	1	65	49	0	75
12	340	44	0,15	68	1	68	66	-6	65
13	320	62	0,15	90	1	90	89	-6	80
14	318	245	0,15	40	0,85	40	83	-60	53

Tabla 41. Tabla resumen de clasificación SMR.

#### 4.3.1. Clasificación de estabilidad SMR (Slope Mass Rating) Romana, M. et al. (1985)

Los valores del SMR obtenidos para cada punto de afloramiento, han sido introducidos en base a la tabla de estabilidad, que se presenta a continuación:

Numero de afloramiento	SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas	Tratamiento
1	71	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
2	72	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
3	77	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
4	71	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
5	72	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
6	65	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
7	70	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
8	61	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
9	58	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
10	59	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
11	75	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
12	65	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
13	80	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
14	53	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático

Tabla 42. Tabla resumen de clasificación de estabilidad SMR.

Los resultados obtenidos reflejan que, en porcentaje mayor, los puntos de afloramiento se encuentran catalogados como estables con posibles roturas de algunos bloques y tratamiento ocasional en más del 80% y un número inferior al 20% catalogado como parcialmente estable, con posibles roturas de algunas juntas o muchas cuñas con tratamiento sistemático.

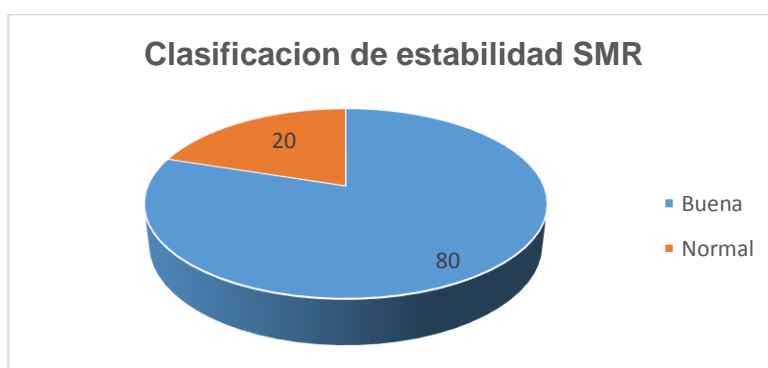


Ilustración 19. Gráfico circular SMR en base al parámetro "Descripción".

#### 4.4. Clasificación Q-slope Barton, N., Bar, N. & Associates (2015).

El sistema Q ha sido ampliamente utilizado por ingenieros geólogos e ingenieros de minas para la caracterización de macizos rocosos en túneles. En la última década, se ha probado un

sistema Q ligeramente modificado, denominado Q-slope, para su aplicación en cortes de talud de carreteras, autopistas y bancos en minas a cielo abierto. El propósito de Q-slope es permitir una evaluación rápida de la estabilidad de los taludes de roca expuestos en el campo y realizar ajustes óptimos a los ángulos de talud. Como se mencionó anteriormente, el sistema de clasificación Q-Slope está compuesto por los siguientes parámetros: RQD, Jn, Jr, Ja, O, Jwice y SRFslope, según Bar y Barton (2017).

#### 4.4.1. Número de sistemas de fisuras - Jn

Este parámetro se define como el número de familias de diaclasas identificadas en cada punto de afloramiento, determinadas mediante observación directa durante el relevamiento geológico de campo. Este proceso consistió en registrar la información estructural relativa al número de familias de diaclasas observadas. Para ello, se utilizó el índice de diaclasado propuesto por Barton et al. (1974), como se detalla en la *Tabla 20*. A continuación, se presenta una tabla resumen del índice de diaclasado, donde se observa que predominan tres familias de diaclasas por cada punto de afloramiento.

Número de afloramiento	Índice de diaclasado	
	Jn	Parámetro
1	9	Tres familias de diaclasas
2	9	Tres familias de diaclasas
3	9	Tres familias de diaclasas
4	9	Tres familias de diaclasas
5	9	Tres familias de diaclasas
6	9	Tres familias de diaclasas
7	9	Tres familias de diaclasas
8	9	Tres familias de diaclasas
9	9	Tres familias de diaclasas
10	12	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias
11	9	Tres familias de diaclasas
12	9	Tres familias de diaclasas
13	6	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias
14	12	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias

Tabla 43. Tabla índice de diaclasado.

#### 4.4.2. Índice de rugosidad de las discontinuidades – Jr

Como se mencionó en el apartado “Índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas (Jr)” para la clasificación geomecánica en base al Índice de calidad del Túnel “Q” (Barton, 1974), la rugosidad de las discontinuidades disminuye a medida que aumenta la abertura. Se utilizó el índice de rugosidad de las discontinuidades propuesto por Barton et al. (1974), como se detalla en la *Tabla 21*. Se evidencia que predomina la calificación de: Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares, asignando un valor de 3. A continuación, se presenta una tabla resumen del índice de rugosidad de las discontinuidades:

Número de afloramiento	Índice de rugosidad de las discontinuidades	
	Jr	Parámetro
1	1,5	Diaclasas planas, rugosas o irregulares
2	3	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares
3	2	Diaclasas onduladas, lisas
4	1,5	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas
5	3	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares
6	3	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares
7	1,5	Diaclasas planas, rugosas o irregulares
8	1,5	Diaclasas planas, rugosas o irregulares
9	3	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares
10	3	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares
11	3	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares
12	2	Diaclasas onduladas, lisas
13	3	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares
14	2	Diaclasas onduladas, lisas

Tabla 44. Tabla del índice de rugosidad de las discontinuidades.

#### 4.4.3. Índice de alteración de las discontinuidades - Ja

La alteración modifica las rocas preexistentes, ocurre cuando las rocas entran en contacto con la atmósfera, la hidrósfera y la biósfera. Según la Clasificación geomecánica en base al Índice de calidad del Túnel “Q” (Barton, 1974), presentada en la *Tabla 22*, se ha realizado la clasificación de este parámetro; se observa la predominancia del calificativo 4 descrito como: “Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.”:

Número de afloramiento	Índice de alteración de las discontinuidades	
	Ja	Parámetro
1	4	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica.
2	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.
3	1	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas
4	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.
5	1	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas
6	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.
7	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.
8	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.
9	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.
10	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.
11	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.
12	1	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas
13	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.
14	2	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.

Tabla 45. Tabla del índice de alteración de las discontinuidades.

#### 4.4.4. Índice de orientación de las discontinuidades - O

La orientación en las discontinuidades está referida a las familias donde su dirección de orientación es semejante, dichas orientaciones de las diferentes familias para un macizo rocoso definen la forma de los bloques que lo conforman, así pues, la orientación de una discontinuidad en el espacio que define dirección y su plano de buzamiento. Para identificar cual es la dirección y su plano de buzamiento (DIP) se realizó la medición en campo con una brújula SUNNTO con clinómetro, realizando las mediciones respectivas en todos los puntos de afloramiento se han observado la predominancia de tres familias de diaclasas:

Punto de afloramiento	Familias de diaclasas (DIP)		
	1	2	3
1	016/74	040/82	220/86
2	024/58	126/51	288/82
3	038/70	133/50	175/40
4	010/68	052/50	285/76
5	068/70	162/68	232/40
6	025/62	132/38	326/52
7	054/66	128/56	321/33
8	028/56	140/32	178/80
9	032/64	110/18	364/60
10	036/70	122/60	279/15
11	132/38	140/60	218/65
12	152/60	168/64	340/68
13	045/11	320/90	
14	126/72	292/20	318/40

Tabla 46. Orientación de las discontinuidades (DIP).

A través del programa en línea “Visiblegeology”, se ha generado el diagrama de rosas de la orientación para las discontinuidades, el cual facilita la visualización preferencial de las direcciones de las familias de diaclasas con respecto al norte magnético. Como se puede observar en la Ilustración siguiente, se identifican dos direcciones preferenciales de las familias de diaclasas: una hacia el Noreste y otra hacia el Noroeste.

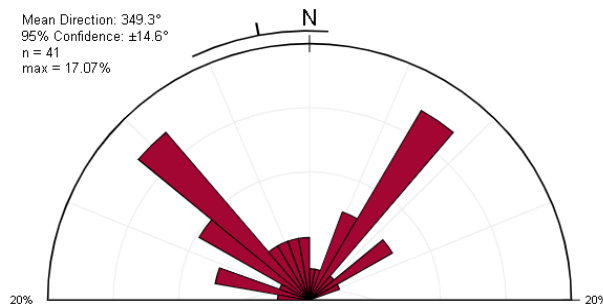


Ilustración 20. Diagrama de rosas de las familias de diaclasas.

Para determinar el factor de orientación de discontinuidad, denominado "Factor O" (Barton & Bar, 2015), se evidencia que las discontinuidades se acomodan al denominado “Conjunto A – aplicable a discontinuidades más desfavorables”, (Ver tabla 25). A continuación, se presenta los datos obtenidos a través de mediciones de campo:

Punto de afloramiento	Familias de diaclasas			Familias de diaclasas - Factor O			Promedio Factor O
	1	2	3	1	2	3	
1	016/74	040/82	220/86	0,75	0,75	0,5	0,67
2	024/58	126/51	288/82	0,75	2	0,5	1,08
3	038/70	133/50	175/40	0,75	2	1	1,25
4	010/68	052/50	285/76	0,75	0,75	0,5	0,67
5	068/70	162/68	232/40	0,75	1	0,5	0,75
6	025/62	132/38	326/52	0,75	2	0,25	1,00
7	054/66	128/56	321/33	0,75	2	0,25	1,00
8	028/56	140/32	178/80	0,75	2	1	1,25
9	032/64	110/18	354/60	0,75	2	0,25	1,00
10	036/70	122/60	279/15	0,75	2	0,5	1,08
11	132/38	140/60	218/65	2	2	0,5	1,50
12	152/60	168/64	340/68	1	1	0,25	0,75
13	045/11	320/90	-	0,75	0,25	-	0,50
14	126/72	292/20	318/40	2	0,25	0,25	0,83

Tabla 47. Tabla resultados, factor O.

#### 4.4.5. Condiciones ambientales y geológicas – Jwice

El parámetro Jwice, (Ver tabla 26) hace referencia a la condición ambiental y geológica, este parámetro presenta diferentes ambientes: Ambiente desértico, ambiente húmedo, tormentas tropicales y acuñaamiento de hielo. Por lo anterior el ambiente que más se ajusta al presente trabajo es “Ambiente desértico” ya que el sector se encuentra expuesto a intemperismo y meteorización física asociada a la orientación. Por los diferentes parámetros observados y los eventos recurrentes de caídas en bloque que se evidencian, el parámetro que mejor se ajusta es: *Estructura inestable, roca incompetente*. En suma, por los anteriores criterios el parámetro numérico utilizado para todos los puntos de afloramiento es 0,5.

#### 4.4.6. Factor de reducción de resistencia - SRF slope

El factor de reducción de resistencia  $SRF_{slope}$ , se ha obtenido a través de  $SRF_a$ , (Ver tabla 27) para condiciones físicas de la superficie del talud debido a la susceptibilidad a meteorización y erosión ya que el macizo rocoso se encuentra expuesto a estos agentes con cambios bruscos

de temperatura generando procesos de termoclastia. Los parámetros que se tomaron en cuenta para los puntos de afloramiento se presentan en la tabla a continuación:

<b>Afloramiento</b>	<b>SRFa</b>	<b>Descripción</b>
1	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
2	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
3	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
4	5	Bloques sueltos, signos de grietas por tensión y juntas de cizallamiento, susceptibilidad a la intemperie.
5	5	Bloques sueltos, signos de grietas por tensión y juntas de cizallamiento, susceptibilidad a la intemperie.
6	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
7	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
8	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
9	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
10	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
11	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
12	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
13	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.
14	2,5	Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie.

*Tabla 48. Resultados tabla de factor de reducción por esfuerzos - SRF slope.*

#### **4.4.7. Ángulo de inclinación del talud**

El Angulo de inclinación del talud es representado en grados, este es un punto fundamental para clasificar al macizo rocoso, para este parámetro se ha realizado una medición de inclinación para cada punto de afloramiento, con ayuda de una brújula SUNNTO con clinómetro. Los resultados se presentan a continuación:

<b>Punto de afloramiento</b>	<b>Angulo talud (°)</b>	<b>Punto de afloramiento</b>	<b>Angulo talud (°)</b>
1	58	8	73
2	62	9	54
3	48	10	72
4	40	11	49
5	61	12	66
6	53	13	89
7	61	14	83

*Tabla 49. Ángulo de inclinación del talud.*



Ilustración 21. Medición del ángulo de inclinación del talud.

#### 4.4.8. Resultados obtenidos clasificación Q-slope

Mediante el método empírico Q-slope, aplicado a los 14 puntos de afloramiento analizados, se ha obtenido valores de índice Q-Slope a través de la *Ecuación 3*, posteriormente a través del diagrama de estabilidad (*Ilustración 11*), el valor Q-slope se introduce en el eje (X) entre 0.001 a 1000 en escala logarítmica<sup>10</sup> y valores de ángulo de inclinación en el eje (Y) entre 0 a 90°; para conocer el nivel de estabilidad ubicamos el punto de intersección en el diagrama donde se cuenta con polígonos de clasificación categorizados como: Talud estable, talud no determinado y talud inestable; a continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos:

Número de Afloramiento	RQD	Jn	Jr	Ja	O	Jwice	SRF slope	Q-slope	Angulo talud	Estabilidad
1	87,5	9	1,5	4	0,67	0,5	2,5	1,09	58	Estable
2	82,5	9	3	2	1,08	0,5	2,5	2,55	62	Estable
3	85	9	2	1	1,25	0,5	2,5	3,02	48	Estable
4	87,5	9	1,5	2	0,67	0,5	5	1,09	40	Estable
5	80	9	3	1	0,75	0,5	5	3,56	61	Estable
6	85	9	3	2	1,00	0,5	2,5	2,83	53	Estable
7	87,5	9	1,5	2	1,00	0,5	2,5	1,46	61	Estable
8	82,5	9	1,5	2	1,25	0,5	2,5	1,10	73	Inestable
9	75	9	3	2	1,00	0,5	2,5	2,50	54	Estable
10	75	12	3	2	1,08	0,5	2,5	1,74	72	Indeterminado
11	82,5	9	3	2	1,50	0,5	2,5	1,83	49	Estable
12	75	9	2	1	0,75	0,5	2,5	4,44	66	Estable
13	75	6	3	2	0,50	0,5	2,5	7,50	89	Indeterminado
14	72,5	12	2	2	0,83	0,5	2,5	1,46	83	Inestable

Tabla 50. Q-slope tabla resumen.

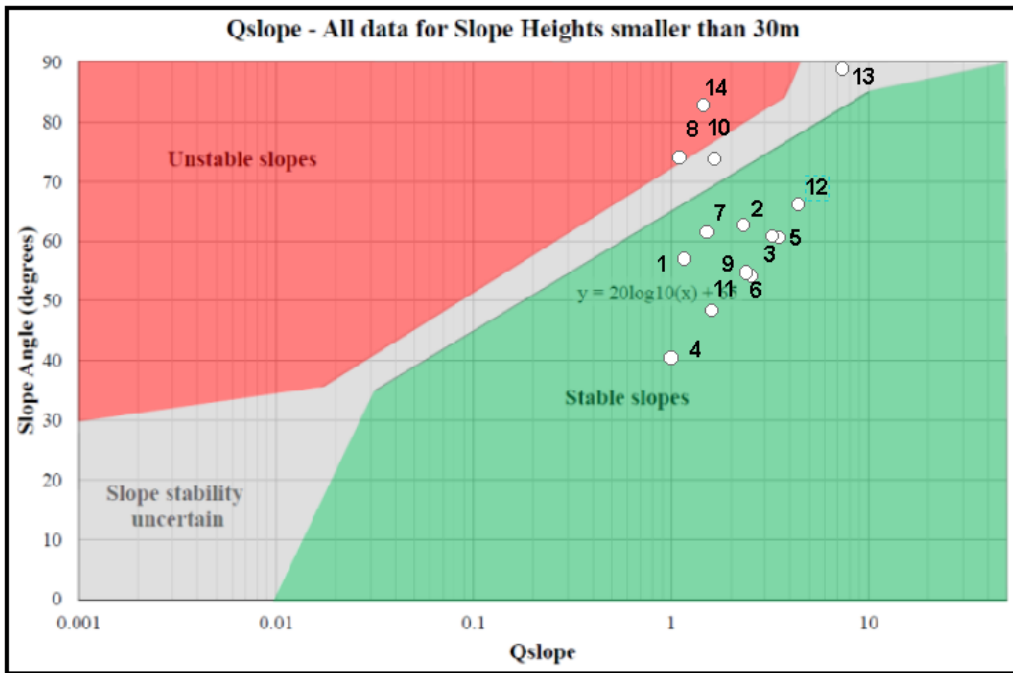


Ilustración 22. Gráfico de estabilidad de taludes usando el sistema Q Slope.

El resultado del método de clasificación Q-slope, determinó que la categoría predominante para el macizo rocoso es Estable con 71,4 % (10 afloramientos), indeterminada con 14,3% (2 afloramientos), e inestable con el 14,3% (2 afloramientos).

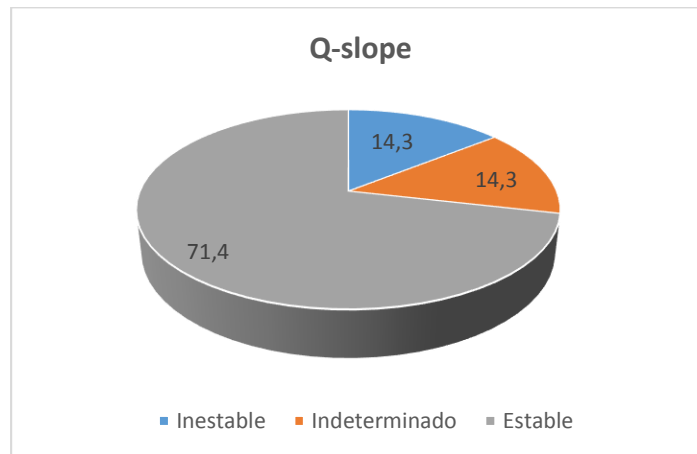


Ilustración 23. Diagrama circular resultados finales Q-slope.

#### **4.6. Análisis comparativo**

La clasificación geomecánica SMR (Slope Mass Rating) de Romana et al. (1985) se basa en la adaptación de la clasificación RMR de Bieniawski (1989) para taludes, incorporando factores de corrección F1, F2, F3 y F4. En el presente estudio, los 14 puntos de afloramiento evaluados presentaron valores de SMR comprendidos entre 53 a 80, correspondientes a las clases II y III, clasificadas como estables y parcialmente inestables según los criterios de Romana. El factor F4 se fijó en +15, al tratarse de taludes naturales, lo que refleja un efecto favorable sobre la estabilidad del macizo rocoso.

Por otra parte, el sistema Q-slope (Barton et al., 2015), es una adaptación del índice Q para túneles (Barton et al., 1974), utiliza siete parámetros de entrada: RQD, Jn, Jr, Ja, Jw, SRF y el índice de orientación O. A partir de estos valores se obtiene el Q-slope y, mediante la corrección por el ángulo de inclinación del talud, se calcula el Q-slope ajustado, el cual permite evaluar la estabilidad de cada afloramiento en categorías que van desde “Inestable, indeterminado y estable”. En los puntos estudiados, se observó que los valores de Q-slope oscilaron entre 1,09 a 7,50, clasificando la mayoría de los afloramientos como estables.

Al comparar ambos métodos se identifican similitudes, diferencias, limitaciones y/o complementariedades:

- En términos generales, ambos métodos coinciden en que más del 70% de los afloramientos presentan condiciones favorables de estabilidad, aunque las categorías exactas pueden variar según el método.
- El método SMR depende de la observación directa de campo para factores F2 y F3, relacionados con la geometría de las juntas y la orientación de buzamiento.
- Dentro del sistema Q-slope, al realizar la clasificación en base al diagrama correspondiente; el parámetro del ángulo de inclinación del macizo rocoso es determinante para su categorización.
- El índice de orientación factor O y el factor de reducción de resistencia SRF slope, dentro de la clasificación Q-slope, puede generar diferencias notables en la clasificación.

- La metodología SMR incluye correcciones basadas en el método de excavación (F4), mientras que Q-slope integra de forma directa la influencia ángulo de inclinación del talud.
- Ambos métodos presentan limitaciones: RMR y SMR no consideran la dimensión del afloramiento, por otra parte, Q-slope sugiere que su aplicación se efectúe en taludes menores a 30 metros.
- A partir de la clasificación RMRb (sin corrección por orientación), se puede realizar una corrección por la orientación de las discontinuidades en taludes; donde los resultados serán menores, por tanto, el método SMR es más conservador.

Posteriormente, se aplicó la ecuación de correlación de Mohammad et al. (2020), la cual permite estimar los valores de SMR a partir de los resultados de Q-slope. Esta correlación se utilizó con el fin de evaluar la correspondencia y complementariedad entre ambos métodos de clasificación, facilitando la comparación cuantitativa de los resultados y proporcionando una herramienta adicional para la interpretación de la estabilidad de los taludes, especialmente en casos donde solo se dispone de datos de Q-slope. La tabla siguiente presenta los resultados de dicha correlación, permitiendo observar la relación entre los dos métodos:

Número de Afloramiento	Q-slope	SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas	Tratamiento
1	1,09	73	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
2	2,55	83	I	Muy Buena	Totalmente estable	Ninguna	Ninguno
3	3,02	85	I	Muy Buena	Totalmente estable	Ninguna	Ninguno
4	1,09	73	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
5	3,56	87	I	Muy Buena	Totalmente estable	Ninguna	Ninguno
6	2,83	84	I	Muy Buena	Totalmente estable	Ninguna	Ninguno
7	1,46	76	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
8	1,1	73	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
9	2,5	83	I	Muy Buena	Totalmente estable	Ninguna	Ninguno
10	1,74	78	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
11	1,83	79	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
12	4,44	90	I	Muy Buena	Totalmente estable	Ninguna	Ninguno
13	7,5	96	I	Muy Buena	Totalmente estable	Ninguna	Ninguno
14	1,46	76	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional

Tabla 51. Tabla SMR a partir de Q-slope.

#### 4.7. Ecuación propuesta

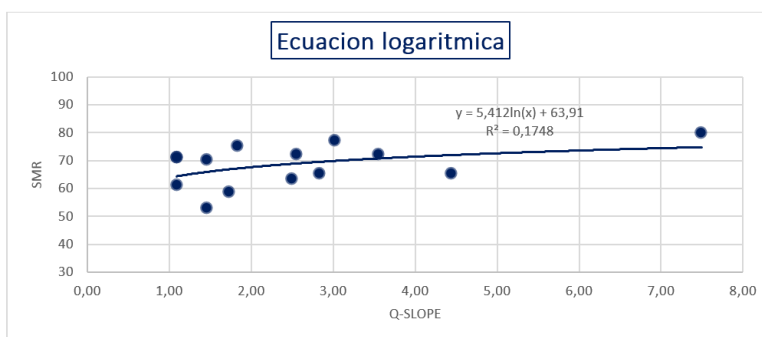
En el presente estudio, a partir de los resultados de Q-slope y SMR obtenidos en campo, se evaluaron diferentes tipos de fórmulas de ajuste con el objetivo de encontrar el modelo que mejor representara la relación entre ambos métodos. Tras este análisis, se concluyó que un modelo logarítmico (Ecuación 6) por el manejo de escalas y poder modelar los datos de forma exponencial proporcionando un ajuste óptimo. En el Anexo “G” se presentan los distintos tipos de ecuaciones ensayadas y su desempeño comparativo.

Para evaluar la calidad de la relación propuesta, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (R), que indica la fuerza y dirección de la relación lineal entre SMR y Q-slope. Valores cercanos a 1 o -1 señalan una relación fuerte, mientras que valores próximos a 0 indican una relación débil. Adicionalmente, se empleó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que representa la proporción de la variabilidad de SMR que puede explicarse a partir de los valores de Q-slope mediante el modelo propuesto. Este indicador permite cuantificar el ajuste del modelo y la representatividad de la ecuación logarítmica elegida.

En el presente trabajo, la relación obtenida presenta un coeficiente de correlación  $R = 0.50$ , lo que indica correlación moderada a fuerte según Cohen, en Hernández, J., et al. (2018), entre ambas variables, y un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.17$ , lo que significa que aproximadamente el 17% de la variabilidad de SMR puede explicarse mediante Q-slope. La ecuación resultante se expresa de la siguiente forma:

$$SMR = 5,412 \ln(x) + 63,91$$

*Ecuación 6. Propuesta empírica de ecuación.*



*Ilustración 24. Gráfico de relación empírica SMR-Q-slope.*

Al aplicar la ecuación propuesta a los valores obtenidos en campo, que correlaciona el sistema Q-slope con el método de clasificación SMR, se obtiene la siguiente tabla resumen:

Número de Afloramiento	Q-slope	SMR	CLASE	DESCRIPCION	ESTABILIDAD	ROTURAS	TRATAMIENTO
1	1,09	65	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
2	2,54	69	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
3	3,02	70	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
4	1,09	65	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
5	3,56	71	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
6	2,83	70	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
7	1,46	66	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
8	1,1	65	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
9	2,5	69	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
10	1,73	67	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
11	1,83	67	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
12	4,44	72	I	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
13	7,5	75	I	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
14	1,45	66	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional

Tabla 52. Tabla SMR a partir de ecuación propuesta.

Método	Rango SMR	Promedio	Observación
Campo	53 – 80	68,4	Valores reales medidos directamente en los 14 afloramientos
Mohammad et al.	73 – 96	80,9	Tiende a sobreestimar los valores frente a los datos de campo; algunos afloramientos quedan clasificados como más estables de lo observado
Ecuación propia	54 – 75	68,4	Ajuste equivalente a los datos reales; igual desviación promedio respecto a los valores de campo

Tabla 53. Análisis de métodos de correlación.

De la ecuación de Mohammad et al. para algunos valores superan los datos de campo en 10 a 15 puntos, especialmente en afloramientos con Q-slope < 3, lo que sugiere que la correlación original puede ser menos representativa para los macizos de la Formación Luribay.

La ecuación propuesta, presenta diferencias promedio de 2 a 3 puntos respecto a SMR de campo, lo que demuestra que la ecuación captura mejor la variabilidad observada.

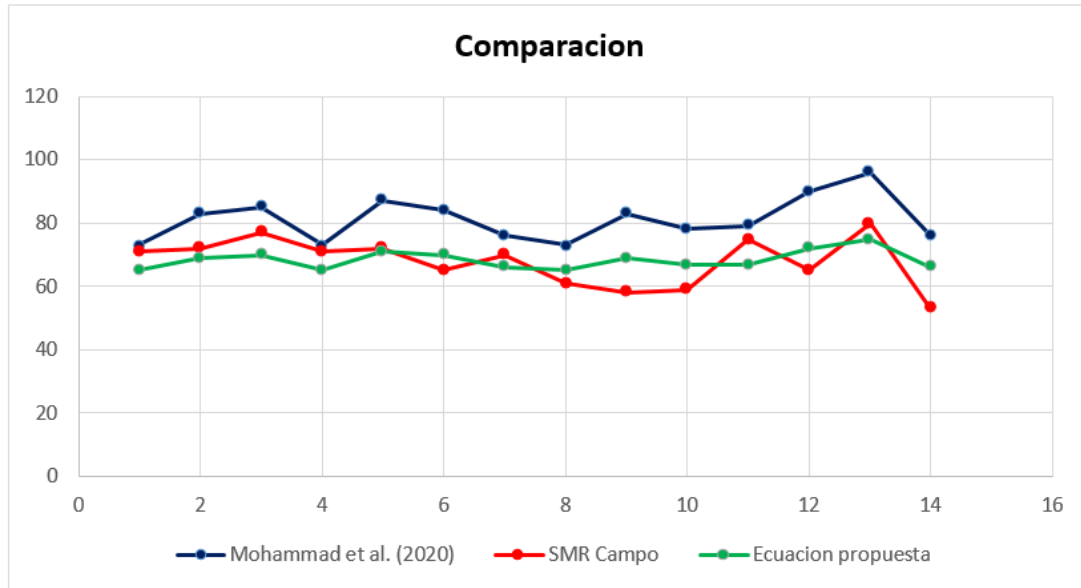


Ilustración 25. Grafico lineal SMR.

La ecuación de correlación de Mohammad et al. (2020) proporcionó una referencia general para estimar el SMR a partir de datos Q-slope, pero tiende a sobreestimar la estabilidad para los afloramientos estudiados. La ecuación empírica propuesta, ofrece mejor ajuste a la realidad del sitio, presentando menores desviaciones y una clasificación más consistente con las observaciones de campo. Por tanto, para la evaluación de la estabilidad de los taludes estudiados, se recomienda utilizar la ecuación propuesta como referencia principal.

A través de un análisis por interpolación de isógonas con el programa ArcGis 10, de datos espaciales (Ver anexo F), los resultados para la clasificación geomecánica SMR, tanto para la obtenida por datos de campo a partir del RMR, como para los resultados obtenidos por ecuaciones empíricas ( figura 26 - *anexo F*), se evidencia que existen un sector catalogado como totalmente estable puntuación entre 80 a 100, ubicado en el sector sur oeste y de manera general, el resto del área se encuentra catalogado como parcialmente estable a estable (puntuación entre a 41 a 80).

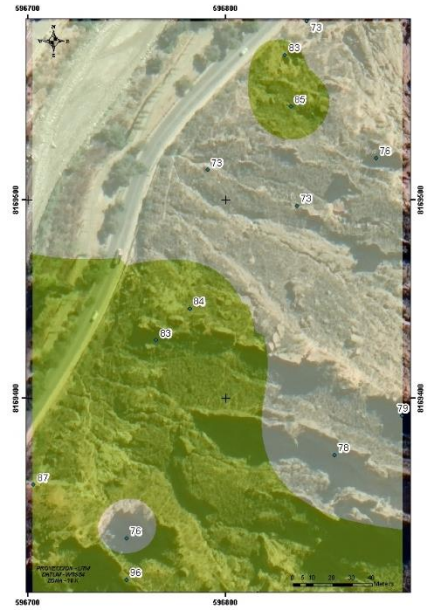
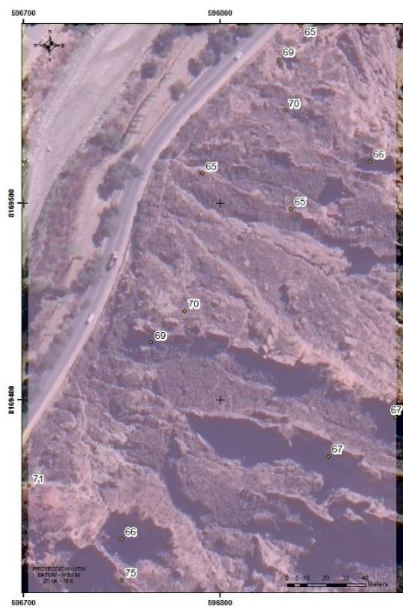
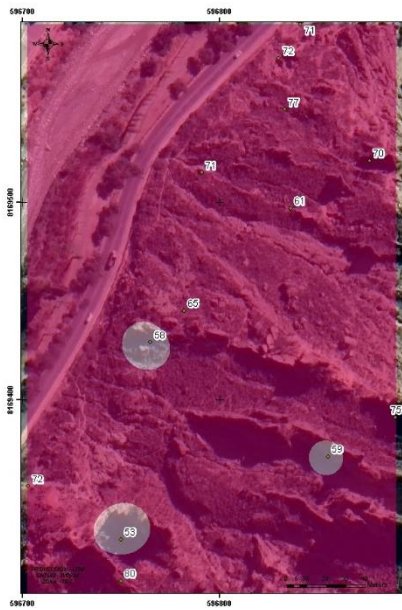


Ilustración 26. Izq. Mapa de isógonas de la clasificación geomecánica de resultados Izq. SMR a partir de datos de campo, Centro SMR a partir de ecuación propuesta, Der. SMR a partir de la ecuación de Mahmoud, H., et al. (2020)

## CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- El macizo rocoso del Cerro Chauña, perteneciente a la Formación Luribay (Cenozoico), está constituido principalmente por conglomerados con intercalaciones de areniscas y arcillas subordinadas. La topografía es irregular, ostenta desnivel superior a los 100 m y se caracterizaron 14 puntos de afloramiento.
- El presente trabajo está centrado en la aplicación de dos métodos de clasificación geomecánica: El método de clasificación SMR (Slope Mass rating) Romana, M. et al. (1985) que es una adaptación de la clasificación RMR de Bieniawski y el sistema Q-slope Barton, N., Bar, N. & Associates (2015).
- La aplicación del sistema Slope Mass Rating (SMR) permitió clasificar la mayoría de los afloramientos como estables, vinculado a las pendientes que ostenta las juntas y el talud. Su carácter conservador lo hace adecuado para identificar sectores con mayor susceptibilidad.
- El sistema Q-slope clasificó el macizo predominantemente como estable. El método muestra ahorro de tiempos para su clasificación en campo, aunque sensible a la variación del ángulo de talud.
- El sistema de clasificación Q-slope resulta útil como herramienta rápida de diagnóstico, lo que sugiere que ambos métodos son complementarios según el nivel de detalle requerido.
- En el caso de estudio, en términos generales, ambas metodologías SRM y Q-slope coinciden en que más del 70% de los afloramientos del macizo rocoso estudiado se encuentran en condiciones estables.

- Dentro del sistema de clasificación (RMR) de Bieniawski, algunos parámetros observados en campo por observación directa pueden modificar los resultados para la clasificación del macizo rocoso, en este sentido, se debe tener precisión en identificar todos los parámetros.
- Dentro del sistema SMR (Slope Mass Rating) el factor F2 y F3 depende estrictamente de la observación y adecuada recolección de datos campo.
- La metodología SMR incluye correcciones basadas en el método de excavación (F4), mientras que Q-slope integra de forma directa la influencia ángulo de inclinación del talud.
- La clasificación RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski, y la clasificación SMR (Slope Mass Rating) de Romana, no contemplan la dimensión del afloramiento.
- Se ha identificado que los conglomerados diaclasados, en afloramientos con rugosidades onduladas y menor competencia, tienden a ser clasificados como inestables según el método Q-slope Barton, N., Bar, N. & Associates (2015).
- Dado que los métodos incluyen parámetros cualitativos, los resultados en ambos métodos dependerán en gran medida del criterio y experiencia de la persona que realiza la evaluación.
- A través de un análisis por interpolación de isógonas, los resultados para la clasificación geomecánica SMR identifica un área catalogada como “Totalmente estable” con puntuación entre 80 a 100 puntos, ubicada en el sector sur oeste.
- Se propone una ecuación de correlación logarítmica para depósitos de la Formación Luribay, presentando coeficiente de correlación  $R= 0,50$  y coeficiente de determinación  $R^2=0,17$ .
- El valor de  $R = 0,50$  indica una correlación moderada a fuerte entre SMR y Q-slope, lo que sugiere que, aunque existe una relación significativa entre ambos métodos, otros factores geológicos y geométricos de los afloramientos pueden influir en la estabilidad y no están completamente capturados por la ecuación.

- El  $R^2 = 0,17$  implica que aproximadamente el 17% de la variabilidad de los valores SMR puede explicarse mediante Q-slope usando la ecuación propuesta. Esto indica que la ecuación ofrece una referencia útil, pero no sustituye la evaluación directa en campo, especialmente en taludes con condiciones particulares o discontinuidades complejas.
- La ecuación propuesta puede ser utilizada como herramienta complementaria, pero se recomienda combinarla con análisis de campo y juicio profesional.
- La ecuación de correlación de Mohammad et al. (2020) proporcionó una referencia general para estimar el SMR; sin embargo, tiende a sobreestimar la estabilidad de los afloramientos analizados en este estudio. Por su parte, la ecuación empírica propuesta, adaptada específicamente al área de estudio, presenta un mejor ajuste y menor variación con respecto a los datos obtenidos en campo. Esto evidencia la importancia de desarrollar modelos locales específicos para la evaluación de la estabilidad de taludes, por tanto, para los afloramientos estudiados, se recomienda utilizar la ecuación propuesta como referencia principal.

## **5.2. Recomendaciones**

- Ampliar el número de estudios de caso en la Formación Luribay, aplicando de manera sistemática los sistemas SMR y Q-slope, con el fin de robustecer la correlación empírica y establecer rangos de aplicación más confiables.
- Complementar los métodos empíricos con análisis numéricos (ej. PLAXIS, FLAC3D) y modelación de estabilidad por elementos finitos, de modo que se puedan validar los resultados obtenidos y evaluar escenarios de carga o sismo.
- Implementar monitoreo geotécnico in situ en áreas de menor estabilidad, con el fin de correlacionar mediciones reales con predicciones empíricas y generar curvas de calibración específicas para el área de estudio.
- Considerar la influencia de factores externos, como lluvias intensas, variaciones hidrogeológicas y cargas inducidas por obras civiles, al aplicar otros métodos de clasificación, ya que pueden modificar significativamente la estabilidad a mediano plazo.

- Incorporar los resultados de esta investigación en la planificación urbana y vial del área de Mollasa, priorizando medidas preventivas en los sectores parcialmente estables para reducir el riesgo de remoción en masa.
- Es necesario que a futuro se generen ecuaciones empíricas de correlación con información recolectada de manera local, que contemplen grados de relación entre las variables.

### 5.3. Referencias bibliográficas

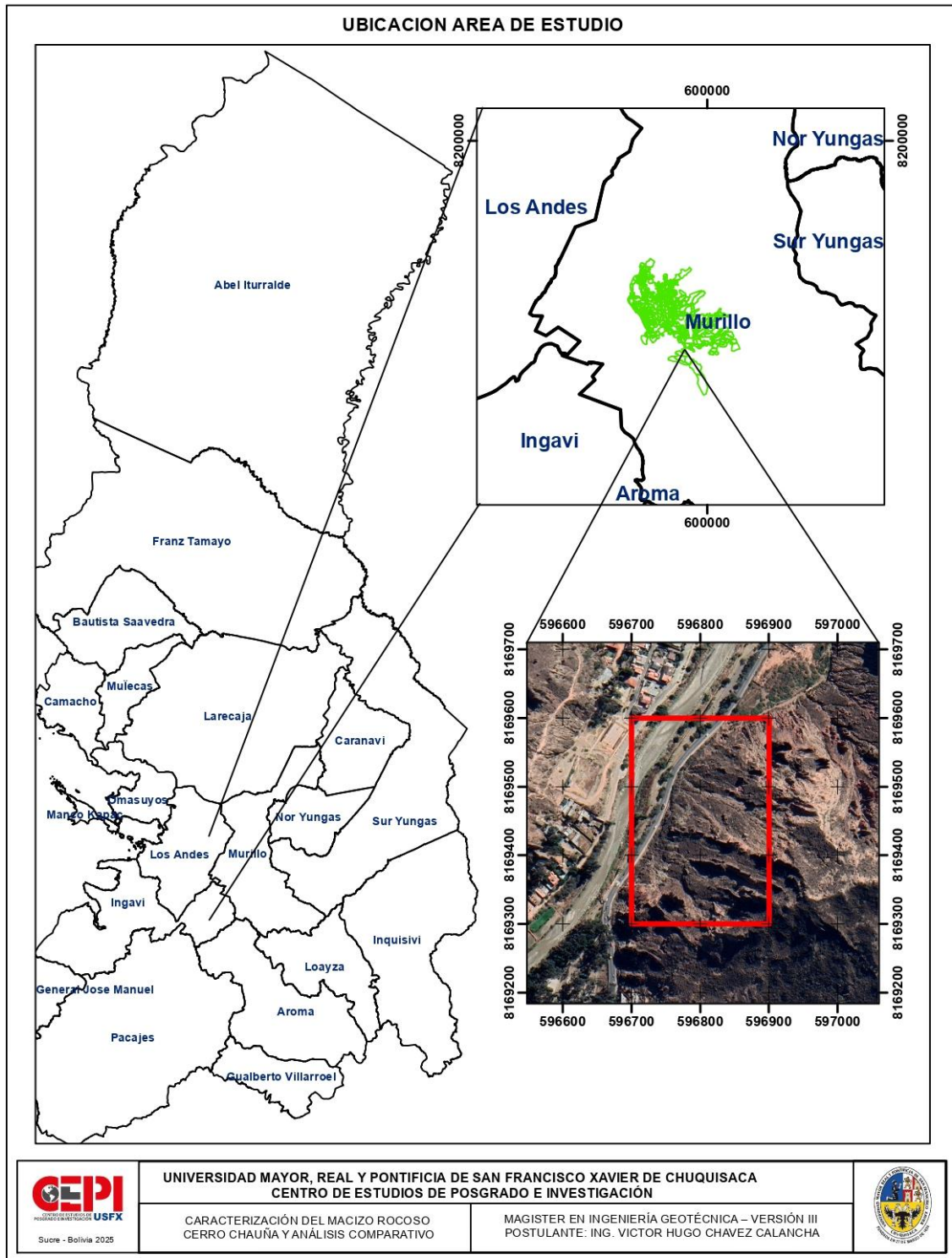
- 1) Amine, S., et al. (2017) Correlation between Rock mass rating, Q-system and Rock mass index based on field data. Laboratory of Applied Geophysics, *Geotechnics, Engineering Geology and the Environment, Mohammadia School of Engineers, Mohammed V University*.
- 2) ASTM D 5873 – 95 Método de Prueba Estándar para la Determinación de la Dureza de la Roca por el Método del Martillo de Rebote
- 3) Bar, N., et al. (2016) Application of the Q-slope method to highly weathered and saprolitic rocks in Far North Queensland, *Volume: Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*
- 4) Barton, N., Bar, N. & Associates (2015) Introducing the Q-slope method and its intended use in civil and mining engineering projects, *Eurock 2015 & 64th Geomechanics Colloquium*.
- 5) Barton, N., Bar, N. & Ryan C. (2016) Application of the Q-slope method to highly weathered and saprolitic rocks in Far North Queensland, International Symposium Eurock 2016.
- 6) Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics, Springer Verlag*, 6 (1), 189-236.
- 7) Blanco, D. & Cepeda D. (2015) *Análisis y evaluación comparativa del método chino “Basic Quality” Bq y los Métodos “RMR” y “Q” Para Clasificación de Macizos Rocosos*. Trabajo de grado de Especialista en Geotecnia Ambiental: Universidad de Santander Facultad de Ingenierías.
- 8) Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*, Publicación WILEY-INTERSCIENCE John. Wiley & Sons
- 9) Botello, G. (2006), *Estimación de los parámetros físico-mecánicos para el cálculo de estabilidad de taludes en macizos rocosos*. Tesis de grado Licenciatura en Ingeniería Civil: Universidad Mayor de San Andrés.

- 10) Daetz, M. (2017). *Análisis de macizos rocosos previo al diseño y construcción del proyecto hidroeléctrico el Pojom, Huehuetenango*. Trabajo de graduación para obtener el título de Ingeniero Geólogo; Universidad de San Carlos de Guatemala.
- 11) Dobrovolny, E. (1956) *Geología del Valle Superior de La Paz*. Bolivia: La Paz.
- 12) Espejo, R. et al. (2011) *Memoria descriptiva, Mapa de Riesgos de los Distritos Urbanos de Municipio de La Paz*: Gobierno Autonomo Municipal de La Paz.
- 13) Gonzales, L. (2004) *Ingeniería Geológica*. España: Madrid.
- 14) GEMA. (2007). *Tipos de Movimientos en Masa – Clasificaciones*. Servicio Nacional de Geología y Minería Publicación Geológica Multinacional No. 4.
- 15) Guaygua, G. (2008) *Geología estructural - área comprendida entre las localidades de Mecapaca – Millocato*. Tesis de grado Licenciatura en Ingeniería Geológica: Universidad Mayor de San Andres.
- 16) Hernández, J., et al. (2018) *Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones*, Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica Volumen 37, número 5.
- 17) Hoek E. (2007) *Practical Rock Engineering*. Evert Hoek Consllting Engineer. Inc. Canada: North Vancouver.
- 18) Honorable Alcaldía de La Paz, Consultoras BRGM-BCOM, Prudencio Claros y Asociados (1977) *Características Litoestratigraficas de la Cuenca de La Paz y Alrededores n° 5*. La Paz Bolivia.
- 19) Honorable Alcaldía de La Paz, Consultoras BRGM-BCOM, Prudencio Claros y Asociados (1977) *Características Geotécnicas de la Cuenca de La Paz y Alrededores n° 15*. La Paz Bolivia.
- 20) Hudson, J., (1989). *Rock mechanics principles in engineering practice*: London.
- 21) Mahmoud, H., et al. (2010) *Application of Rock Mass Characterization for Determining the Mechanical Properties of Rock Mass: A Comparative Study*. USA.

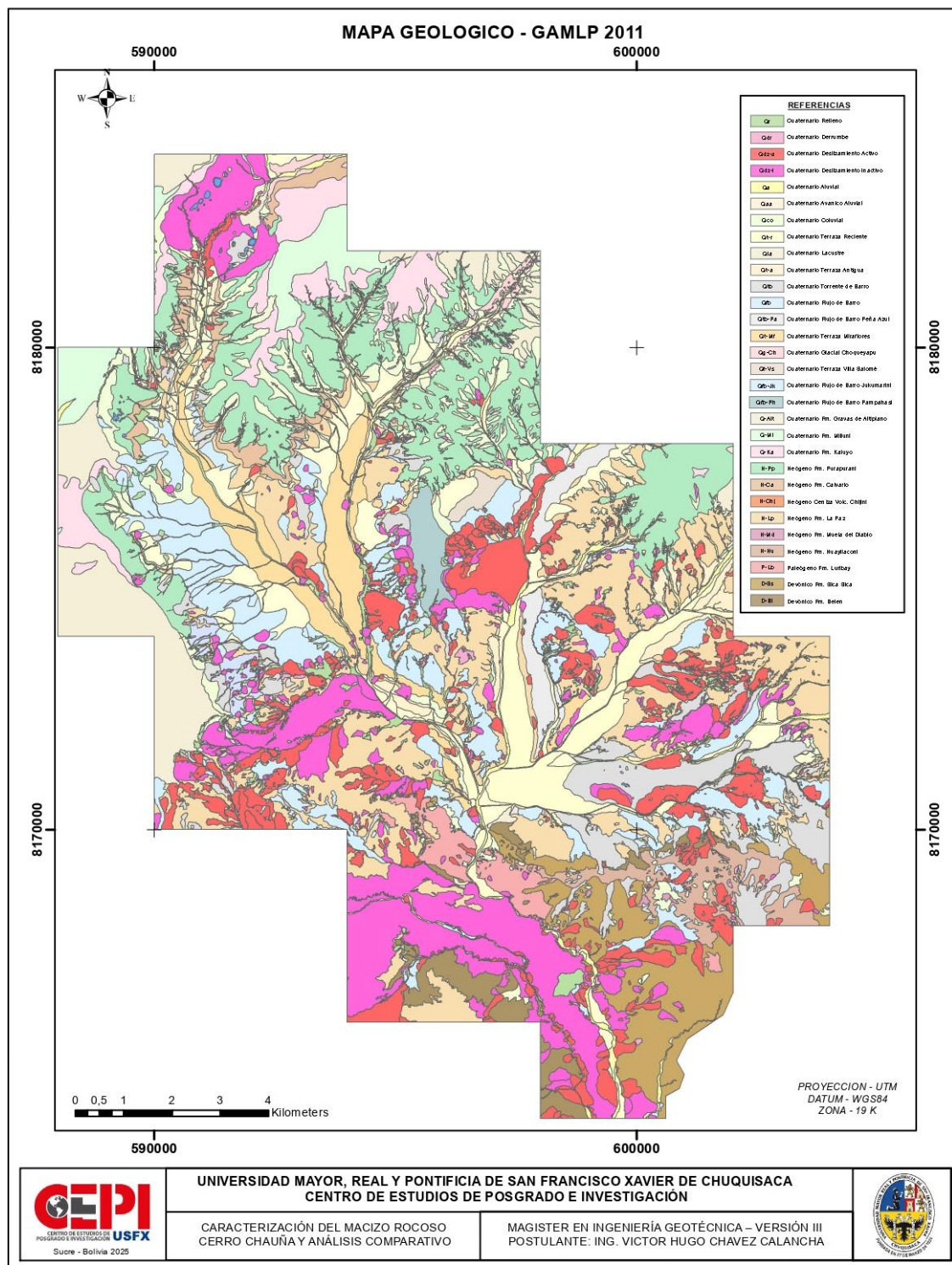
- 22) Mohammad A. et al. (2020). *An empirical method for slope mass rating Q-slope correlation for Isfahan province, Iran. Published by Elsevier B.V.*
- 23) Mian S. et al. (2018). *Assessment of Rock Mass Quality and Deformation Modulus by Empirical Methods along Kandiah River, KPK. Pakistan.*
- 24) Palmer, A., et al. (2001), *Tutorial sobre el coeficiente de correlación lineal de Pearson en Internet.* Facultad de Psicología. Universitat de les Illes Balears España.
- 25) Ramírez, P., Monge L. (2004) *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes.*
- 26) Romana, M. et al. (2001). *La clasificación geomecánica SMR: Aplicación, experiencias y validación. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables – Madrid, 2001.*
- 27) Romana, M. et al. (2015). *Slope Mass Rating (SMR) Geomechanics Classification: Thirty Years Review, Congress 2015 Proceedings - International Symposium on Rock Mechanics, Quebec, Canada.*
- 28) Suarez, R. (2000) *Compendio de Geología de Bolivia. Revista Técnica de YPF. 18 (1-2), 1,2, 58.*
- 29) Vargas, E. (1992). *La fotografía Aérea y sus Aplicaciones a Estudios Geológicos TOMO I.* La Paz - Bolivia: CEUB.
- 30) Yáñez, D. (2021) *Aplicación de la metodología de análisis empírico Q Slope para evaluación de taludes en la provincia Bolívar, caso de estudio vía Guaranda – Echeandía.* Trabajo de Titulación Previo a la obtención del Título de: Magíster en Geotecnia. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

# ANEXOS

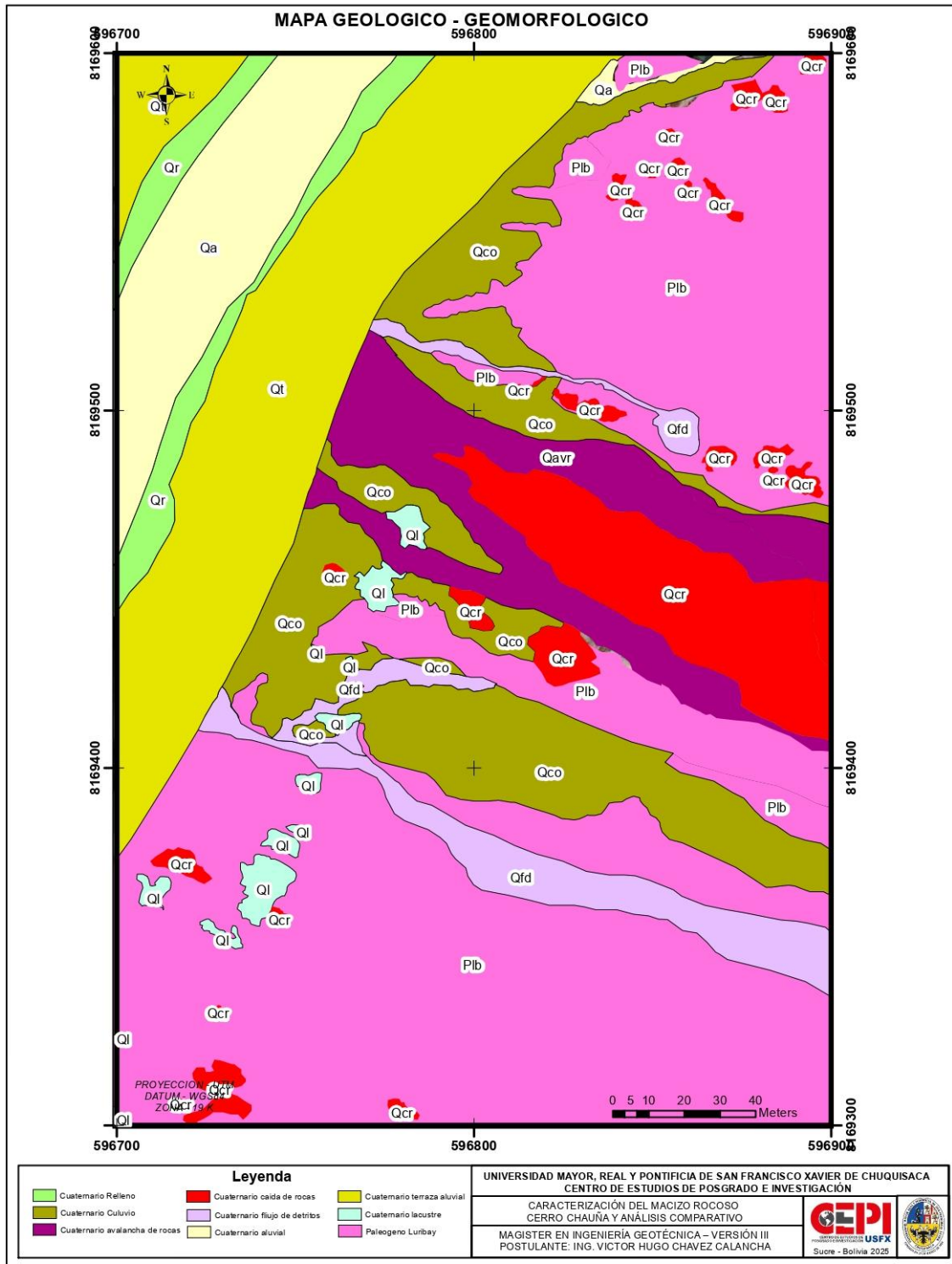
## A. Ubicación



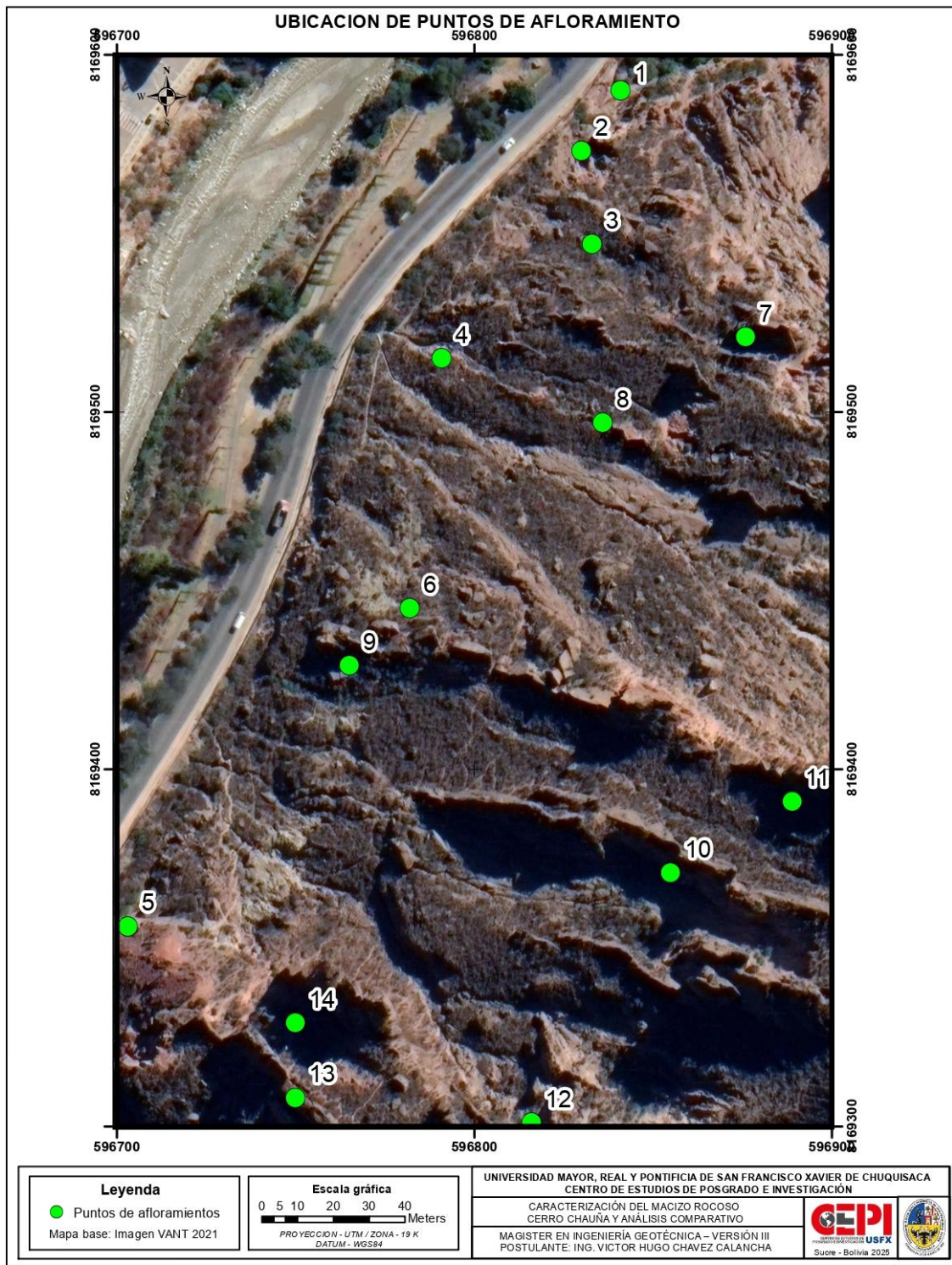
## B. Mapa geológico 2011 – GAMLP



C. Mapa geológico – geomorfológico 2025



**D. Ubicación puntos de afloramiento**



**E. Clasificación geomecánica en base al esquema RMR modificado (Bieniawski, 1989)**

**Punto de afloramiento 1**

1	Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación		15	10	7	4	0	

## Punto de afloramiento 2

1	Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25- may	05- ene	< 1
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación		15	10	7	4	0	

### Punto de afloramiento 3

1	Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25- may	05- ene	< 1
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación		15	10	7	4	0	

#### Punto de afloramiento 4

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

## Punto de afloramiento 5

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

## Punto de afloramiento 6

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

## Punto de afloramiento 7

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

### Punto de afloramiento 8

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

## Punto de afloramiento 9

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

## Punto de afloramiento 10

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

## Punto de afloramiento 11

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

## Punto de afloramiento 12

Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

### Punto de afloramiento 13

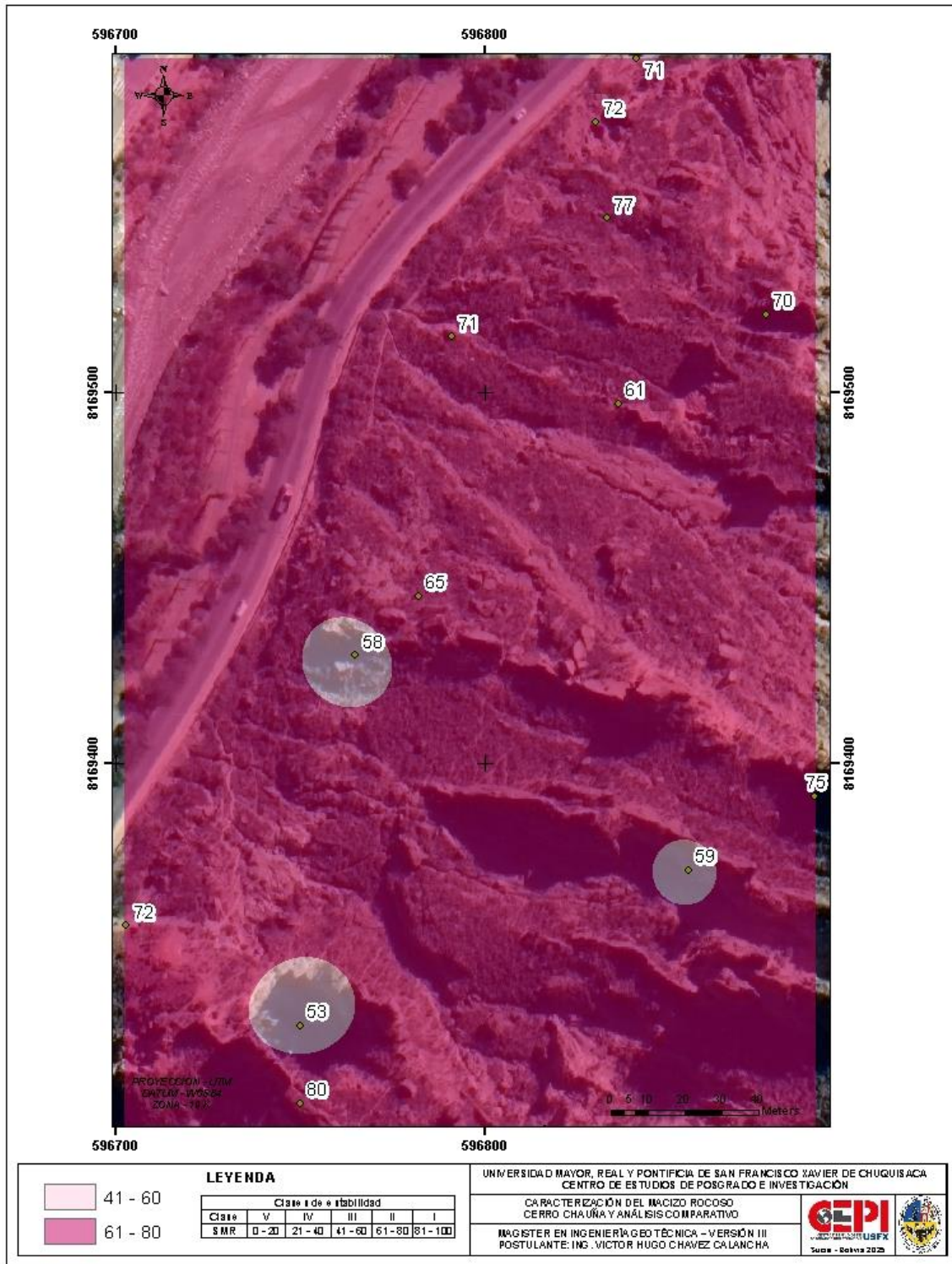
Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
	Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
Puntuación		20	17	13	6	3		
Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
Puntuación		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
	Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
	Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0		

**Punto de afloramiento 14**

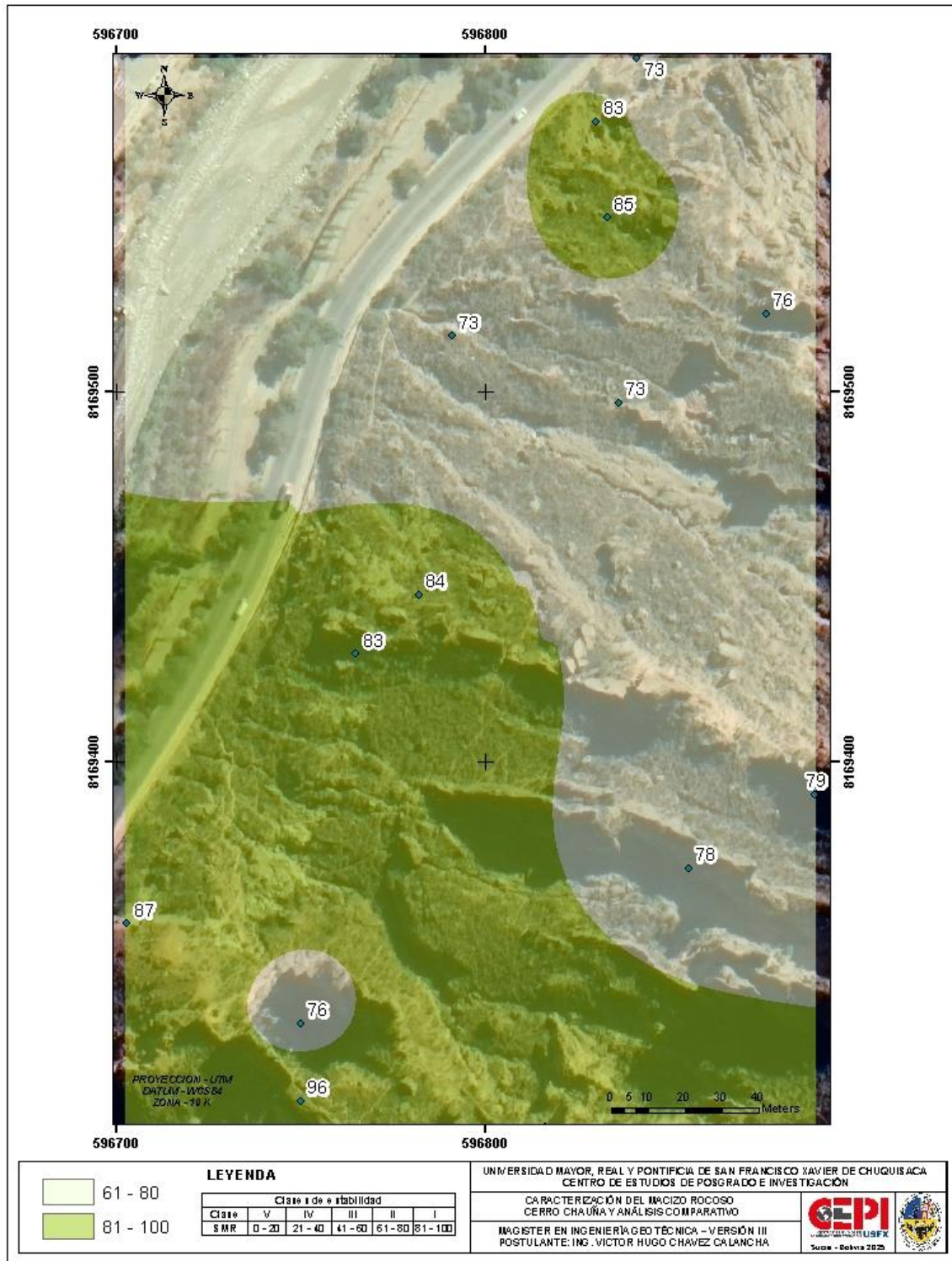
1	Resistencia de la Matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)		90% a 100%	75% a 90%	50% a 75%	25% a 50%	< 25		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	< 0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 a 1mm	1 a 5mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy Alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua Freática	Caudal general por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 a 25 litros/min	25 a 125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión Principal mayor	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación		15	10	7	4	0	

**F. Mapas de isógonas**

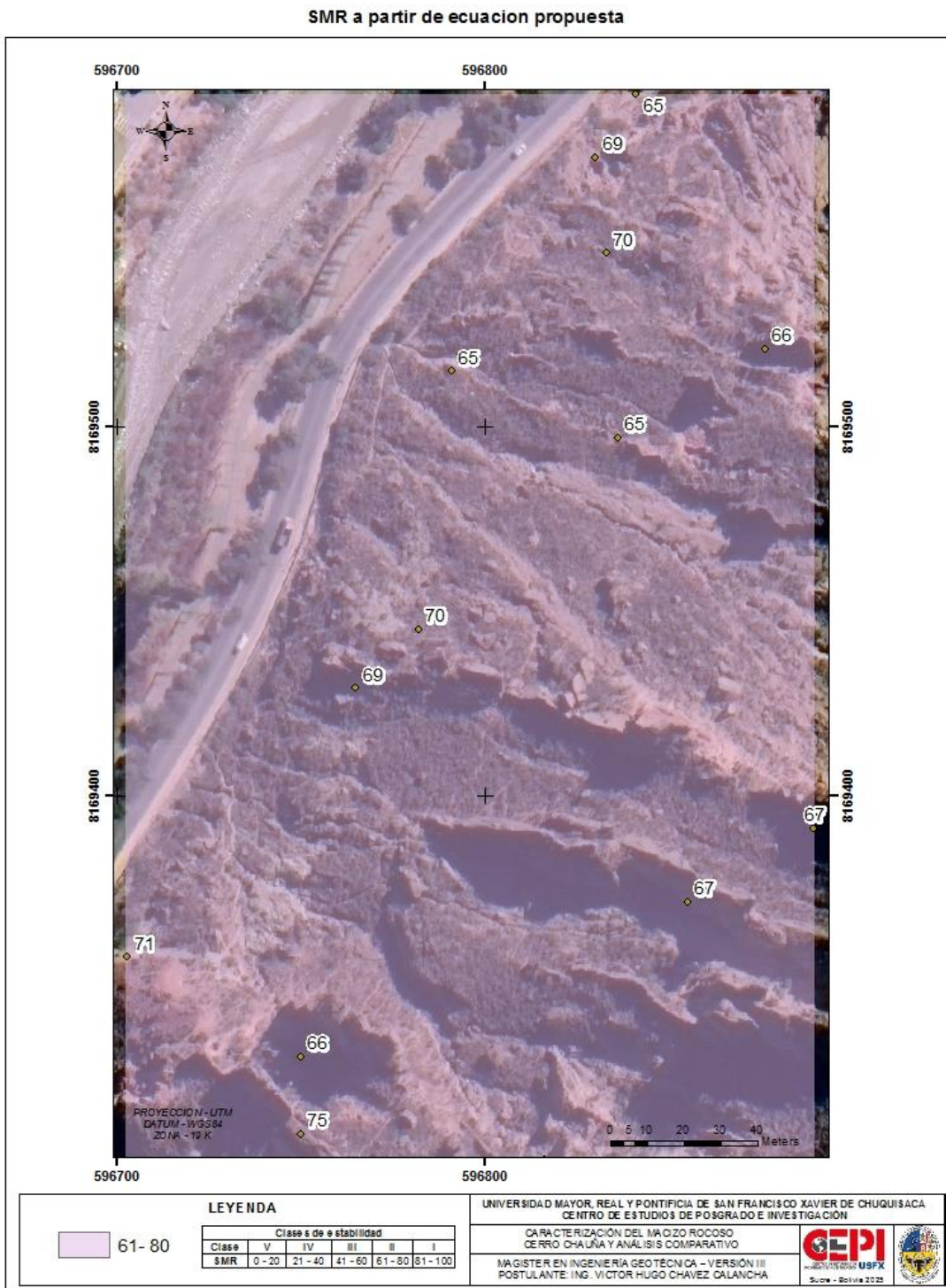
**a) SMR (Slope Mass Rating) datos de campo.**



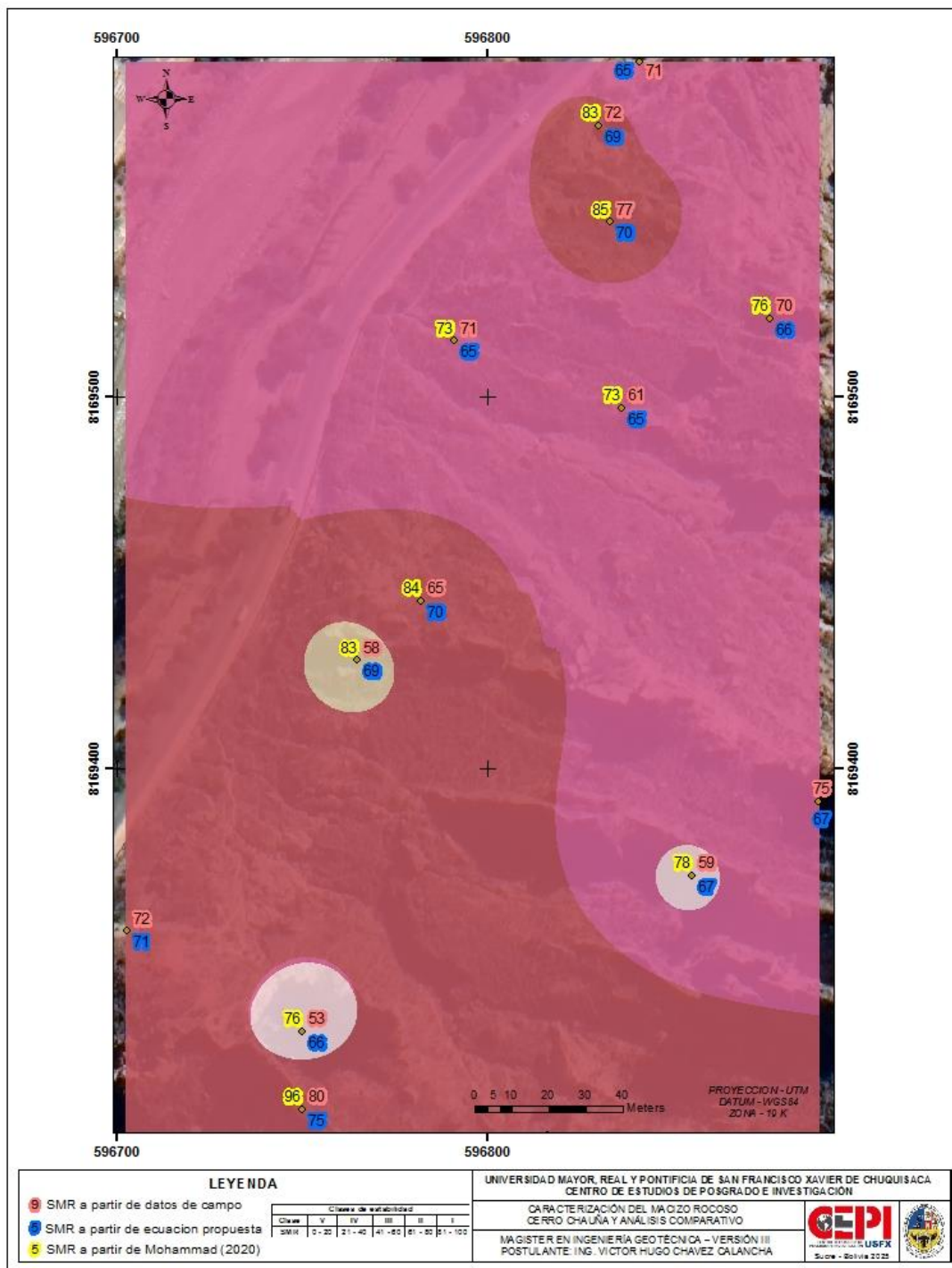
b) SMR (Slope Mass Rating) a partir de ecuación de Mahmoud, H., et al. (2020)



c) SMR (Slope Mass Rating) a partir de ecuación propuesta

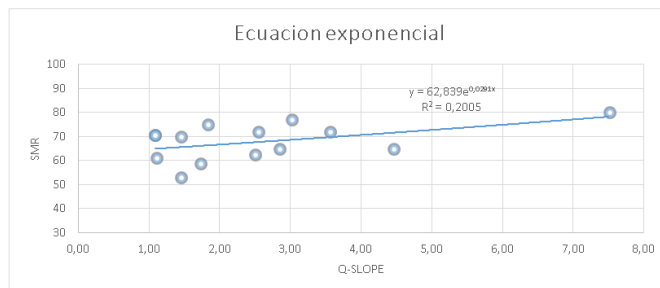


d) Sobre posición datos SMR de los tres autores

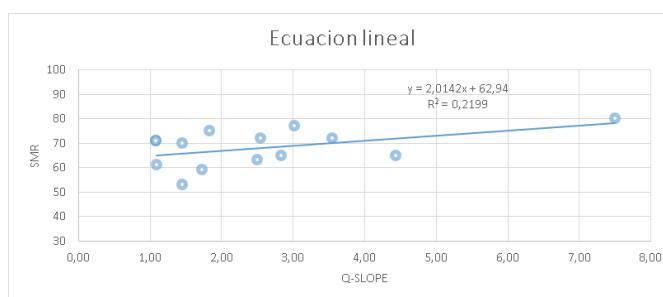


## G. Ecuaciones empíricas probadas

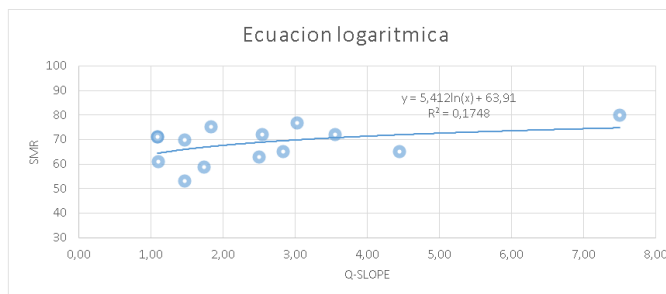
### a) Ecuación exponencial



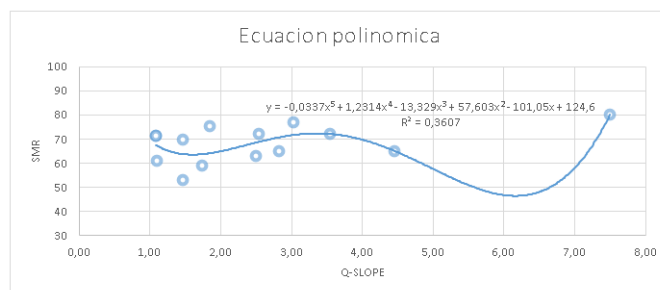
### b) Ecuación lineal



### c) Ecuación logarítmica



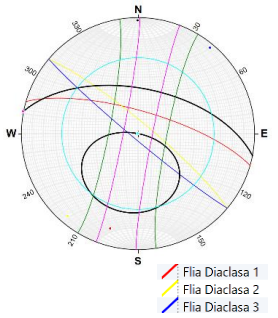
### d) Ecuación polinómica



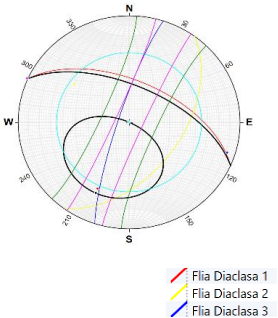
## H. Tipos de roturas

Realizado con el programa Stereonet v.11.5.1

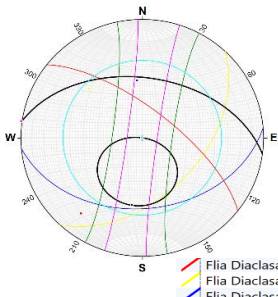
### Punto de Afloramiento No 1

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		Dirección del talud:	011°	Buzamiento del talud:	058°
1		Ángulo de fricción:	35°	Pto. de afloramiento: 1	
		Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para las familias de las diaclasas 2 y 3 debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_i < \theta_p$ .			
		Sin embargo, para la Flia de la Diaclasa 1, si existe una potencial falla planar debido a que $\theta_i > \theta_p > \phi$ , y el dip direction del plano de falla de dicha familia se encuentra dentro de los 20° del dip direction de la cara del talud.			
		No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.			
		Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$			

### Punto de Afloramiento No 2

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		Dirección del talud:	024°	Buzamiento del talud:	062°
2		Ángulo de fricción:	35°	Pto. de afloramiento: 2	
		Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para las familias de las diaclasas 2 y 3 debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_i < \theta_p$ .			
		Sin embargo, para la Flia de la Diaclasa 1, si existe una potencial falla planar debido a que $\theta_i > \theta_p > \phi$ , y el dip direction del plano de falla de dicha familia se encuentra dentro de los 20° del dip direction de la cara del talud.			
		Existe potencial Falla en Cuña para las intersecciones Flia Diaclasa 1 con la Flia Diaclasa 2, y Flia Diaclasa 1 con Flia Diaclasa 3, ya que las intersecciones se exponen en la cara del talud y son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.			
		Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$			

### Punto de Afloramiento No 3

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		Dirección del talud:	008°	Buzamiento del talud:	048°
3		Ángulo de fricción:	35°	Pto. de afloramiento: 3	
		Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para ninguna de las familias de las diaclasas debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_i < \theta_p$ .			
		No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.			
		Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$			

**Punto de Afloramiento No 4**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		4		Dirección del talud:	038°
Ángulo de fricción:	35°			Pto. de afloramiento: 4	
Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para ninguna de las familias de las diaclasas debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_i < \theta_p$ .					
No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.					
Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$					

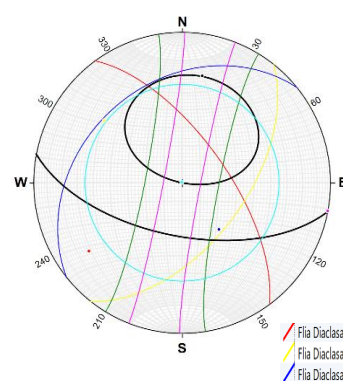
**Punto de Afloramiento No 5**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		5		Dirección del talud:	211°
Ángulo de fricción:	35°			Pto. de afloramiento: 5	
Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para las familias de las diaclasas 1 y 2 debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_i < \theta_p$ .					
Sin embargo, para la Flia de la Diaclasa 3, si existe una potencial falla planar debido a que $\theta_i > \theta_p > \phi$ , y el dip direction del plano de falla de dicha familia se encuentra dentro de los 20° del dip direction de la cara del talud.					
Existe potencial Falla en Cuña para la intersección de la Flia Diaclasa 2 con la Flia Diaclasa 3, ya que dicha intersección se expone en la cara del talud y es más pronunciada que el ángulo de fricción promedio.					

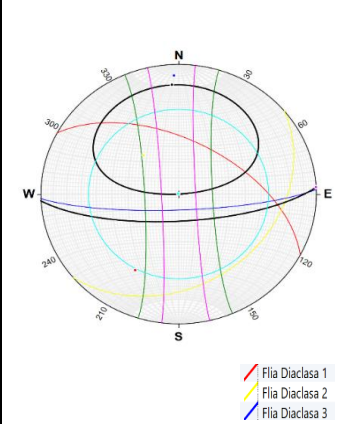
**Punto de Afloramiento No 6**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		6		Dirección del talud:	016°
Ángulo de fricción:	35°			Pto. de afloramiento: 6	
Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para las familias de las diaclasas 2 y 3 debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_i < \theta_p$ .					
Sin embargo, para la Flia de la Diaclasa 1, si existe una potencial falla planar debido a que $\theta_i > \theta_p > \phi$ , y el dip direction del plano de falla de dicha familia se encuentra dentro de los 20° del dip direction de la cara del talud.					
No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.					
Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$					

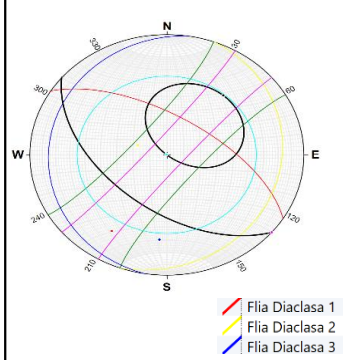
**Punto de Afloramiento No 7**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
7		Dirección del talud:	191°	Buzamiento del talud:	061°
		Ángulo de fricción:	35°	Pto. de afloramiento: 7	
		Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para ninguna de las familias de las diaclasas debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_i < \theta_p$ .			
		No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.			
Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$					

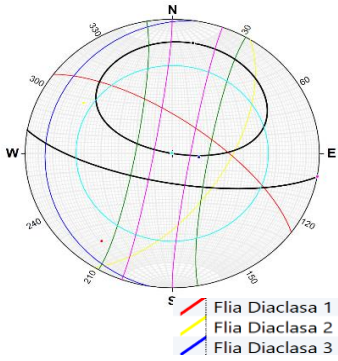
**Punto de Afloramiento No 8**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
8		Dirección del talud:	177°	Buzamiento del talud:	073°
		Ángulo de fricción:	35°	Pto. de afloramiento: 8	
		Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para las familias de las diaclasas 1 y 2 debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_i < \theta_p$ .			
		Sin embargo, para la Flia de la Diaclasa 3, si existe una potencial falla planar debido a que $\theta_i > \theta_p > \phi$ , y el dip direction del plano de falla de dicha familia se encuentra dentro de los 20° del dip direction de la cara del talud.			
No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.					
Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$					

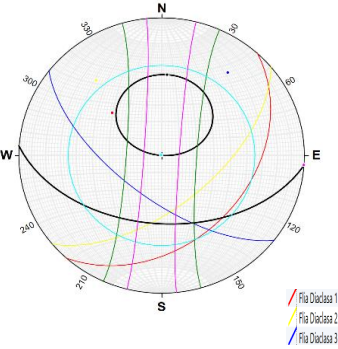
**Punto de Afloramiento No 9**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
9		Dirección del talud:	220°	Buzamiento del talud:	054°
		Ángulo de fricción:	35°	Pto. de afloramiento: 9	
		Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para ninguna de las familias de las diaclasas debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_i < \theta_p$ .			
		No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.			
Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), existe falla potencial pues la proyección del polo para la Familia de Diaclasas 2 se encuentra dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$					

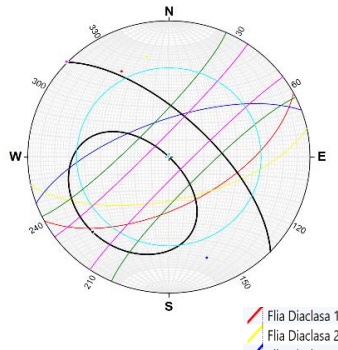
**Punto de Afloramiento No 10**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		10		Dirección del talud:	190°
Ángulo de fricción:	35°			Pto. de afloramiento: 10	
Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para ninguna de las familias de las diaclasas debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_r < \theta_p$ .					
No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.					
Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$					

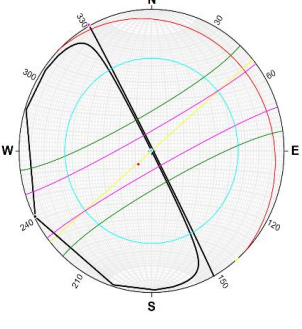
**Punto de Afloramiento No 11**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		11		Dirección del talud:	184°
Ángulo de fricción:	35°			Pto. de afloramiento: 11	
Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para ninguna de las familias de las diaclasas debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_r < \theta_p$ .					
Existe potencial Falla en Cuña para la intersección de la Flia Diaclasa 1 con la Flia Diaclasa 3, ya que dicha intersección se expone en la cara del talud y es más pronunciada que el ángulo de fricción promedio.					
Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$					

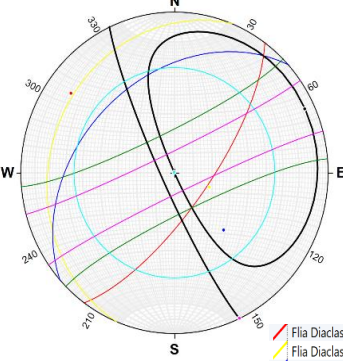
**Punto de Afloramiento No 12**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		12		Dirección del talud:	044°
Ángulo de fricción:	35°			Pto. de afloramiento: 12	
Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para ninguna de las familias de las diaclasas debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_r < \theta_p$ .					
No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.					
Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_i) + \phi$					

**Punto de Afloramiento No 13**






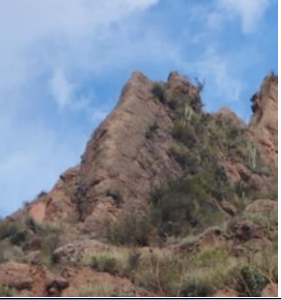


N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		Dirección del talud:	062°	Buzamiento del talud:	089°
13	 <p>Flia Diaclasa 1 Flia Diaclasa 2</p>	Ángulo de fricción:	35°	Pto. de afloramiento:	13
		Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para la familia de las diaclasas 2 debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_t < \theta_p$ .			
		Sin embargo, para la Flia de la Diaclasa 1, si existe una potencial falla planar debido a que $\theta_t > \theta_p > \phi$ , y el dip direction del plano de falla de dicha familia se encuentra dentro de los 20° del dip direction de la cara del talud.			
		No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.			
		Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_t) + \phi$			






**Punto de Afloramiento No 14**

N°	Proyección estereográfica	Análisis (Tipo de falla más probable que ocurra)			
		Dirección del talud:	245°	Buzamiento del talud:	083°
14	 <p>Flia Diaclasa 1 Flia Diaclasa 2 Flia Diaclasa 3</p>	Ángulo de fricción:	35°	Pto. de afloramiento:	14
		Se verificó en primera instancia el tipo de Falla Planar, concluyendo que no existe una falla potencial para ninguna de las familias de las diaclasas debido a que no están expuestas en la cara del talud, es decir $\theta_t < \theta_p$ .			
		No existe una potencial Falla en Cuña ya que las intersecciones de las familias de diaclasas no se exponen en la cara del talud y no son más pronunciadas que el ángulo de fricción promedio.			
		Con respecto al Vuelco/Derrumbe (Toppling), no hay falla potencial pues es claro en la proyección que los polos de las familias no se encuentran dentro de la "envolvente de exposición" para el derrumbe. $\theta_p < (90 - \theta_t) + \phi$			

\* Angulo de fricción en base a: Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. Evert Hoek Consulting Engineer, Inc.

**I. Registro fotográfico**

<b>Punto de afloramiento</b>	<b>Fotografía</b>	<b>Punto de afloramiento</b>	<b>Fotografía</b>
1		8	
2		9	
3		10	
4		11	

5		12	
6		13	
7		14	