UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Análisis comparativo de métodos empíricos para la evaluación de taludes rocosos integrando aspectos geológicos y ambientales

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Cesar Patricio Borja Bernal
Magister en Protección Ambiental

Madrid, 2024

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Doctorado en Investigación, Modelización y Análisis del Riesgo en Medio Ambiente

Análisis comparativo de métodos empíricos para la evaluación de taludes rocosos integrando aspectos geológicos y ambientales

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Cesar Patricio Borja Bernal
Magister en Protección Ambiental

Bajo la dirección de:
Dr. Ricardo Laín Huerta (Director)
Dr. Luis Jordá Bordehore (Codirector)

Madrid, 2024

Título: Análisis comparativo de métodos empíricos para la evaluación de taludes rocosos integrando aspectos geológicos y ambientales

Autor: Cesar Patricio Borja Bernal

Programa de Doctorado: Doctorado en Investigación, Modelación y Análisis del Riesgo en Medio Ambiente

Dirección de tesis:

Dr. Ricardo Laín Huerta, Catedrático de Universidad, Universidad Politécnica de Madrid (Director)

Dr. Luis Jordá Bordehore, Profesor Contratado Doctor, Universidad Politécnica de Madrid (Codirector)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Dedicado a mis hijos

Agradecimientos

A mis directores, Dr. Ricardo Laín y Dr. Luis Jordá, por ofrecerme la oportunidad de desarrollar la presente investigación bajo su sabia supervisión. Su orientación ha sido crucial para alcanzar los objetivos planteados.

A Luis y Ana, por estar a mi lado y ofrecerme el respaldo y soporte necesarios cuando el objetivo parecía incierto, soy afortunado de tenerlos como amigos y sobre todo de haber encontrado a mi hermano de camino, mi ñaño Luis.

Al Dr. Paúl Carrión por sus valiosos consejos y apoyo constante. Su amistad, soporte y guía han sido fundamentales en este proceso.

A la Dra. María Jesús quien soporto incesantes bombardeos de preguntas sobre los procesos administrativos, siempre con amabilidad y prontitud en sus respuestas. Su dedicación y paciencia son dignas de reconocimiento.

A toda mi familia, especialmente a Paty, Vale, Cielo, Juan, Isabella y Joaquín, quienes son mi fuente de alegría y la energía que me impulsa a seguir adelante. Su amor incondicional ha sido esencial en este proyecto de vida.

Gracias a todos por su invaluable energía vital en este viaje temporal.

Abstract

The study of processes that lead to slope instability and the methodologies that facilitate their classification is crucial for enhancing public safety, preventing natural disasters, and promoting best practices in geotechnical engineering. This research aims to evaluate and compare various empirical methods for analyzing the stability of rock slopes in different geological and environmental contexts, proposing alternatives that advance the state of the art in this field.

The proposed methodology begins with an evaluation and synthesis of the current state of knowledge. Bibliographic and bibliometric techniques were employed to identify the most promising methods for investigation, alongside a review of the scientific output related to empirical methods for rock slope stability analysis over the past 38 years. The results of the scientific production analysis in this area demonstrate a sustained increase in high-impact scientific publications from 1984 to 2022, with a notable surge beginning in 2013.

This trend suggests a growing dominance in the scientific community, indicating an increasing interest in published results and a potential sustained rise in high-impact articles in the future. An analysis of bibliographic citations highlights the significance of the Q-slope method, which, despite being relatively recent, has garnered a substantial number of citations compared to other empirical techniques for evaluating rock slope stability.

The study has also identified five key research areas that underpin the enhancement of scientific knowledge in this domain: i) geomechanical criteria and parameters for calculating safety factors, ii) empirical methods for classifying rock slopes, iii) numerical analysis and finite element methods for slope stability, iv) computational analysis of the strength properties of rock masses, and v) geomechanical methods for evaluating rock masses.

This research contributes to the body of scientific knowledge related to the Q-slope geomechanical method and its applicability across various climatic and geological contexts. It stands out by providing a geomechanical characterization of rock slopes, considering critical variables such as geographic location, climate, lithology, and failure types, statistically demonstrating an overall accuracy of 80% in implementing the Q-slope method in Andean countries.

The findings emphasize the importance of stereography in the Q-slope method, particularly in scenarios where rock slopes exhibit complex structures, such as multi-faced slopes. These slopes present variations in the orientation of discontinuities along different exposed faces of a single cut, potentially leading to distortions or confusion when applying empirical classification methods for rock slopes. The thesis also investigates a less-studied variable: the effect of ice wedges on rock slopes, while deepening the understanding of photogrammetry and its applications in engineering and education, providing a holistic perspective on the topic.

This approach allows for the collection of relevant data that is subsequently evaluated using empirical analysis methods, such as Q-slope. Finally, the research introduces improvements to the methodology proposed by Barton in 2015, streamlining the process of gathering geomechanical information in situations of rock slope instability by summarizing input parameters in various graphical formats. These enhancements facilitate an effective and precise application of the Q-slope methodology, particularly where construction techniques and ground stability are critical.

In summary, this study advances scientific, technical, and pedagogical knowledge in the classification of rock slopes. It provides an updated overview of existing information and proposes enhancements to the processes and methods used for empirical stability evaluation. Furthermore, it establishes a solid foundation for future research, promoting the refinement and development of both existing and novel methodologies.

Resumen

El estudio de procesos que generan inestabilidad de taludes y las metodologías que facilitan su clasificación son de suma importancia para mejorar la seguridad pública, prevenir desastres naturales y promover buenas prácticas en la ingeniería geotécnica. La presente investigación tiene como objetivo evaluar y comparar diversos métodos empíricos de análisis de estabilidad de taludes rocosos en diferentes contextos geológicos y ambientales, proponiendo alternativas que mejoren el estado del arte del área de estudio.

La metodología propuesta se inicia evaluando y sintetizando la situación actual del conocimiento, para lo cual se aplicaron técnicas bibliográficas y bibliométricas, que permitieron identificar los métodos más prometedores para la investigación, así como el desarrollo de la producción científica relacionada con los métodos empíricos para análisis de estabilidad de taludes rocosos de los últimos 38 años. Los resultados del análisis de producción científica en el área del conocimiento demuestran que el área estudiada ha experimentado un crecimiento sostenido en la cantidad de publicaciones científicas de alto impacto desde 1984 hasta el 2022, con un notable aumento a partir de 2013.

Esto sugiere que existe una tendencia creciente del dominio científico, anticipando al mismo tiempo el interés sobre los resultados publicados y un posible incremento sostenido de artículos científicos de alto impacto en el futuro. Al analizar las citas bibliográficas, se destaca la relevancia del método Q-slope, el cual, a pesar de ser el más reciente, cuenta con una cantidad de citas significativas en comparación con otras técnicas empíricas para la evaluación de estabilidad de pendientes rocosas.

El estudio también ha identificado cinco áreas primordiales de investigación sobre las que se basa el enriquecimiento del saber científico en esta área del conocimiento, i) criterios y parámetros geomecánicos para el cálculo de factores de seguridad, ii) métodos empíricos para clasificación de taludes rocosos, iii) análisis numérico y de elementos finitos para estabilidad de taludes, iv) análisis computacional de las propiedades de resistencia de macizos rocosos y v) métodos geomecánicos para evaluación de macizos rocosos.

La investigación contribuye a la ampliación del acervo científico relacionado con el método geomecánico Q-slope y su aplicabilidad en diferentes contextos

climáticos y geológicos. La investigación destaca por realizar un estudio sobre la caracterización geomecánica de taludes rocosos, considerando variables importantes como la ubicación geográfica, el clima, la litología y el tipo de falla, demostrando estadísticamente que se puede llegar a una precisión global del 80% en la implementación del método Q-slope en países andinos.

Los resultados resaltan la importancia de la estereografía en el método Q-slope, especialmente en escenarios donde los taludes rocosos presentan estructuras complejas, como taludes de caras múltiples. Estos taludes combinan variaciones en la orientación de las discontinuidades con las diferentes caras expuestas de un mismo corte, lo que puede provocar distorsión o confusión al aplicar métodos empíricos para clasificación de taludes rocosos. La tesis analiza una variable poco estudiada; el efecto de las cuñas de hielo en taludes de roca, y profundiza el conocimiento de la fotogrametría y su aplicación en la ingeniería y enseñanza, proporcionando una visión holística del tema de estudio. Esto permite obtener datos relevantes que posteriormente son evaluados mediante métodos de análisis empírico, como el Q-slope. Por último, la investigación introduce mejoras a la metodología propuesta por Barton en 2015, facilitando el procedimiento de recopilación de información geomecánica en situaciones de inestabilidad de taludes rocosos: se resumen los parámetros de entrada en varios gráficos. Estas mejoras permiten un manejo eficaz y preciso de la metodología Q-slope, especialmente donde las técnicas constructivas y la estabilidad del terreno son críticas.

En resumen, el estudio contribuye al avance del conocimiento científico, técnico y pedagógico en el ámbito de la clasificación de taludes rocosos. Proporciona una actualización de la información existente y propone mejoras en los procesos y métodos de evaluación de estabilidad de taludes por métodos empíricos. Además, establece una base sólida para nuevas investigaciones, promoviendo el perfeccionamiento y desarrollo de metodologías existentes y futuras.

Tabla de Contenido

1. Introducción 1

1.1. Antecedentes y estado del arte ... 1

1.1.1. Macizos rocosos ... 2

1.1.2. Historia de las clasificaciones geomecánicas para macizos rocosos ... 4

1.1.3. Levantamiento de información en campo ... 7

1.2. Objetivo general ... 12

1.3. Hipótesis de partida ... 13

2. Metodología 13

2.1. Bibliometría sobre métodos empíricos de taludes rocosos ... 14

2.1.1. Análisis de rendimiento ... 16

2.2. Propiedades geomecánicas de la matriz rocosa ... 22

2.2.1. Tipos de rocas ... 23

2.2.2. Color ... 25

2.2.3. Tamaño de grano ... 26

2.2.4. Textura de la roca ... 27

2.2.5. Porosidad ... 27

2.2.6. Humedad ... 28

2.2.7. Densidad ... 28

2.2.8. Meteorización ... 29

2.2.9. Rotura frágil de las rocas ... 32

2.2.10. Resistencia de la matriz rocosa ... 33

2.2.11. Comportamiento de las rocas frente a esfuerzos de compresión ... 35

2.2.12. Esclerómetro o martillo de Schmidt ... 36

2.2.13. Ensayo Franklin o de carga puntual (PLT) ... 38

2.2.14. Ensayo de tracción indirecta ... 44

2.2.15. Ensayo de compresión simple ... 45

2.3. Propiedades geomecánicas de las discontinuidades ... 47

2.3.1. Tipo y orientación de las discontinuidades ... 48

2.3.2. Censo de discontinuidades ... 49

2.3.3. Espaciado ... 50

2.3.4. RQD ... 52

2.3.5. Abertura ... 54

2.3.6. Relleno ... 55

2.3.7. Persistencia ... 55

2.3.8. Rugosidad ... 56

2.3.9. Ensayo tilt test ... 58

2.4. Fotogrametría ... 59

2.4.1. Structure from Motion ... 61

2.4.2. Levantamiento de campo para aplicar la técnica SfM 62
2.4.3. Parametrización de macizos rocosos en modelos 3D 65
2.4.4. Análisis cinemático 67
2.5. Clasificaciones geomecánicas para taludes rocosos 69
2.5.1. Rock Mass Rating (RMR) 69
2.5.2. SMR 72
2.5.3. Q-slope 77
2.5.4. Aplicación de la estadística en geomecánica de taludes. 86
3. Compendio de publicaciones **91**
3.1. Antecedentes 91
3.2. Artículo 1 – Stability Assessment of Rock Slopes Using the Q-Slope Classification System: A Reliability Analysis Employing Case Studies in Ecuador 95
3.3. Artículo 2 – Application of the Kinematic Assessment of Multi-faced Slopes Using Stereographic Projection: The Case Study of a Planar Failure on the Spondylus Coast, Ecuador 114
3.4. Artículo 3 – Application of the Q-Slope Empirical Approach for Slope Stability Assessment of Spanish Mountain Roads in Winter—Combining Remote Techniques with Virtual Reality 127
3.1. EUROCK 2024, Geomechanical classification graphical Q-slope (GQ-slope) 144
4. Discusión general **153**
4.1. Conclusiones 154
4.2. Futuras líneas de investigación 155
Referencias **157**
Anexos **178**
1. Otros resultados de la investigación 179

Lista de Figuras

Figura 1: Representación esquemática de macizo rocoso 3

Figura 2: Talud dividido en zonas y sectores para levantamiento de campo. 9

Figura 3: Talud de estudio y ejecución de estación geomecánica..... 10

Figura 4. Diagrama del proceso metodológico..... 14

Figura 5. Evolución de la investigación empírica en taludes rocosos (1984-2022)..... 17

Figura 6. Red de coocurrencia de palabras clave por autor 19

Figura 7. Red de coocurrencia de palabras clave por autor y año de publicación..... 21

Figura 8. Relación entre procesos de alteración y clima, fuente (Embretan y Thurnes,

Figura 9. Comportamiento de rotura sobre probetas sometidas a compresión, modificado de Ramírez and Alejano 2008. 32

Figura 10. Comportamiento de las muestras de roca sometidas a compresión (Ramírez &

Figura 11. Gráfico estándar para obtener resistencia uniaxial usando esclerómetro (Deere & Miller, 1966). A la derecha utilización en campo. 37

Figura 12. Geometría de probetas y muestras irregulares para ensayo de carga puntual, mofificado de (Jordá Luís et al., 2015; NLT-252/91, 1991; UNE 22950-5, 1996)..... 39

Figura 13. Prensa Franklin para ensayo de carga puntual..... 40

Figura 14. Corrección por diámetro de muestra para ensayo PLT (Ferrer & Gonzalez

Figura 15. Cantidad de muestras y estado de ejemplares antes y después del ensayo. 44

Figura 16: Ensayo tracción indirecta, laboratorio caminos canales y puertos UPM. 45

Figura 17: Muestra ensayada a compresión simple, laboratorio caminos canales y puertos

Figura 18: Propiedades de las juntas en un talud rocoso. 48

Figura 19: Representación geomecánica de la orientación de juntas. 49

Figura 20: Levantamiento de tres familias de discontinuidades, modificado de Rocscience. 52

Figura 21: Perfiles para determinar JRC, para un rango o escala de 10 cm (Barton &

Figura 22: Perfil de rugosidad, rango 1 a 10 m (ISRM 1981). 57

Figura 23: Procedimiento de campo valor de fricción básico (ϕb), tomado de (Jordá-

Figura 24: Proceso metodológico para clasificación de taludes rocosos usando
Figura 25: Diagrama de ubicación y ejemplo de cálculo coordenadas para puntos de
Figura 26: Replateo de puntos de control en campo. 63
Figura 27: Puntos de control y ubicación de estaciones para registro fotográfico. 64
Figura 28: Extracción de parámetros estructurales de nube de puntos 3D. 67
Figura 29: Modos de rotura en taludes rocosos: a) rotura plana, b) rotura en cuña y c)
Figura 30: Difusión mundial de trabajos referentes a Q-slope. 77
Figura 31. Carta para predicción de la estabilidad de taludes rocosos según Q-slope, (Bar
Figura 32. Esquema de diseño de taludes en mecánica de rocas con énfasis en el riesgo y la incertidumbre, modificado de (Ramírez & Alejano, 2008). 87

Lista de Tablas

Tabla 1. Sistemas de clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos, modificado de (Z. T. Bieniawski, 1989; Gavilanez & Andrade, 2004; Muñiz & González, 2009; Pantelidis, 2009). 5
Tabla 2. Artículos más citados relacionados con el estudio empírico de estabilidad de
Tabla 3. Diez palabras principales con mayor ocurrencia y relación en el tema de estudio. . 19
Tabla 4. Índices para descripción matriz rocosa, basado en el ISRM 1977..... 22
Tabla 5. Clasificación de rocas sedimentarias, basado en el ISRM 1977. 23
Tabla 6. Clasificación de rocas metamórficas e ígneas, basado en el ISRM 1977..... 24
Tabla 7. Índices de color de las rocas según ISRM 1977. 26
Tabla 8. Tamaño de la matriz rocosa, basado en el ISRM 1977. 26
Tabla 9. Meteorización de la masa rocosa, basado en el ISRM 1977. 29
Tabla 10. Factor de reducción según grado de meteorización de la roca. 30
Tabla 11. Métodos para determinar la resistencia a compresión simple, modificado del
Tabla 12. Correlación de campo para resistencia a compresión Uniaxial, (Marinos & Hoek,
Tabla 13. Requisitos geométricos de probetas ensayo PLT, (Galván, 2015)..... 38
Tabla 14. Tolerancia en fabricación de probetas para ensayo a compresión uniaxial, (UNE,
Tabla 15. Tipos principales de discontinuidades, (Gonzáles de Vallejo,Li & Ferre, M, 1999;
Tabla 16. Espaciado de discontinuidades. 51
Tabla 17. Puntuación valoración RQD (Deere & Deere, 1967). 54
Tabla 18. Abertura de juntas basado en (ISRM, 1981). 55
Tabla 19. Puntuación valoración RMR básico, (Z. T. Bieniawski, 1989). 70
Tabla 20. Puntuación para corrección según orientación de diaclasas, (Z. T. Bieniawski,
Tabla 21. Valoración y clasificación final para RMR, (Z. T. Bieniawski, 1989) 71
Tabla 22. Descripción cualitativa y cuantitativa de macizos rocosos en relación al RMR, modificado de (Ramírez & Alejano, 2008)..... 71
Tabla 23. Factor de ajuste F3 para las juntas (M. Romana, 1985)..... 74
Tabla 24. Factor de ajuste F4 para las juntas (Romana, 1985). 75

Tabla 25. Clases de estabilidad de macizos rocosos según Romana. 75
Tabla 26. Valores para SMR según tipo de rotura, (Romana Ruiz et al., 2001). 76
Tabla 27. Recomendaciones constructivas según el SMR de Romana. 76
Tabla 28. Rock Quality Designation (RQD), modificada de (Barton & Bar, 2015). 78
Tabla 29. Descripción del sistema de juntas (Jn), traducido de (Barton & Bar, 2015). 79
Tabla 30. Descripción del número de rugosidad de juntas (Jr), traducido de (Barton &
Tabla 31. Número de alteración de juntas (Ja), traducido de (Barton & Bar, 2015). 81
Tabla 32. Factor de orientación de discontinuidades (O-factor), traducido de (Barton &
Tabla 33. Número de condición geológica y ambiental (Jwice), traducido de (Barton &
Tabla 34. Factor de reducción por estres (SRFslope), traducido de (Barton & Bar, 2015)... 84
Tabla 35: Matriz de confusión 3x3 para análisis de métodos empíricos. 89
Tabla 36. Listado de publicaciones en revistas y congresos internacionales 93

Abreviaturas y Acrónimos

UPM	Universidad Politécnica de Madrid
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ISMR	International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering
UNE	Asociación Española de Normalización
ISO	International Organization for Standardization
RMR	Rock Mass Rating
SMR	Slope Mass Rating
CoSMR	Continuous Slope Mass Rating
CSMR	Chinese Slope Mass Rating
DMR	Dam Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
GSI	Geological Strength Index
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
LiDAR	Light Detection and Ranging
UCS	Uniaxial Compressive Strength
MPa	Megapascal
PLT	Point Load Test
Is	Índice de carga puntual
De	Diámetro equivalente
σc	Resistencia a compresión simple
To	Resistencia a tracción
EA	Emisión acústica

JRC	Joint Roughness Coefficient
SfM	Structure from Motion
GCP	Ground Control Points
RAW	Archivo fotográfico sin procesar
Dip	Buzamiento
Dip-Dir	Dirección de Buzamiento
DSE	Discontinuity Set Extractor
P	Rotura planar
T	Rotura Toppling
Q	Q index
WOS	Web of Science
Jn	Índice de diaclasado
Jr	Índice de rugosidad de las discontinuidades
Ja	Índice de alteración de las discontinuidades
Jw	Factor de reducción por presencia de agua
SRF	Stress Reduction Factor
FCI	Fondo Concursable Interno
EUROCK	European Rock Mechanics
GQ-slope	Graphical Q-slope
MFS	Multi-faced Slope
CIPAT	Centro de Investigación y proyectos aplicados a ciencias de la Tierra

1. Introducción

La estructura del presente trabajo doctoral se ajusta a las directrices establecidas por la Universidad Politécnica de Madrid, aprobado por Consejo de Gobierno del 30 de noviembre del 2017 para la presentación de tesis doctorales en formato compendio de publicaciones. Las directrices estipulan que la estructura de la tesis incluya un resumen en idioma patrio e inglés, el cual proporcione una visión completa del contenido de la tesis doctoral.

En este trabajo se presenta una introducción que aborda los aspectos relevantes del conocimiento incluidos los objetivos e hipótesis de partida. En metodología se expone el proceso metodológico y la evaluación de resultados, para posteriormente anexar la colección de artículos considerados para compendio de publicaciones, los cuales están indexados en los listados JCR (Journal Citation Reports).

Por último y como lo establece la normativa de la UPM para esta modalidad de tesis, se justifica la unidad temática de investigación, junto con la discusión general de investigación en la que se describe de forma integral la solución del problema, las aportaciones parciales de las publicaciones científicas a la tesis doctoral y como estas contribuyen a satisfacer los objetivos de investigación, junto con el análisis de resultados, conclusiones y futuras líneas de investigación.

1.1. Antecedentes y estado del arte

En las últimas décadas, los métodos empíricos para análisis de estabilidad de taludes rocosos han experimentado un notable progreso científico el cual ha permitido mantener su relevancia e importancia en diversos ámbitos de las geociencias debido a su simplicidad y aplicabilidad. El desarrollo y evolución de estas metodologías empíricas se remontan a la introducción del Rock Mass Rating (RMR) para taludes, pasando por el conocido Slope Mass Rating (SMR) y continuando hasta la presentación del Q-slope, considerado como el más nuevo de entre los métodos utilizados para clasificación de taludes rocosos a nivel mundial. Además de los métodos antes descritos, en los capítulos 1.1.2 y 2.1 se hace un análisis profundo sobre el desarrollo intelectual de los métodos empíricos para análisis de estabilidad de macizos y taludes rocosos, dejando clara la novedad

científica, interés e importancia de la línea de investigación fijada para el presente estudio.

En el contexto actual, se debe destacar que los métodos basados en sistemas computacionales continúan haciendo uso de los resultados obtenidos por los métodos empíricos, tanto para ajuste de modelos como validación de resultados y monitoreo, lo que sigue posicionando a los métodos dentro de la novedad científica. Los enfoques empíricos han adquirido una importancia considerable en la práctica actual en países emergentes en los cuales se transforman en métodos fundamentales a la hora de proponer solución destinadas a mitigar riesgos asociados a taludes rocosos.

1.1.1. Macizos rocosos

Se entiende como roca a la masa sólida de material formado por uno o varios minerales los cuales se presentan como un agregado sólido y bien diferenciado que ocupan considerables extensiones de la corteza terrestre, independientes y cartografiables (Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007; Tarbuck, E.J. y Lutgens, 2005). En la roca los agregados mono o poliminerales pueden presentarse cementados, consolidados, aglomerados o de cualquier otra forma que permita la existencia de un material geológico con cierta resistencia (Ramírez & Alejano, 2008).

Al analizar los conceptos anteriormente expuestos se puede decir que todo tipo de formación está representada de forma natural por lo que conocemos como macizo rocoso el cual puede estar conformado por uno o más tipos diferentes de rocas. El macizo rocoso está estructurado de dos partes fundamentales: la roca intacta o matriz y la estructura misma del macizo, el cual contiene planos de debilidad que pueden ser de diferentes tipos tales como: estratificaciones, pliegues, juntas, fallas y otras alineaciones de carácter estructural (Elberg, 2011; Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007; Foucault,A, 1985; M. Galvan Ceballos, 2015). De forma resumida, el macizo rocoso puede definirse como una estructura discontinua con propiedades estructurales anisótropas y/o heterogéneas (Ramírez & Alejano, 2008).

Para comprender el concepto de macizo rocoso se presenta un ejemplo esquemático de un macizo rocoso en el que se puede apreciar la roca propiamente dicha o roca intacta y la estructura del macizo rocoso conformado por los planos de debilidad o discontinuidades propias de su estado estructural (Figura 1).

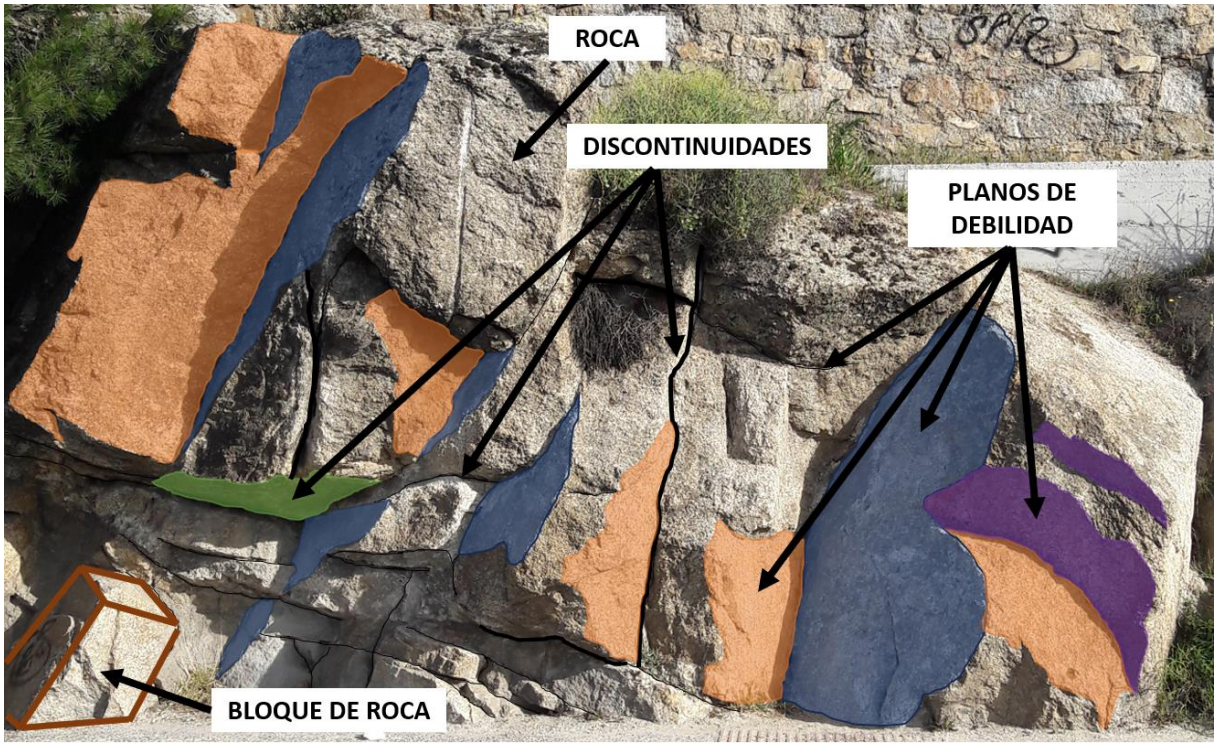


Figura 1: Representación esquemática de macizo rocoso

Al observar la figura se puede distinguir la roca o matriz rocosa, que es la parte sólida que no presenta planos de rotura apreciables y diferentes planos de debilidad que forman lo que se conoce como discontinuidades, las cuales se desplazan por la roca como alineaciones estructurales bien definidas que dividen la matriz rocosa en dos partes bien diferenciadas. La intersección de estas alineaciones forman bloques de roca de diferentes tamaños los cuales en un estado desfavorable pueden deslizarse sobre planos existentes (discontinuidades basales o la unión de estas) hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio. En la parte inferior izquierda de la figura se resalta la proyección gráfica de un bloque de roca formado por diferentes diaclasas que intersectan en el macizo rocoso.

Considerando lo expuesto se define que un macizo rocoso es un cuerpo heterogéneo, anisotrópico, discontinuo y no elástico, el cual está formado por un conjunto de piezas o elementos separados que se forman por la interacción de las juntas existentes en el macizo rocoso, las mismas que cortan la roca hasta formar cuerpos tridimensionales susceptibles de deslizamiento dependiendo de la

interacción entre el frente expuesto del macizo rocoso y los planos de debilidad (Jorda, 2008).

1.1.2. **Historia de las clasificaciones geomecánicas para macizos rocosos**

Para estudiar los macizos rocosos se han desarrollado diferentes tipos de metodologías desde las más simples como el análisis gráfico de estructuras (Da Gama, 1983), hasta las más desarrolladas como son los métodos numéricos, elementos discretos, diferencias y elementos finitos (Camones et al., 2013; L. C. Li et al., 2009; Lin et al., 1996; Vyazmensky et al., 2010). El presente estudio se centra exclusivamente a los métodos empíricos de clasificaciones geomecánicas por considerar que tienen gran importancia no solo en el ámbito de la ingeniería y la investigación, sino porque siguen siendo usados en el ámbito del pre diseño, construcción, validación de modelos complejos de ingeniería y aplicaciones de inteligencia artificial para análisis de estabilidad de taludes (Mao et al., 2023). Otro aporte importante y que refuerza la importancia del estudio de los métodos empíricos es su fácil difusión y aceptación (M. Romana et al., 2015; Siddique, 2024) no solo por estudiantes de ingeniería sino por especialistas e investigadores de las geociencias.

El inicio de los métodos geomecánicos se remontan al año de 1879, cuando Ritter propuso las bases del análisis de fuerzas y tensiones que actúan sobre las estructuras rocosas presentes en túneles e intentó formalizar una aproximación empírica para diseño de obras subterráneas. Si bien esta obra no se enfocó específicamente en análisis geomecánico los principios aplicados a la estabilidad de macizos rocosos pueden aplicarse de manera complementaria al estudio geomecánico en la ingeniería de túneles (Hoek, 2007; Jordá-Bordehore, 2017; Ritter, 1879). Desde estos primeros pasos hasta la actualidad la caracterización de macizos rocosos ha tomado un auge significativo al momento de realizar análisis preliminares de estabilidad. A continuación, se reseña de forma ordenada y resumida los métodos empíricos más relevantes resaltando el nombre del método, autor, año de publicación, actualización, modificaciones o variantes planteadas por otros autores en la búsqueda de aportar nuevos conocimientos al tema de investigación (Tabla 1).

Tabla 1. Sistemas de clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos, modificado de (Z. T. Bieniawski, 1989; Gavilanez & Andrade, 2004; Muñiz & González, 2009; Pantelidis, 2009).

Método	Autor	Fecha
* Die Statik Der Tunnelgewölbe	Ritter	1879
Rock Load	Terzagui	1946
Stand-up-time	Lauffer	1958
New Austrian tunneling method	Tunnelling specialists	1964
Rock Quality Designation	Deere	1967
Rock Structure Rating	Wickham	1972
Rock Mass Rating	Bieniawski	1973
	Weaver	1975
	Laubscher	1977
	Olivier	1979
	Selby et. Al.	1980
	Ghose y Raju	1981
	Moreno Tallon	1982
	Kendorski	1983
	Nakao	1983
	Serafim y Pereira	1983
	González de Vallejo	1983
	Unal	1983
	Romana	1985 (SMR) – 2004 (DMR)
	Newman	1985
	Sandbak	1985

	Venkateswarlu	1986
	Robertson	1988
	Chen	1995
	Hoek et al.	1995 – 1998 – 2000 – 2001
	Palmström	1995
	Ünal	1996
Q	Barton	1974
		2015 (Q-slope)
	Kirsten	1982
	Kirsten	1983
Strength-size	Franklin	1975
Rockslope Deterioration Assessment	Nicholson et al.	1997
Basic geotechnical description	ISMR	1981
Unified classification	Williamson	1984
Slope stability probability classification	Hack et al.	2002
Volcanic rock face safety rating	Singh & Connolly	2003
Falling rock Hazard index	Singh	2004

*El autor no propone un nombre específico a su metodología motivo por el cual se coloca el nombre de la publicación con que se introduce al método.

Se puede observar que los métodos de análisis geomecánicos fueron creados principalmente para el análisis de estructuras subterráneas y, a medida que estos maduraron, se fueron especializando, modificando y diversificando. En este proceso de mejoramiento y especialización nacieron los métodos de análisis geomecánico para estabilidad de taludes rocosos los cuales han sido muy apreciados por los usuarios debido a la facilidad de su aplicación en obra. Aunque en el presente trabajo no se analiza en detalle todas las clasificaciones geomecánicas y sus singularidades; si se resaltan los métodos clásicos más empleados en mecánica de rocas, dentro de los cuales tenemos el (RMR) Rock

Mass Rating (Z. T. Bieniawski, 1974, 1989, 1973), índice Q (Barton et al., 1974), el (GSI) Geological Strength Index (Hoek E et al., 1995; Hoek et al., 1998), el (RQD) Rock Quality Designation (Deere, 1963; Deere & Deere, 1988), (RMi) Rock Mass Index (Palmström A, 1995) y para taludes el conocido Slope Mass Rating (SMR) (M. Romana, 1985), Q-slope (Barton & Bar, 2015), el CoSMR (Jover et al., 2006), el Chinese Slope Rating (CSMR) (Chen, 1995), o el (SFMR) Fuzzy Slope Mass Rating (Daftaribesheli et al., 2011), entre otros.

La bibliografía existente indica que los métodos de clasificación geomecánica de taludes rocosos están ligados directamente al empirismo. Estos métodos definen una serie de parámetros que permiten calcular la estabilidad del macizo rocoso al analizar características sobre el estado de las discontinuidades, la matriz rocosa, la dirección del corte y los factores ambientales influyentes.

En el presente siglo el diseño de taludes rocosos presenta retos importantes ya que las maquinarias usadas, así como los proyectos de ingeniería, tanto de índole civil como minera, están ligados al impacto económico y social que este tipo de proyectos tienen. Estas singularidades han ocasionado que en la actualidad se deban optimizar los diseños conservando siempre la relación costo beneficio y seguridad que estas estructuras requieren. Las grandes excavaciones que el ser humano puede construir hacen que las estructuras creadas presenten una serie de características estructurales y geológicas que los métodos empíricos y modelos computacionales deben considerar al momento del ingreso de parámetros de diseño y entrega de resultados (Hoek et al., 2018).

1.1.3. Levantamiento de información en campo

Al igual que con el concepto de roca y macizo rocoso, para entender cómo se realiza el levantamiento de información en campo se debe comprender el concepto de talud y como este puede ser segmentado en zonas y sectores para levantamiento de información geomecánica.

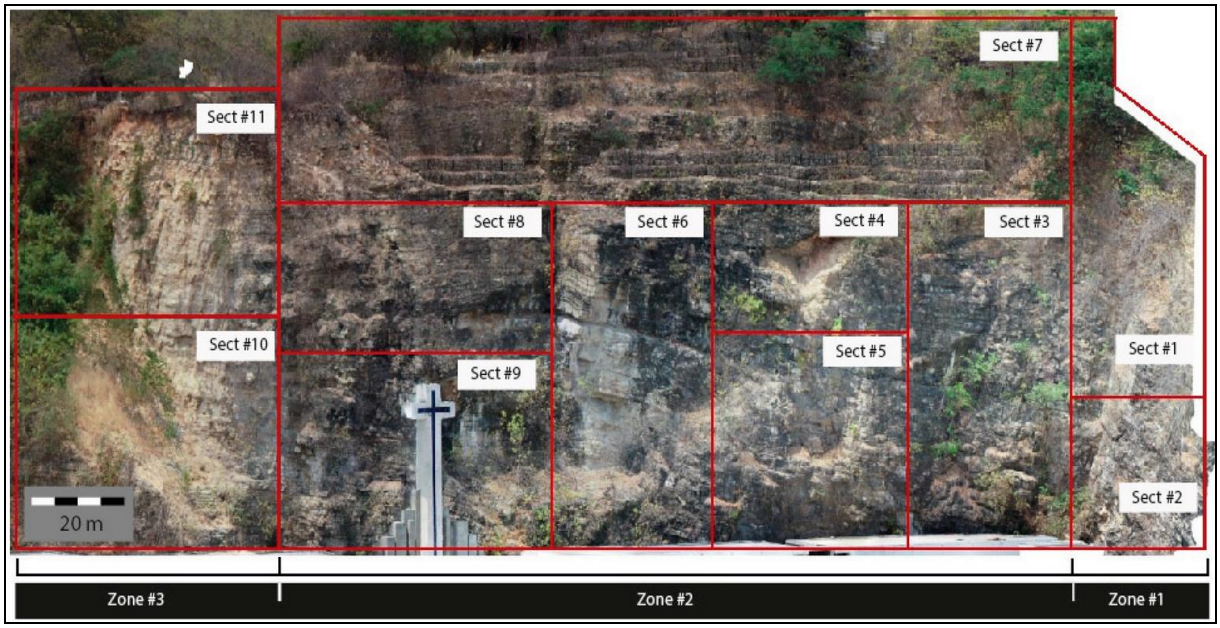
1.1.3.1. El talud y sus características

Puede definirse un talud como la superficie inclinada formada naturalmente o de forma artificial en la superficie terrestre, esta puede estar conformada por suelo, roca o una combinación de las dos según la o las formaciones geológicas locales

predominantes. Estos taludes al asociarse con movimientos masivos pueden convertirse en peligros geológicos y ambientales en el entorno de emplazamiento (Penning-Rowsell, 1993; Varnes, DJ; Cruden, DM, 2024)

1.1.3.2. Caracterización geomecánica

Entender el comportamiento geomecánico de los taludes es de vital importancia para evaluar su estabilidad (Villamor Lora et al., 2016). Para comprender las variables (tipologías constructivas, litologías, familias de discontinuidades, alteraciones, alineaciones del frente expuesto, etc.) que producen movimiento en masa, primero se identifican lugares con características similares que pueden tener comportamientos estructurales diferentes (Morante et al., 2019). Al identificar estos lugares, el talud puede ser dividido en zonas y sectores sobre los cuales se emplazan estaciones geomecánicas dependiendo de las facilidades para el trabajo de campo o su posterior procesamiento en gabinete sobre sectores de difícil acceso para levantamiento de información geomecánica (Blanco, 2015; Carrión-Mero et al., 2021). En la figura 2 se observa un talud en el que se delimitaron 3 zonas y 11 sectores para levantamiento geomecánico.



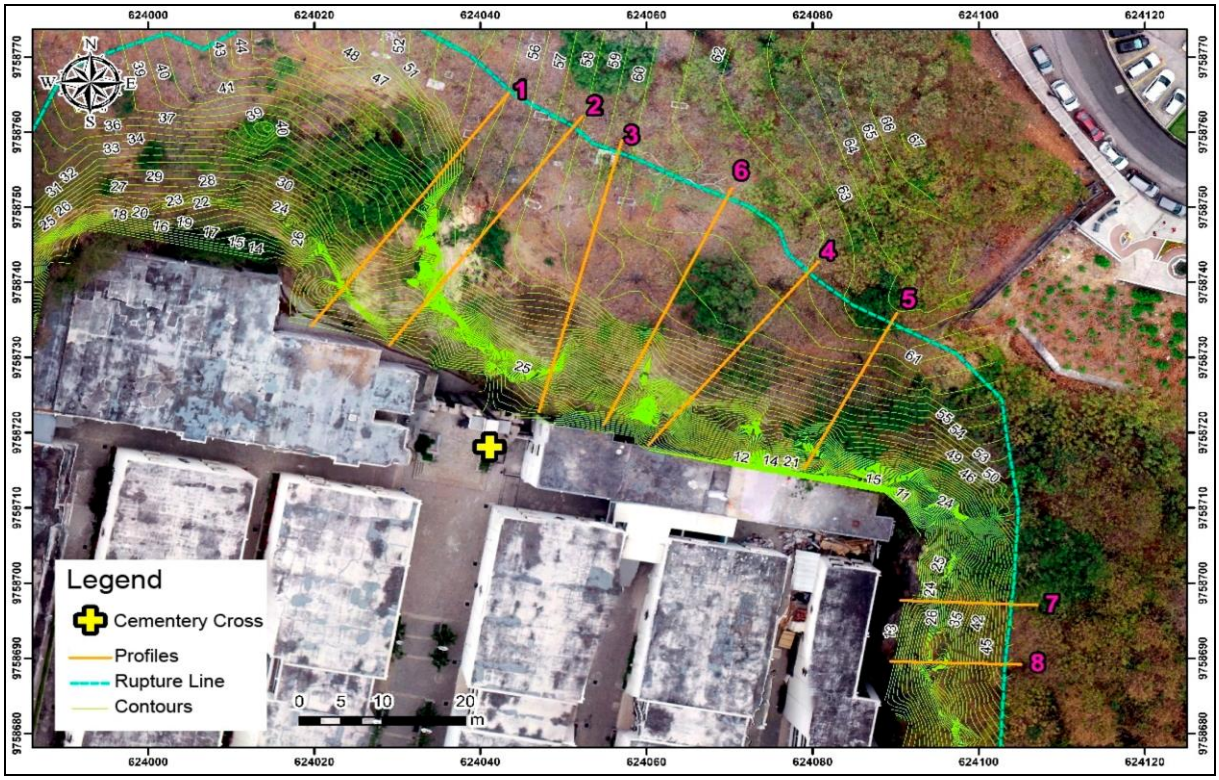


Figura 2: Talud dividido en zonas y sectores para levantamiento de campo.

1.1.3.3. Estaciones geomecánicas

Se denomina "estación geomecánica" a la zona sobre la cual se puede realizar un levantamiento ordenado de datos o valores observados (presencia de agua, orientación de juntas, litología, etc.) y que guarda cierta relación con su entorno geológico y estructural con una continuidad aproximada entre 5 y 10 metros (Jorda et al., 2016). En este sentido, se ubicarán tantas estaciones geomecánicas como zonas, sectores o variables geológicas y estructurales se presenten en el talud o macizo rocoso, las cuales deberán ser identificadas claramente por el investigador antes del inicio del levantamiento de información geomecánica (Figuras 2 y 3).

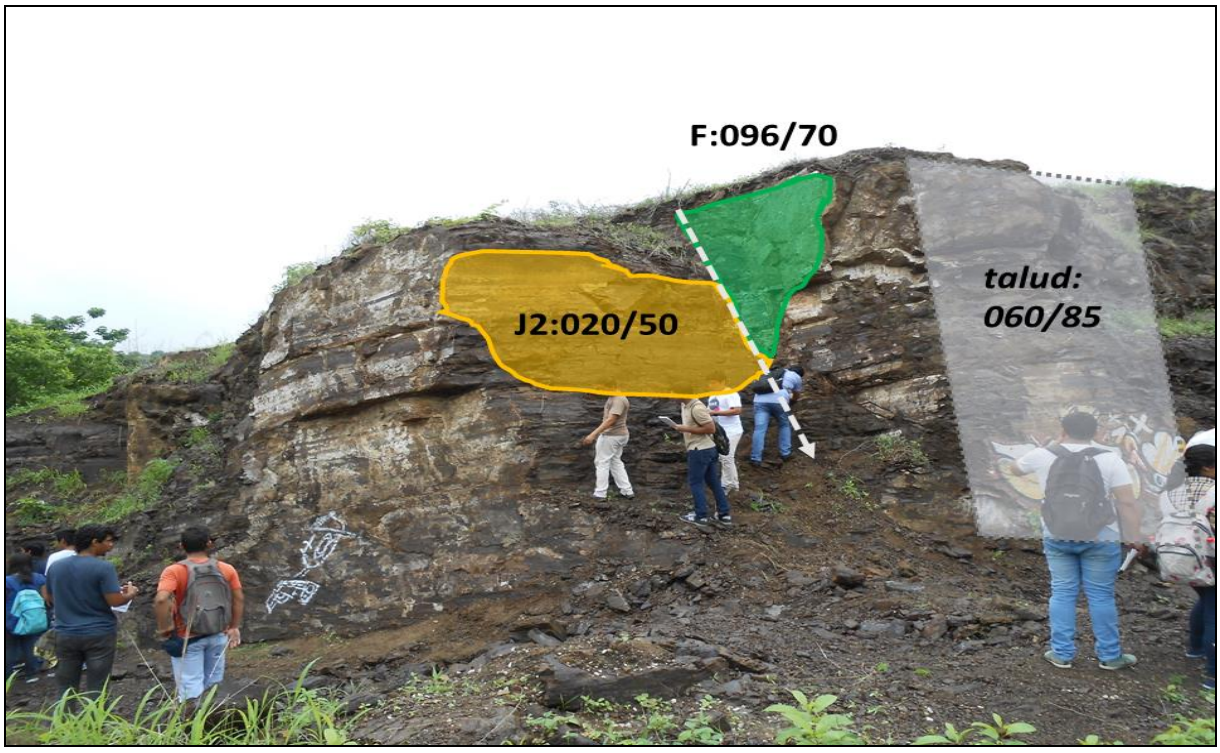


Figura 3: Talud de estudio y ejecución de estación geomecánica.

En la figura 3 se observa un talud en el que se identificaron planos de discontinuidades, planos de estratificaciónes y una falla, todo en un solo tipo de formación rocosa y con una única inclinación de la cara expuesta del corte. En estas condiciones se definió la necesidad de ejecutar una única estación geomecánica para levantamiento de información de campo (foto cortesía Dr. Luis Jordá, curso de análisis geomecánico Facultad de Ciencias Naturales, Guayaquil, Ecuador).

1.1.3.4. Instrumental y seguridad en campo

El instrumental básico utilizado para levantamiento geomecánico consiste en los recursos mínimos que un geólogo lleva consigo en una investigación de campo (Echeveste, 2018). La literatura especializada establece que el instrumental de campo sigue siendo el propuesto por Hoek en 1999 (Stow, 2005). En la actualidad, se puede considerar la incorporación de nuevos equipos de última tecnología considerados como ayuda o soporte para el levantamiento de campo en zonas de difícil acceso (Benrabah et al., 2024; Fang et al., 2024; Riquelme et al., 2021). El instrumental clásico y básico incluye:

Equipo clásico

- Martillo de geólogo
- Brújula para toma de datos estructurales de planos geológicos
- Lupa (mínimo 10 aumentos)
- Perfilómetro o peine de Barton
- Flexómetro de 5 a 10 m o regla rígida de al menos 1 m
- Estadillos normalizados y libretas de campo

Equipos tecnológicos

- Esclerómetro o martillo de Schmidt
- Dron, RPAS o UAV para levantamiento fotográfico
- Escáner laser o LiDAR
- Cámara de fotos o teléfono inteligente
- Aplicaciones diversas para levantamiento de campo
- GPS (Global Positioning Sistem)
- Portátiles o Tablets

La investigación geológica y geomecánica de taludes puede ser ejecutada en cualquiera de las etapas del desarrollo de un evento de inestabilidad, es decir, antes, al inicio o durante la aplicación de métodos constructivos en obra (Bakhtybayev & Akymbek, 2023; Bozdağ, 2022; Y. Wang et al., 2023). Esta singularidad en la cronología sobre la recopilación de información geomecánica ocasiona que los técnicos e investigadores de este tipo de fenómenos se encuentren constantemente frente a zonas de riesgo (Shabarov & Tsirel, 2018). En este contexto, el usuario debe procurar su seguridad, así como la del personal a su cargo.

Hay que recordar que este tipo de levantamiento puede ser ejecutado en solitario, sin embargo, se aconseja la compañía de un colaborador que brinde soporte y asistencia durante el desarrollo normal de los trabajos. Además, es importante acometer el estudio en equipo en caso de una situación fortuita que requiera atención de personal especializado en primeros auxilios o rescate. Como mínimo, se recomienda notificar fecha y hora de la salida de campo a la persona más cercana, así como los detalles específicos de su ubicación, recorrido y tiempo estimado de trabajo (Jordá Luís et al., 2015). Para el trabajo en campo en zonas

con problemas de seguridad y salud ocupacional para el técnico o investigador, se recomienda el uso del siguiente equipo de protección personal.

Equipo clásico

- Protección contra el sol
- Protección contra el frío
- Protección contra la lluvia
- Protección contra flora y fauna adversa
- Chaleco reflectante
- Gafas de seguridad
- Guantes para trabajo
- Casco de seguridad
- Silbato de emergencia
- Botas de seguridad
- Botiquín de primeros auxilios.
- Plan de actuación y números de emergencia
- Sistemas de comunicación
- Ropa resistencia al trabajo
- Bengalas e implementos para hacer fuego (según destino)
- Bebidas y alimentos energéticos en cantidad superior a la requerida (2 días extra)
- Pastillas potabilizadoras de agua

Queda a criterio del usuario el uso específico de los equipos recomendados, así como el número y las características técnicas de los implementos, los cuales deberán tener concordancia con la realidad propia de la zona de estudio. También es recomendable considerar, antes del inicio de actividades, la accesibilidad a centros poblados e instituciones de primeros auxilios o atención médica y de seguridad.

1.2. Objetivo general

Esta investigación tiene como objetivo realizar una exhaustiva evaluación y comparación de los métodos empíricos empleados para el análisis de estabilidad de taludes rocosos. El análisis considera diversos factores geológicos y ambientales contrastantes, dejando en evidencia posibles debilidades inherentes a la aplicación de metodologías empíricas de reciente publicación y proponer, como resultado, mejoras que permitan perfeccionar los métodos más prometedores para la divulgación técnica y científica a nivel internacional.

1.3. Hipótesis de partida

La integración de revisión bibliográfica, análisis bibliométrico y estudios de casos en ambientes contrastantes relacionados con el análisis de estabilidad de taludes rocosos por métodos empíricos permitirá una comprensión holística del área de investigación, identificando tendencias y vacíos que permitan proponer mejoras metodológicas y futuras líneas de investigación.

2. Metodología

Desde la antigüedad en la época de los griegos y egipcios los seres humanos se vieron en la necesidad de trabajar con formaciones rocosas como fuente de material para construcción (Calderon Carrillo, 2014). Las espléndidas estructuras que, en la actualidad se mantienen en pie, dan la idea del grado de conocimiento que se tenía sobre el manejo de la roca como elemento constructivo y la identificación de la matriz rocosa y sus discontinuidades (las cuales eran un problema). Considerando esta premisa se puede decir que la geomecánica posiblemente sea una de las ramas tecnológicas más antiguas de nuestro mundo. Sin embargo, y pese a su considerable antigüedad no es sino hasta finales de los años cincuenta y específicamente para el año de 1966 cuando en Portugal se realiza, el primer Congreso de Mecánica de Rocas (Cartaya-Pire, 2006), concluyendo que esta rama de la ingeniería es relativamente joven en el mundo de la investigación y divulgación de resultados.

En este apartado se describe la metodología general aplicada en el presente trabajo (Figura 4), que está estructurada en tres fases que abordan las siguientes premisas:

i) Definir los métodos de análisis más actuales, representativos y menos estudiados en geomecánica de taludes rocosos (fase 1: diseño de estudio).

ii) Estudiar taludes rocosos en diferentes ambientes geológicos y climáticos para evaluar la aplicabilidad de los métodos en ambientes contrastantes (fase 2: caracterización de campo).

iii) Proponer mejoras al método seleccionado, profundizar el conocimiento de los subprocesos que son la base del método y proponer nuevas líneas de investigación (fase 3: interpretación de resultados y propuesta metodológica).

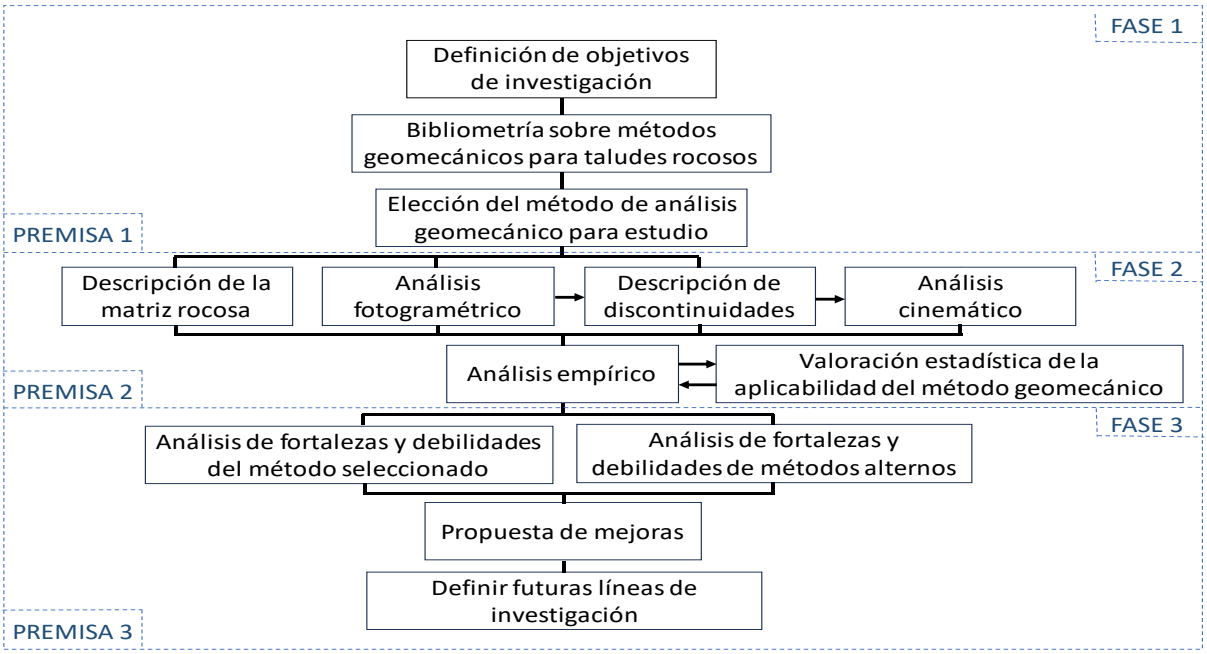


Figura 4. Diagrama del proceso metodológico.

Siguiendo el esquema establecido, una vez definido el objetivo de investigación, el siguiente paso es realizar un análisis bibliográfico y un estudio bibliométrico general sobre los métodos utilizados para analizar la estabilidad de taludes rocosos. Con los resultados obtenidos de estos procesos, se puede obtener información relevante para alcanzar los objetivos planteados y, al mismo tiempo, mostrar la evolución de la línea de investigación seleccionada (Herrera-Franco et al., 2020). Es importante tener en cuenta que, al ser la investigación un proceso dinámico, se deben realizar múltiples iteraciones del análisis bibliográfico y bibliométrico en diferentes etapas del estudio. En este trabajo, se realizó un análisis inicial para comprender el estado actual del tema investigado y seleccionar las metodologías de estudio. Posteriormente, se realizaron varias iteraciones intermedias para monitorear la evolución de los temas elegidos y ajustar los objetivos de estudio, culminando con una iteración final que permite presentar el resumen más reciente y completo sobre el estado actual y conceptual del tema investigado.

2.1. Bibliometría sobre métodos empíricos de taludes rocosos

En la actualidad, la bibliometría es considerada como una poderosa herramienta de investigación de literatura meta-analítica (Donthu, Kumar, & Pandey, 2021; Donthu, Kumar, Pandey, et al., 2021; Morante-Carballo et al., 2022). En este tipo

de estudios, dependiendo del objetivo planteado, se pueden utilizar criterios como autoría, citas, palabras clave, tipos de documentos, revistas, idiomas, años de publicación y en ocasiones afiliaciones para obtener información relevante de la línea de investigación (Carrión-Mero et al., 2020; Van Eck & Waltman, 2009; Zupic & Čater, 2015). En este contexto, estos criterios ayudan a entender las tendencias, evolución y estructura de las bases de datos analizada referentes a una línea de investigación específica (Gimenez et al., 2018; J. Kim & McMillan, 2008).

En esta investigación, se hizo un análisis bibliográfico junto con un estudio bibliométrico general, lo cual permitió abordar de manera integral la revisión de literatura disponible. El análisis de la producción científica y la coocurrencia de palabras clave contextualizan el tema de investigación mediante el procesamiento de metadatos y análisis de mapas bibliométricos. Estos elementos ayudan a enfocar los objetivos planteados y obtener nuevas perspectivas para investigar el tema elegido, enmarcándolo dentro de un campo específico de investigación (Morante-Carballo et al., 2021).

Para obtener los resultados buscados en el estudio bibliométrico, se pueden utilizar diferentes programas informáticos, entre los cuales se encuentra VOSviewer, que crea redes bibliométricas que facilitan el análisis intelectual del tema de investigación (Moral-Muñoz et al., 2020; van Eck & Waltman, 2007; Van Eck & Waltman, 2009; van Eck & Waltman, 2010, 2017). Habitualmente, este tipo de investigación se estructura en tres fases elementales: i) obtención de la base datos científica, ii) selección del software junto con el procesamiento de información, y iii) interpretación de resultados (Morante-Carballo et al., 2022; Pico-Saltos et al., 2021).

En esta investigación se utilizó la base de datos SCOPUS, considerando que esta presenta la mayor cantidad de artículos científicos indexados (Baas et al., 2020). La fórmula de búsqueda empleada, a finales de 2023, para generar la base de datos inicial fue: (TITLE-ABS-KEY (empirical AND methods) AND TITLE-ABS-KEY (slope) AND TITLE-ABS-KEY (rock AND mass)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cr") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j") OR LIMIT-TO (SRCTYPE , "p")). Como resultado de la

búsqueda, se obtuvieron 160 artículos indexados relacionados con métodos empíricos para análisis de estabilidad de taludes rocosos. Posteriormente, se analizaron uno a uno los resúmenes de las publicaciones científicas y se aplicó un primer filtrado en SCOPUS, eliminando criterios que no tenían relación con el tema de análisis. En este contexto, se excluyeron del criterio de búsqueda palabras clave como: land, clay, isotope, FEMDEM, LANDSLIDE, caverns, etc. Al final de este proceso, se obtuvieron 137 publicaciones indexadas. A continuación, se realiza un nuevo filtrado de la base de datos obtenida de SCOPUS para detectar posibles fallas ocultas producidas al descargar y migrar el conjunto de datos a Excel, logrando con este procedimiento una base de datos depurada de 134 registros de investigaciones indexadas para el procesamiento final con el programa VOSviewer. Los metadatos finales permitieron el análisis referente a rendimiento de producción científica y análisis de mapas bibliométricos basados en coocurrencia de palabras clave y fechas de publicación, estableciendo los principales representantes de la línea de estudio y las metodologías más actuales publicadas en revistas de alto impacto.

2.1.1. Análisis de rendimiento

2.1.1.1. Rendimiento de producción científica

La línea de investigación inicia su presencia en bases de datos indexadas en 1984, año en el que se publica el artículo científico denominado "Method of Empirical Assessment of Slope Stability in Solid Rock Masses. [empirijska ocena stabilnosti kosina u cvrstim stenskim masama.](Obradovic et al., 1984). Al analizar todos los años en los que se publicaron artículos en revistas indexadas, se observa que el tema de estudio es relativamente joven y en desarrollo, representado por la curva de tendencia ascendente de fórmula $y=0.8831e^{0,1004x}$ la cual tiene asociada un $R^2= 0,7787$, (Figura 5). El comportamiento ascendente de la curva indica un interés creciente en el campo de estudio, sugiriendo que en el futuro cercano se podrían desarrollar nuevos estudios y publicaciones que contribuyan al acervo científico del área de investigación. Con una extrapolación de la curva, se esperaría que las publicaciones en todo el mundo aumenten y que en un posible futuro cercano se logre la madurez del tema abordado en el presente estudio.

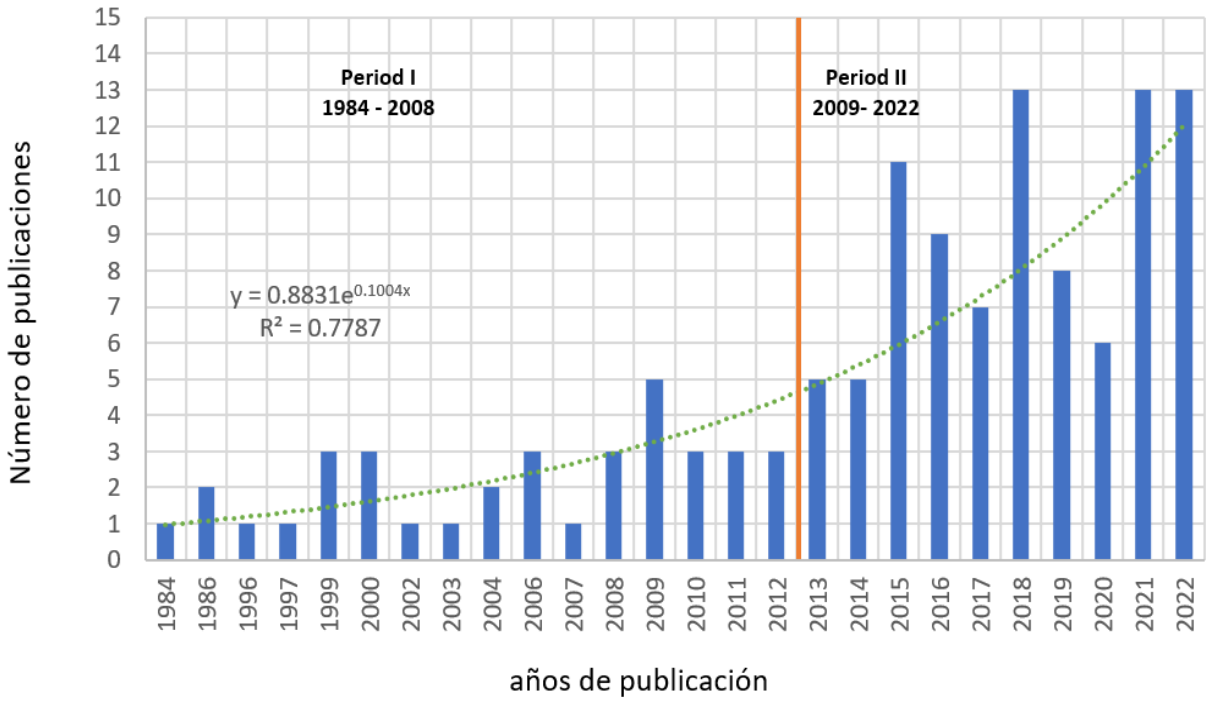


Figura 5. Evolución de la investigación empírica en taludes rocosos (1984-2022).

Analizando en detalle la figura 5 se puede observar que las publicaciones en esta línea de investigación tienen un desarrollo incipiente y relativamente constante hasta 2013. A partir de ese año, se tiene un crecimiento exponencial y casi sostenido hasta el final del período investigado en 2022. En este contexto, el año 2013 marcaría el final y el inicio de dos períodos de producción científica sobre análisis geomecánico de estabilidad de taludes rocosos.

El análisis de citas revela la importancia e influencia que tiene un artículo científico, el cual puede clasificarse según el número de citas que recibe de otros documentos académicos (Culnan et al., 1990). A continuación, se presentan los diez artículos más citados en la base de datos SCOPUS, recuperada y depurada para análisis bibliométrico, relacionados al tema de investigación (Tabla 2).

Tabla 2. Artículos más citados relacionados con el estudio empírico de estabilidad de taludes rocosos.

Rank	Autores	Título del artículo	Citas
1	(Sönmez & Ulusay, 2002)	A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies; [Hoek-Brown yenilme ölçütü üzerine bir tartişma ve şev durayliliği vakalari ile sinanmiş ölçüte ilişkin değişiklik önerileri]	148
2	(Locat et al., 2006)	Fragmentation energy in rock avalanches	107
3	(Bar & Barton, 2017)	**The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering**	98
4	(Alemdag et al., 2016)	Modeling deformation modulus of a stratified sedimentary rock mass using neural network, fuzzy inference and genetic programming	85
5	(Lambert & Coll, 2014)	Discrete modeling of rock joints with a smooth-joint contact model	82
6	(Pine et al., 2006)	The development of a new numerical modelling approach for Naturally fractured rock masses	81
7	(Napoli et al., 2018)	A stochastic approach to slope stability analysis in bimrocks	81
8	(Basahel & Mitri, 2017)	Application of rock mass classification systems to rock slope stability assessment: A case study	78
9	(Khandelwal et al., 2017)	Classification and regression tree technique in estimating peak particle velocity caused by blasting	64
10	(Manzella & Labiouse, 2013)	Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation	63

2.1.1.2. Mapa bibliométrico basado en coocurrencia de palabras clave

Al analizar la coocurrencia de palabras clave de autor, se puede reconstruir las conexiones existentes en el tema de estudio, lo que permite establecer dominios basados en las palabras clave propuestas por los investigadores, permitiendo determinar la evolución conceptual del tema de investigación (Carrión-Mero et al., 2020; Herrera-Franco et al., 2020, 2023). El análisis se realizó mediante el uso del software VOSviewer, el cual puede entregar visualizaciones multidimensionales de los datos de estudios, permitiendo una interpretación detallada de las sublíneas de investigación trabajadas durante el período de análisis (Herrera-Franco et al., 2021; Zupic & Čater, 2015). Se presentan las 10 palabras más relevantes junto con su valor de ocurrencia (Occurrences) y fuerza total de enlace (Total link strength) (Tabla 3).

Tabla 3. Diez palabras principales con mayor ocurrencia y relación en el tema de estudio.

ID #	Keyword	Occurrences	Total link strength
1	slope stability	18	27
2	rock mass classification	11	20
3	**SMR**	10	18
4	**GSI**	9	21
5	factor of safety	8	8
6	hoek-brown criterion	7	11
7	**Q-slope**	7	15
8	**RMR**	7	19
9	rock mass	6	10
10	jointed rock	5	8

Para el presente análisis, se obtuvo un total de 375 palabras clave, de las cuales se consideraron aquellas que estuvieron presentes en las publicaciones científicas con una ocurrencia de al menos 3 veces. Las palabras clave se agruparon en cinco clusters (Figura 6), los cuales presentan 85 enlaces y una fuerza de enlace total de 121.

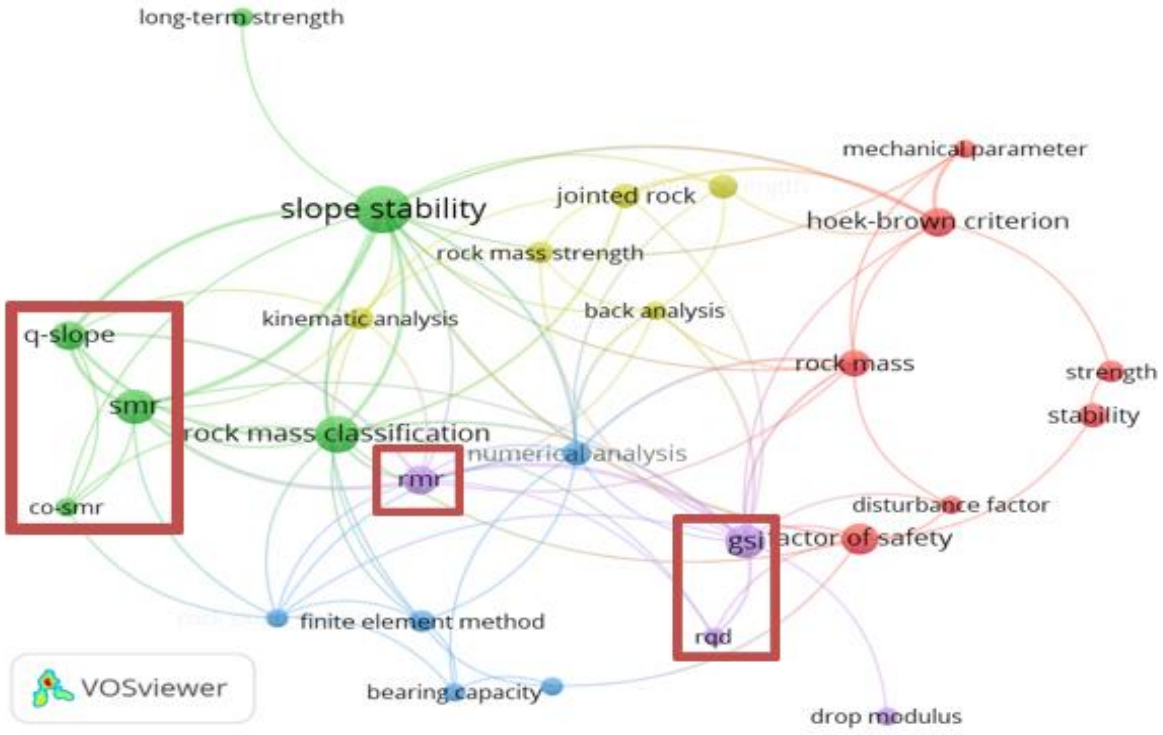


Figura 6. Red de coocurrencia de palabras clave por autor

En la figura superior se observan círculos de diferentes colores denominados nodos, los cuales representan diversos tópicos que se agrupan en clusters de igual color. Estos clusters, a su vez, representan el modo de agrupamiento de palabras clave que esquematizan los principales temas o líneas de investigación (Perea-Moreno et al., 2019; Velastegui-Montoya et al., 2022). Los enlaces (líneas que unen los nodos) y el grosor de los mismos representan la relación entre las palabras, es decir, mientras más gruesa es la línea, mayor es su relación (Morante-Carballo et al., 2021). En el gráfico de coocurrencia se representan cinco cluster, los cuales son nombrados según sus temáticas: cluster 1, color rojo, criterios y parámetros geomecánicos para el cálculo de factores de seguridad: cluster 2, color verde, métodos empíricos para clasificación de taludes rocosos; cluster 3, color azul, análisis numérico y de elementos finitos para estabilidad de taludes; cluster 4, color amarillo, análisis computacional de las propiedades de resistencia del macizos rocosos; y cluster 5, color violeta, métodos geomecánicos para evaluación de macizos rocosos.

Se ha considerado importante extraer los nodos más representativos analizados y establecer su importancia según los parámetros "occurrences y total link strength"; esto permite tener una idea clara de los temas más relevantes a ser analizados.

Al mismo tiempo, el programa VOSviewer permite crear un mapa que asocia las fechas de publicación de artículos científicos (Figura 7). Al analizar este mapa bibliométrico por fechas, es fácil apreciar tanto los temas más actuales como los más clásicos, pero no menos relevantes, del área de investigación.

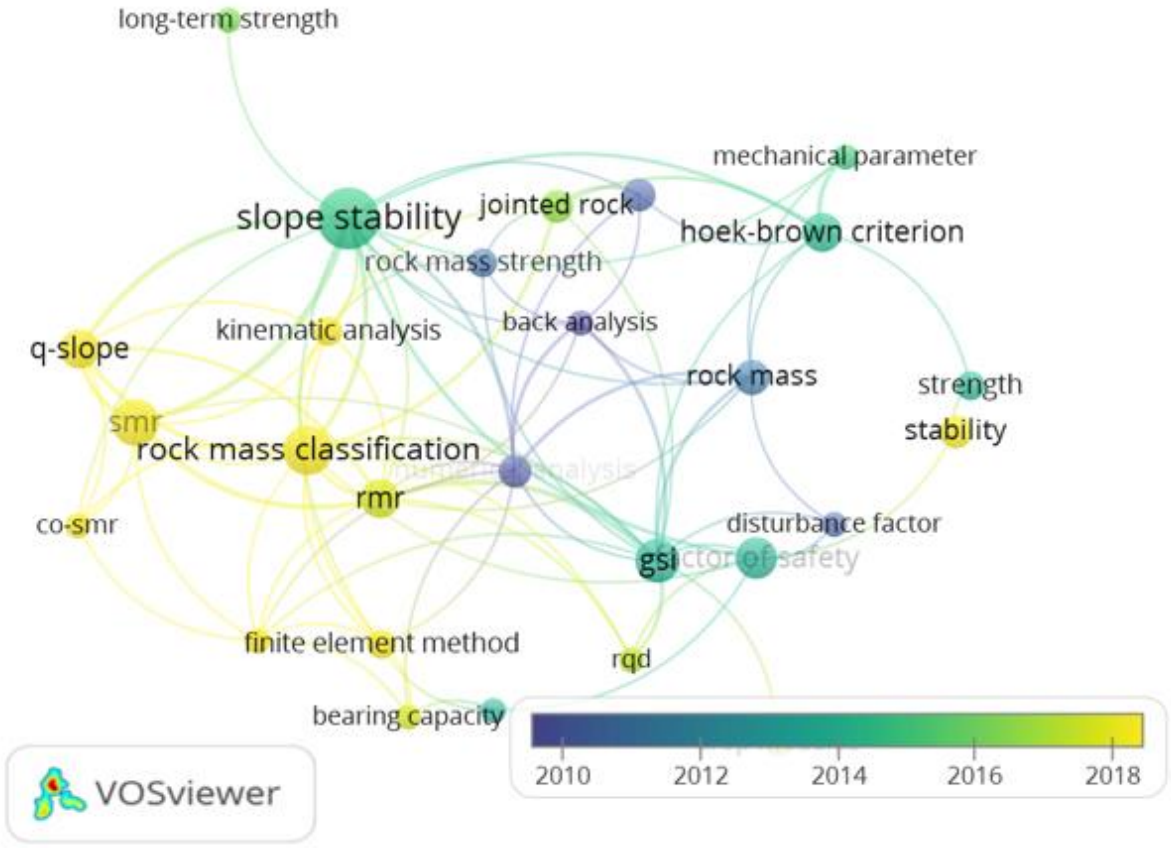


Figura 7. Red de coocurrencia de palabras clave por autor y año de publicación.

Al analizar la figura 7, se define que los temas de mayor actualidad son el estudio de métodos empíricos para clasificar taludes rocosos, junto con el análisis cinemático y el cálculo de elementos finitos para modelar macizos rocosos.

En conjunto, los gráficos y tablas presentados en este apartado permiten concluir que la línea de investigación está en etapa de desarrollo y tiene buenas perspectivas para continuar en el futuro como un tema interesante de investigación. También se puede concluir que los temas de mayor relevancia y actualidad sobre métodos empíricos de análisis geomecánico para estabilidad de taludes son el Q-slope y el SMR, los cuales tienen un fuerte lazo con la estabilidad de taludes rocosos. Además, es fácil apreciar que el RMR continúa posicionado como tema relevante para investigación y que sirve de nexo con otros métodos empíricos como el RQD y GSI, los cuales en la actualidad tienen mayor relación con caracterización de macizos rocosos. Si bien el RQD y el GSI no son métodos directos para análisis de estabilidad de taludes, se los analiza en el

presente estudio por los nexos que presentan con el RMR, sacando así el mayor provecho de todos los métodos empíricos resaltados en el estudio bibliométrico. Con este análisis se definen las metodologías a ser analizadas en busca de cumplir con el objetivo principal planteado en la presente investigación.

2.2. Propiedades geomecánicas de la matriz rocosa

Las rocas, al ser formadas en diferentes ambientes, presentan distintas propiedades que deben ser analizadas y comprendidas en el afán de entender el comportamiento de los macizos rocosos. Entre las propiedades más comunes y fundamentales están la porosidad, humedad, grado de saturación, permeabilidad, densidad, entre otras. (Ramírez & Alejano, 2008; Schön, 2015).

El (ISRM, 1977), propone que, para describir una roca de manera adecuada, se deben considerar una serie de parámetros, los cuales dependiendo del tipo de ensayo pueden o no requerir de exámenes complejos, con la consecuente preparación detallada de muestras en laboratorio. Los índices más representativos a más de los básicos mencionados (Tabla 4).

Tabla 4. Índices para descripción matriz rocosa, basado en el ISRM 1977.

Índices descriptivos (ensayos organolépticos)	Tipo de roca Color Tamaño del grano Textura y fábrica Meteorización Alteración Resistencia
Índices semicuantitativos (ensayos de clasificación los cuales requieren ser ejecutados con o sin una escasa preparación de la muestra)	Dureza Durabilidad Resistencia Porosidad Densidad Velocidad sónica
Índices cuantitativos (ensayos complejos los cuales requieren una amplia preparación de la muestra)	Módulo de elasticidad Coeficiente de Poisson Permeabilidad primaria

A continuación, se abordará de forma concisa los índices descriptivos y semicuantitativos más importantes para los métodos empíricos de evaluación de estabilidad de taludes rocosos, considerando la importancia de realizar una correcta descripción de la matriz rocosa en campo.

2.2.1. Tipos de rocas

En la naturaleza se pueden encontrar diferentes tipos de rocas que dependen del material de origen (Tablas 5 y 6) y el tipo de ambiente de formación (Marshak, 2011), en este apartado se presenta un resumen de los principales tipos de roca en la naturaleza.

Tabla 5. Clasificación de rocas sedimentarias, basado en el ISRM 1977.

<table>
<tr><td colspan="3">Grupo genético</td><td colspan="4">Sedimentaria detrítica</td><td>Piroclástica</td><td>Sedimentaria química</td></tr>
<tr><td colspan="3">Estructura común</td><td colspan="4">Estratificación</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Composición</td><td colspan="2">Fragmentos de roca, cuarzo, feldespato y minerales arcillosos</td><td>Al menos el 50% de los granos son de carbono</td><td></td><td>Al menos el 50% de los granos son de rocas volcánicas de grano fino</td><td>Rocas salinas,
Halita,
Anhidrita
Yeso
Caliza
Dolomía</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Tamaño de las partículas en (mm)</td><td>60</td><td>Grano muy grueso</td><td colspan="2">Los granos son fragmentos de rocas</td><td rowspan="2">Grava de carbonatos</td><td rowspan="2">Calcirudita</td><td rowspan="2">Granos redondeados
Aglomerado
Granos angulares
Brecha volcánica</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>2</td><td>Grano grueso</td><td>Bloque
Bolos
Gravas</td><td>Granos redondeados
Conglomerados
Granos angulares
Brechas</td></tr>
<tr><td>0,06</td><td>Grano medio</td><td colspan="2">Los granos son principalmente fragmentos minerales
Arenisca: Los granos son principalmente fragmentos minerales
Cuarcita: 95% son granos de cuarzo, huecos vacíos o cementados.
Arcosa: 75% cuarzo, >25% feldespatos, huecos vacíos o</td><td>Arena de carbonatos</td><td>Calciarenita</td><td>Tufa</td><td>Rocas salinas
Halita
Anhidrita
Yeso
Caliza
Dolomía</td></tr>
</table>

			cementados.					
			Grauvaca: 75% cuarzo, 15% material detrítico fino, fragmentos de roca y feldespatos.					
	0,002	Grano fino	Limo	Limolita: 50% de partículas de grano fino	Limo de carbonatos	Calcilimolita	Tufa de grano fino	Sílex
	<0,002	Grano muy fino	Arcilla	Arcilla: 50% de partículas de grano muy fino	Arcilla de carbonatos	Calciarcillita	Tufa de grano muy grueso	Pedernal Turba

Tabla 6. Clasificación de rocas metamórficas e ígneas, basado en el ISRM 1977.

Grupo genético estructura común			**Metamórfica**		**Ígneas Masivas**			
			Foliadas	**Masivas**				
Composición			Cuarzo, feldespato, mica, minerales oscuros aciculares.		Los minerales de color claro son cuarzo, feldespato, mica y minerales similares al feldespato			Minerales oscuros
					Rocas ácidas	Rocas intermedias	Rocas básicas	Rocas ultrabásicas
TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS (mm)	60	Grano muy grueso	Migmatita	Corneanas	Pegmatita			Piroxenita y Peridotita Serpentina
	2	Grano grueso	Gneis	Mármol	Granito	Diorita	Gabro	
	0,06	Grano medio	Esquisto	Granulita	Microgranito	Microdiorita	Dolerita	
				Cuarcita				
			Filita	Anfibolita				
	0,002	Grano fino	Pizarra Milonita		Riolita	Andesita	Basalto	
	<0,002	Grano muy fino			Obsidiana		Taquilita	

2.2.2. Color

Para analizar el color de roca, se debe tomar una muestra representativa considerando extraer un ejemplar del tamaño adecuado que permita incluir la mayor cantidad de partículas constituyentes y excluir las discontinuidades mayores, asegurando que la muestra sea lo más homogéne y representativa posible (Frost & Frost, 2019; M. A. Galvan Ceballos & Seron Ganez, 2020; Philpotts & Ague, 2009; Torrijo Echarri et al., 2020).

El color de una roca depende del tipo y cantidad de minerales que la componen, así como de posibles sustancias o impurezas que influyen sobre el color final a ser observado. Por ejemplo, un color verde es indicativo de presencia de clorita (Ulmer-Scholle et al., 2014; Yokoyama & Nakashima, 2005). Además, el color de la roca puede ayudar a determinar el proceso de degradación que ha experimentado, la oxidación del material, presencia de materia orgánica y ambientes de formación (ej. condiciones anóxicas), etc. (Mitsushita et al., 1998; Patnode, 1941).

A pesar de la aparente simplicidad para determinar el color de una roca, en la práctica este parámetro suele ser de difícil cuantificación objetiva (Sanmartín et al., 2010). Para evitar subjetividad en la cuantificación del color, se propone el uso de cartas de color, las cuales pueden ayudar para una mejor caracterización comparada con la realidad (Deaton, 1987). Sin embargo, si el color es un parámetro importante para los resultados del estudio, suelen utilizarse instrumentos de última generación que permitan definir el color de la roca de forma inequívoca y objetiva (Prieto et al., 2010).

También existen tablas de referencia donde se pueden encontrar guías para determinar el matiz y la intensidad del color de la roca (Tabla 7). Si la muestra de roca presenta dos o más minerales constitutivos, la descripción se deberá aplicar tanto a los colores dominantes, como a los colores accesorios, (Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007; Jordá Luís et al., 2015).

Tabla 7. Índices de color de las rocas según ISRM 1977.

Color	Matiz	Intensidad
Rosa	Rosado	Claro
Rojo	Rojizo	Oscuro
Amarillo	Amarillento	
Verde oliva	Pardo	
Verde	Oliva	
Azul	Verdoso	
Blanco	Azulado	
Gris	Grisáceo	
Negro		

2.2.3. Tamaño de grano

El tamaño de grano de una roca está determinado por la media de las dimensiones existentes entre los fragmentos de roca o los minerales que la componen (Antonio C., 2015). Para determinar el tamaño del grano en una muestra, debemos considerar el límite de percepción visual del ser humano y el tamaño mínimo de grano de la matriz rocosa, que debería ser superior a 0,06mm. Si el tamaño del grano es inferior a este valor, se pueden usar lupas de mano o fabricar laminas delgadas de rocas para uso de microscopio electrónico (Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007). El ISMR de 1977 detalla diferentes tipos de tamaños de grano existentes en una roca, (Tabla 8).

Tabla 8. Tamaño de la matriz rocosa, basado en el ISRM 1977.

Descripción	Diámetro de las partículas (mm)	Visibilidad	Correspondencia con los suelos
Grano muy grueso	< 60	Visible a simple vista o con la ayuda de lupas de aumentos	Bloque
Grano grueso	2 – 60		Grava
Grano medio	0,06 – 2		Arena
Grano fino	0,002 – 0,06	Visible con el microscopio	Limo
Grano muy fino	<0,002		Arcilla

2.2.4. Textura de la roca

La textura de la roca es una relación geométrica establecida entre los fragmentos que la componen y su fábrica. Esta última hace referencia a la orientación espacial y preferencial de los minerales constitutivos de las rocas analizadas (Wittke, 1990). Es importante aclarar que la textura de la roca, así como el tamaño de los minerales o fragmentos que la forman, pueden presentarse de forma homogénea o heterogénea, lo cual es importante considerar al momento de la descripción geológica de campo (Davis et al., 2011; Frost & Frost, 2019). Actualmente, la descripción de la textura de una roca se puede realizar mediante el uso de múltiples tablas publicadas en la literatura especializada, las cuales ayudan a identificar el parámetro descrito considerando únicamente el tipo de roca existente (Tarbuck, E.J. y Lutgens, 2005). La textura de una roca ayuda a entender y registrar en campo los parámetros ligados a su rugosidad, y al mismo tiempo obtener el coeficiente de textura, con el cual se puede predecir de manera aproximada el comportamiento mecánico de esta (Howarth & Rowlands, 1986).

2.2.5. Porosidad

La porosidad es una propiedad fundamental de las rocas, que permite la mayor o menor circulación de fluidos que se obtiene utilizando la ecuación
(1). Si se considera que el agua en la roca es uno de los parámetros más importante en la evaluación de la estabilidad de taludes rocosos, se puede comprender la importancia de esta propiedad para el análisis geomecánico (Archie, 1952; Hoek & Bray, 1981).

$$n = \frac{Vp}{V}\ 100 \qquad (1)$$

Donde

Vp = volumen de poros

V = volumen total

2.2.6. Humedad

Ligada a la porosidad, tenemos la humedad de las rocas, que puede afectar directamente la cohesión y la resistencia al corte de los suelos y rocas (Fredlund & Rahardjo, 1993). La humedad es una relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua contenida en la roca y la masa de la muestra secada a 110 °C.

$$H = \frac{Mh}{Ms}\ 100 \quad (2)$$

Donde

Mh = masa de agua contenida en la muestra

Ms = masa de la roca

2.2.7. Densidad

La densidad es una propiedad fundamental de las rocas, que permite entender de forma general la estructura interna de los materiales rocosos. Definida también como la proporción entre la masa de una muestra de roca en y el volumen que dicha muestra ocupa (Pettijohn, 1975). Para el presente estudio, interesa el cálculo de la densidad de la matriz rocosa, natural y seca, que excluye para su cálculo los espacios porosos existentes en la muestra analizada.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Donde

m = masa de la muestra

v = volumen de la muestra

La densidad seca se obtiene luego de pasar la muestra por el secado a 110°C.

$$\rho s = \frac{ms}{vs} \quad (4)$$

Donde

m_s = masa seca

v_s = volumen seco

2.2.8. Meteorización

Entiéndase por meteorización a todo proceso que puede provocar en las rocas superficiales una modificación o cambio de las características existentes al momento de aflorar en superficie o cerca de ella, así como la interacción de los materiales geológicos con el entorno y los procesos propios de cada clima (Price, 1995). La meteorización es un proceso no lineal que disminuye con el tiempo, ya que es posible que los residuos de meteorización pueden ralentizar los procesos superficiales que actúan sobre las rocas. Dado que la meteorización en rocas heterogéneas es muy compleja, se suelen utilizar expresiones empíricas relacionadas con funciones logarítmicas del tiempo (Colman, 1981). Se conocen tres tipos de meteorización: la física, que tiene una acción mecánica; la química, que provoca descomposición de los elementos constitutivos de la roca, también llamada corrosión: y la biológica, que requiere la intervención de un ser viviente para provocar la modificación o cambio (Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007). A continuación, se presenta un cuadro y diferentes gráficos que ayudan en la determinación de este parámetro. Se puede identificar el término exacto, la descripción de la meteorización y el grado de esta mediante estándares establecidos (Tabla9).

Tabla 9. Meteorización de la masa rocosa, basado en el ISRM 1977.

Término	Descripción	Grado
Fresco	Sin signos visibles de alteración; pequeñas decoloraciones en las discontinuidades mayores.	I
Ligeramente meteorizado	Meteorización o decoloración de la matriz rocosa y paredes de las discontinuidades. Puede todo el material rocoso presentarse descolorido por meteorización, con posibles áreas de mayor debilidad externa que las encontradas en estado fresco (sanas).	II
Moderadamente meteorizado	Desintegración o descomposición a suelo de al menos 49% del material rocoso. Presencia de áreas de roca sana o descolorida en forma de entramado discontinuo o como fragmentos aislados.	III

Muy meteorizado	Más del 50% del material rocoso se presenta descompuesto o desintegrado a suelo.	IV
Completamente meteorizado	Descomposición o desintegración de grandes zonas de la matriz rocosa a suelo. La estructura original del macizo rocoso está sensiblemente intacta.	V
Suelo residual	Conversión completa de roca a suelo. Eliminación completa de la estructura y fábrica del macizo rocoso. Aumento considerable de volumen, sin transporte significativo del suelo formado.	VI

Considerando que la meteorización produce cambios que disminuyen la resistencia de la roca, algunos autores han propuesto un factor de reducción relacionado con el grado de meteorización existente (Tabla 10).

Tabla 10. Factor de reducción según grado de meteorización de la roca.

Grado	Descripción	Factor
VI	Suelo residual; textura original, estructura y mineralogía completamente destruida.	0,001 - 0.004
V	Completamente degradado descompuesto y friable, textura y estructura de roca conservada.	0.004 - 0.01
IV	Muy persistente: la meteorización se extiende a lo largo de la masa de roca y material corozo con parte friable.	0.01 - 0.04
III	Moderadamente persistente: la meteorización se extiende a lo largo de la masa rocosa, la roca no es friable.	0.04 - 0.1
II	Ligeramente persistente: meteorización penetra levemente en las juntas abiertas con poca erosión de material rocoso.	0.1 - 0.4
I	Fresco y sin signos visibles de erosión con meteorización limitada a la superficie de discontinuidades principales.	0.4 - 1

Dependiendo del ambiente climático en el macizo rocoso, ciertas acciones predominar sobre otras. Por ejemplo, la acción causada por el agua en un ambiente frío de alta montaña difiere de la que se observaría en un ambiente tropical a nivel del mar. Para comprender este principio, se incluyen gráficas (Figura 8) que ilustran la acción de los agentes considerando variables como precipitación y temperaturas medias anuales (Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007).

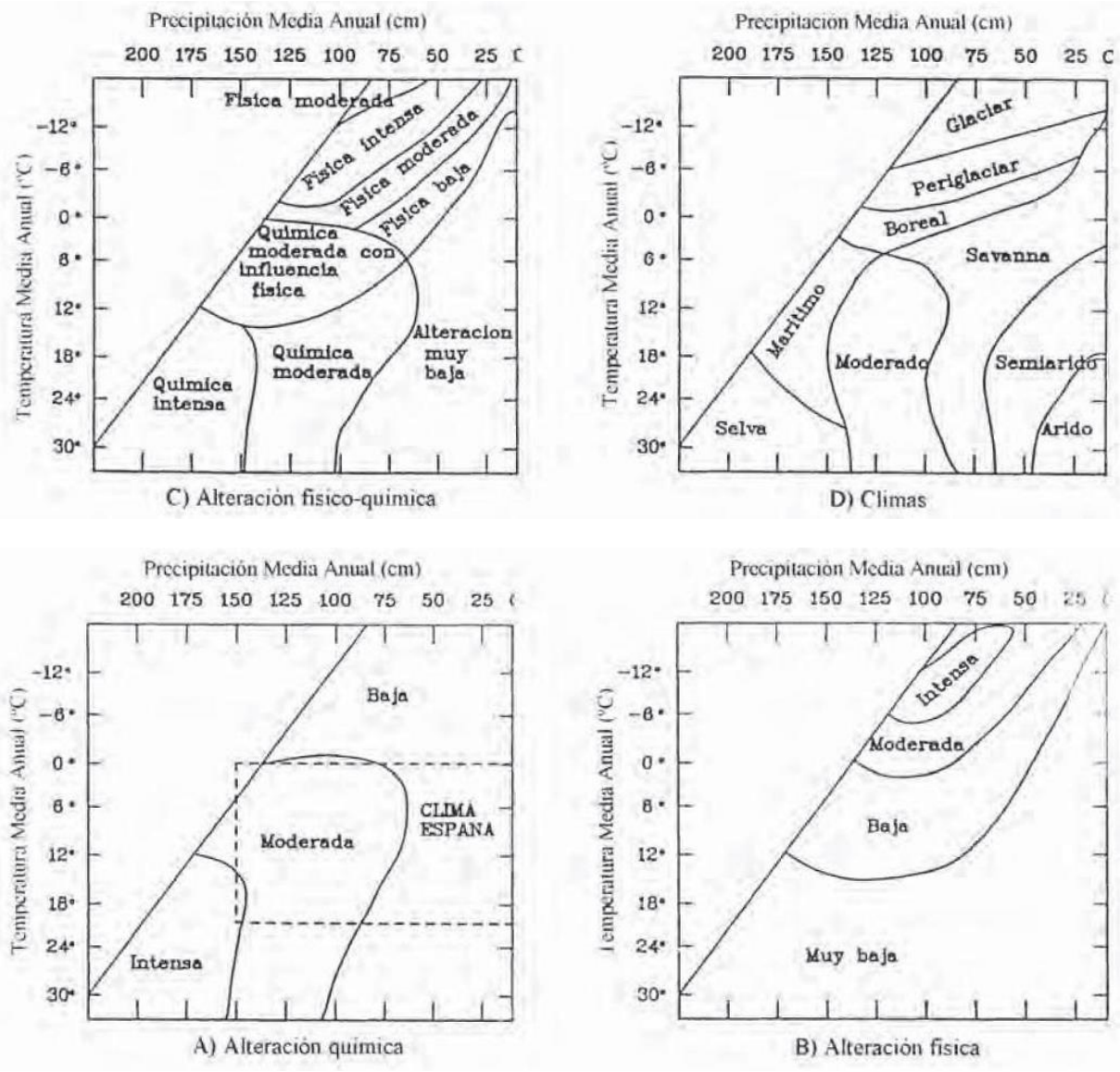


Figura 8. Relación entre procesos de alteración y clima, fuente (Embretan y Thurnes, 1979).

2.2.9. Rotura frágil de las rocas

Para comprender las roturas producidas en una muestra, se debe analizar el comportamiento que tienen las microfisuras existentes en un testigo de roca sometido a ensayo. Estas microfisuras, representadas por microgrietas, inclusiones y poros, simbolizan típicamente las debilidades presentes en la matriz rocosa, las cuales afectan la integridad estructural de una muestra, reduciendo su dureza y rigidez (Baud et al., 2014; Griffiths et al., 2017; Hashin, 1988).

En el laboratorio, se pueden analizar los modos de fractura de las rocas y las microfisuras inducidas mecánica, química y térmicamente. Mediante emisión acústica (EA) en muestras sometidas a diferentes tipos de ensayos de laboratorio como el ensayo de tracción indirecta, ensayo de flexión de tres puntos, ensayo de corte modificado y ensayo de compresión uniaxial, se ha establecido que las características de las AE guardan una estrecha relación con los tipos de microgrietas que se producen durante el proceso de fractura de la roca (Du et al., 2020). De esta manera, si la presión de confinamiento es pequeña, la probeta rompe según una banda de rotura. Si la presión de confinamiento aumenta, la probeta tendrá una deformación pseudodúctil con generación de numerosas microfisuras y grandes deformaciones. En conclusión, las microfisuras tendrán un comportamiento diferente cuanto mayor sea la presión de confinamiento aplicada. (Figura 9).

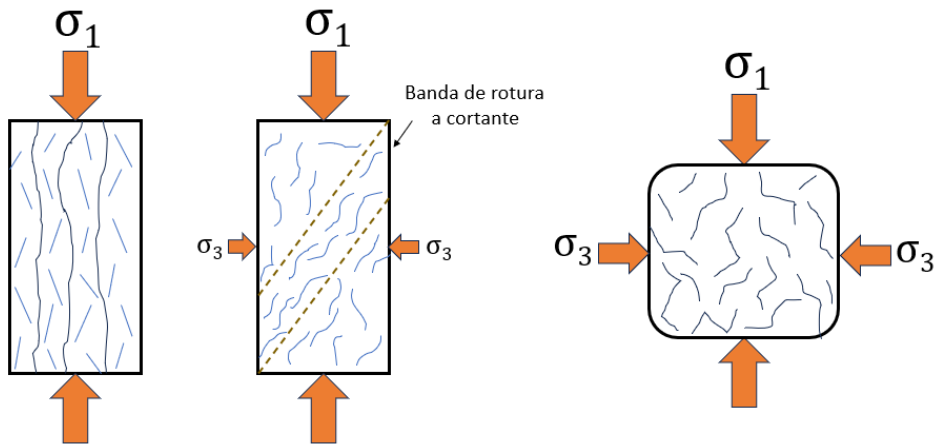


Figura 9. Comportamiento de rotura sobre probetas sometidas a compresión, modificado de Ramírez and Alejano 2008.

2.2.10. Resistencia de la matriz rocosa

La resistencia de la matriz rocosa está intrínsecamente relacionada con la resistencia a compresión simple, que se traduce como el esfuerzo máximo a compresión que podría soportar un determinado tipo de roca antes de rotura (Calderon Carrillo, 2014). En la actualidad, existen diferentes formas de obtener el valor de resistencia a compresión simple, tanto en campo como en laboratorio, (Tabla 11). Estas dependerán de las condiciones específicas relacionadas al tipo de investigación ejecutada.

Tabla 11. Métodos para determinar la resistencia a compresión simple, modificado del ISRM,1977.

Entorno	Método	Observaciones
Campo	Basados en índices básicos de campo (ensayos organolépticos); martillo geológico, indentaciones, etc.	Rangos estimados de valores de resistencia a compresión simple de la matriz rocosa.
	Esclerómetro o martillo de Schmidt.	Entrega a partir del valor obtenido del rebote del vástago, un valor objetivo de resistencia a compresión simple.
Campo y laboratorio	Ensayo de carga puntual o Franklin.	Suministra un valor a carga puntual que se correlaciona con resistencia a compresión simple.
Laboratorio	Ensayo brasileño o de compresión diametral.	Entrega el valor a la resistencia a compresión diametral, correlacionable con la resistencia a compresión simple.

	Ensayo de compresión simple.	Provee de forma directa el valor de resistencia a compresión simple de la roca.

En la mayoría de los casos, especialmente considerando ambientes extremos y el efecto de escala, es complicado y difícil identificar en campo la ubicación exacta de áreas para recopilar información sobre la matriz rocosa en estaciones geomecánicas o seleccionar muestras para ensayos de laboratorio (Napier-Munn et al., 2020; Yong et al., 2019). En tal evento, por regla general, lo que se obtienen son datos puntuales en las paredes de las discontinuidades expuestas (Han et al., 2019), con especial cuidado de que las medidas se realicen en zonas lo más representativas posibles del talud y con el menor grado de meteorización de la cara expuesta de la discontinuidad.

Para obtener en campo el parámetro más importante de la matriz rocosa, que está relacionado con el valor RCS o UCS, comúnmente se utilizan implementos o herramientas de campo que ayudan a establecer criterios geomecánicos, los cuales posteriormente se contrastan con tablas preestablecidas (Tabla 12) (Gavilanez & Andrade, 2004; Jorda, 2008).

Tabla 12. Correlación de campo para resistencia a compresión Uniaxial, (Marinos & Hoek, 2018).

Grado según Brown (1981)	Término	Resistencia a compresión uniaxial (MPa)	Índice de carga puntual (MPa)	Estimación en campo de la resistencia	Ejemplos
R0	Extremadamente débil	0,25 – 1	Ensayo de carga puntual con resistencia a la compresión uniaxial por debajo de 25 MPa es probable que se produzcan resultados altamente ambiguos	Hendida por la presión de uña	Relleno rígido de falla
R1	Muy débil	1 – 5		Deleznable bajo golpes fuertes con la parte puntiaguda del martillo geológico; puede desconcharse con una navaja	Roca altamente meteorizada o alterada
R2	Débil	5 – 25		No se raya fácilmente con navaja; marcas poco profundas con martillo de geólogo	Creta, Sal de roca, Potasa
R3	Medianamente resistente	25 – 50	1 – 2	No se rayar o desconcha con navaja; con un golpe firme del martillo de geólogo las muestras se rompen	Arcilita, Carbón, Esquisto, Lutita, Limolita, Concreto

R4	Resistente	50 – 100	2 – 4	Para fracturar la muestra se requiere de más de un golpe del martillo de geólogo	Caliza, Mármol, Filita, Arenisca, Esquisto
R5	Muy resistente	100 – 250	4 – 10	Requiere muchos golpes con el martillo geológico para romper la muestra	Mármol, Riolita, Toba, Anfibolita, Arenisca, Basalto, Gabro, Gneis, Granodiorita, Caliza
R6	Extremadamente resistente	> 250	> 10	Unicamente puede ser picado con el martillo geológico	Granito, Cuarcita, Basalto fresco, Gneis

2.2.11. Comportamiento de las rocas frente a esfuerzos de compresión

Al analizar una roca y determinar las propiedades mecánicas, el investigador puede aplicar ensayos de compresión simple o triaxial (Haimson & Chang, 2000; Kwaśniewski, 2012). Para comprender este proceso, referiremos el análisis al comportamiento de una muestra sometida a compresión (Figura 10). En estos procedimientos, es común que al inicio del proceso los poros y fisuras comiencen a cerrarse, lo que conlleva una deformación inelástica que culmina en el punto de ordenada σ_1^c . Posteriormente, sigue un tramo recto de la curva que representa un comportamiento lineal, donde se relacionan la deformación lateral y la tensión y deformación axial. La pendiente de esta recta representa el Módulo de Young y coeficiente de Poisson de la roca, simbolizado por la relación ε_3 y ε_1.

Luego, en la zona central y periferica de la probeta, se forman nuevas microfisuras subverticales que pueden ser escuchadas con un captador de microrruidos (Lockner, 1993; Menéndez et al., 1996). Estas microfisuras subverticales se propagan paralelas a la tensión axial σ_1, lo que ocasiona que la pendiente de la recta que representa la deformación lateral disminuya. Este segmento de la curva se conoce como zona de propagación estable de fisuras y se distingue porque con cada incremento de tensión en la probeta se produce un aumento finito en la longitud de microgrietas, hasta el cese del incremento de tensiones. Este segmento característico inicia en el punto de ordenada σ_1^F

(umbral de fisuración) y termina en la ordenada σ_1^0 (resistencia a largo plazo de la probeta) (Ramírez & Alejano, 2008).

Posteriormente, se observa una disminución de la pendiente σ-Ɛ hasta alcanzar la resistencia máxima de la probeta σ_1^M. Esta etapa también es conocida como propagación inestable de fisuras, caracterizada porque las fisuras comienzan a intersectarse y coalescer hasta aflorar en los extremos de la muestra ensayada, dando lugar a una superficie semicontinua de fracturación. Si la rigidez de la prensa difiere con la rigidez de la probeta, el ensayo no terminaría al alcanzar la resistencia máxima, sino que se prolongaría hasta llegar a la resistencia residual de la roca, siendo este un valor crucial en el ensayo triaxial, ya que se determina el ángulo de fricción interna de la muestra.

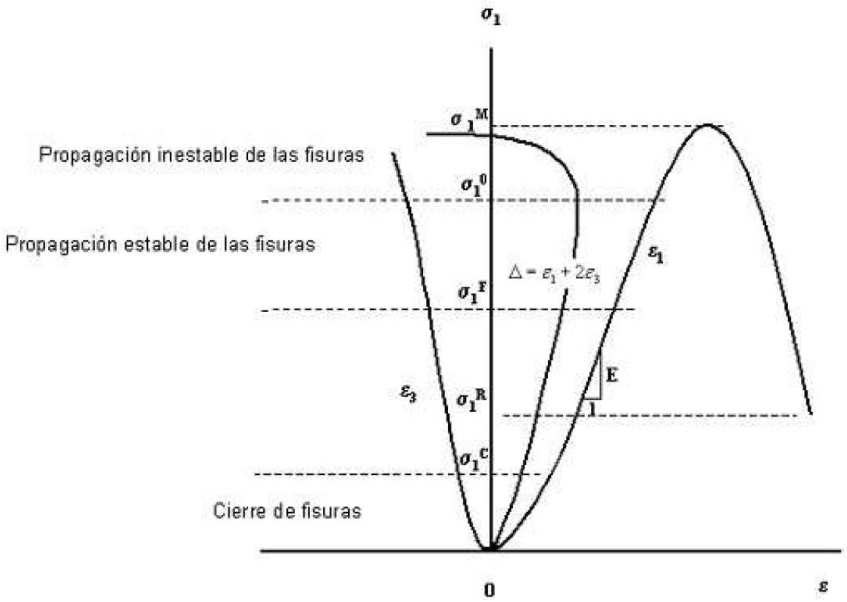


Figura 10. Comportamiento de las muestras de roca sometidas a compresión (Ramírez & Alejano, 2008).

2.2.12. Esclerómetro o martillo de Schmidt

El esclerómetro o martillo de Schmidt es un equipo de mano que permite realizar medidas sobre la superficie de una roca mediante el rebote de un pistón o vástago el cual golpea la superficie analizada y reacciona según su dureza arrojando una medida que puede ser tomada directamente en campo (Barton, 1976; Ramírez & Alejano, 2008). Para usar un esclerómetro se debe tener en cuenta que el sector del talud donde se realice el ensayo deberá ser una superficie limpia y plana que no presente capas sueltas de roca producto del intemperismo (M. Galvan Ceballos, 2015). El rebote del pistón interno del equipo también conocido como

índice esclerométrico R(n) permite obtener un valor de correlación de la resistencia a compresión de la roca (Kane & Drumm, 1986; Lozano, 1978) (relación lineal) o estimar la dureza de la misma (Goudie et al., 1989; Synowiec, 1999). Para obtener el valor de resistencia a compresión uniaxial de la roca el operador debe anotar la posición del instrumento al momento del levantamiento en campo y el valor del índice leído directamente del esclerómetro (Figura 11). En los últimos años los resultados obtenidos del martillo Schmidt han tenido y tienen múltiples usos y aplicaciones en ciencias de la tierra (Albaijan et al., 2024; Fujimura et al., 1990; McCarroll & Nesje, 1993; Rostami et al., 2024; Shakesby et al., 1987; Valido et al., 2024).

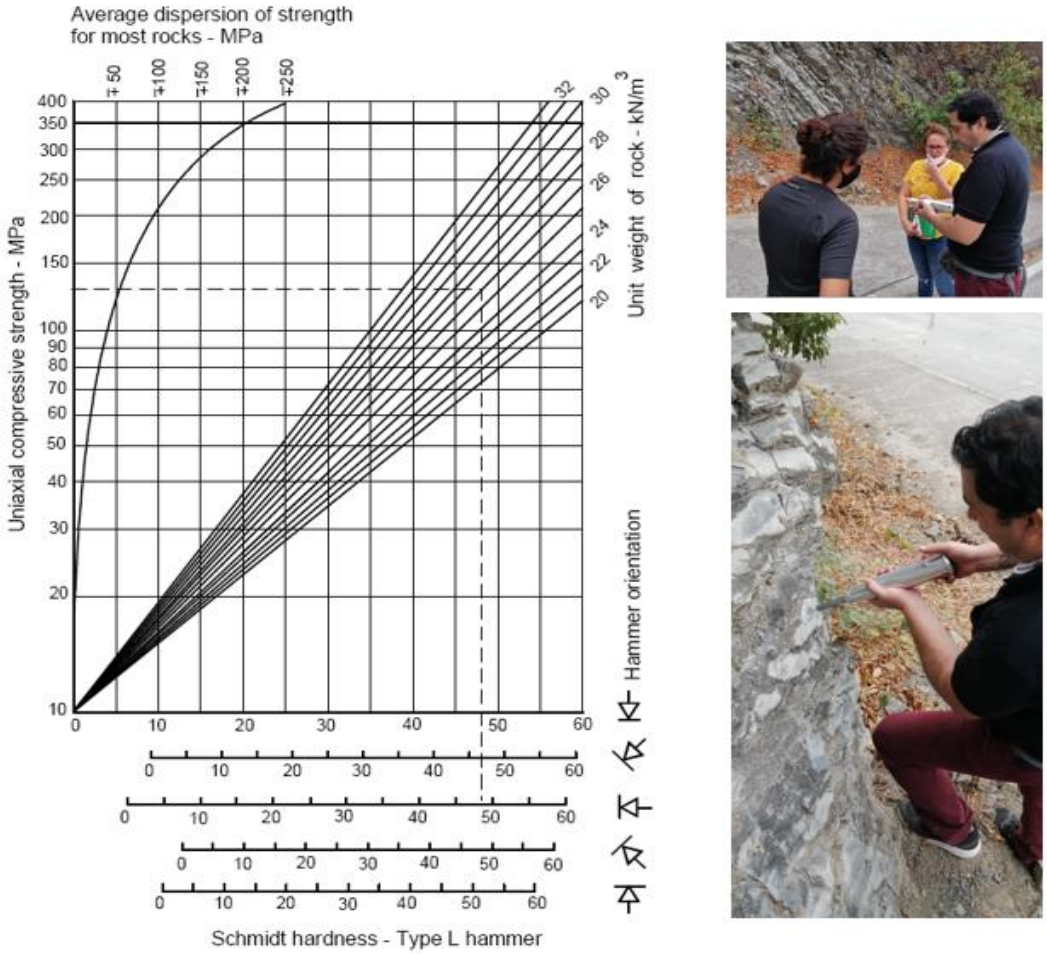


Figura 11. Gráfico estándar para obtener resistencia uniaxial usando esclerómetro (Deere & Miller, 1966). A la derecha utilización en campo.

2.2.13. Ensayo Franklin o de carga puntual (PLT)

Al hablar sobre ensayos de laboratorio para análisis de matriz rocosa, comúnmente ejecutados en estudios geomecánicos, el ensayo más común, sencillo y económico es el ensayo de carga puntual o Franklin, el cual no requiere necesariamente de una preparación exigente de las muestras obtenidas en campo (Broch & Franklin, 1972; Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007). En ocasiones, cuando no se dispone de suficiente material para preparar probetas en laboratorio, o si los testigos están altamente fracturados o no presentan la geometría adecuada para la prueba de UCS, el ensayo Point Load Test resulta una opción muy apreciable entre los investigadores debido a lo versátil del método para la obtención rápida de la resistencia a tracción y resistencia a compresión uniaxial de las rocas (Elkateb, 2009; M. Wang et al., 2024).

Otra ventaja del ensayo de carga puntual es que también puede ser ejecutado en campo, siendo necesario únicamente ensayar una cantidad mayor de especímenes que pueden ser obtenidos fácilmente in situ (Ramírez & Alejano, 2008). Es importante que las muestras, al ser analizadas, sigan ciertos parámetros mínimos considerando las posibles irregularidades de las muestras obtenidas en campo (Tabla 13) (Broch & Franklin, 1972). Muestras con diámetros de 30 a 85 mm y de diferentes formas pueden ser ensayadas para obtener un valor representativo y aproximado a la realidad.

Tabla 13. Requisitos geométricos de probetas ensayo PLT, (Galván, 2015).

Forma de la muestra	Distancia entre puntos de carga (D)	Semilongitud de la probeta (L)	Ancho de la probeta		
			Mínimo (W1)	Mayor (W2)	Medio (W)
Cilíndrico diametral	D	L > 0,5 D			
Cilíndrico axial	0,3 W<D<W				W
Bloque regular	0,3 W<D<W	L > 0,5 D			W
Bloque irregular	0,3 W<D<W	L > 0,5 D	W1	W2	½ (W1+W2)

En la siguiente figura se presenta una visual de las variaciones en la geometría de muestras utilizadas para análisis de carga puntual (Figura 12). La figura ilustra las diferentes características geométricas como diámetro, largo y forma de las muestras.

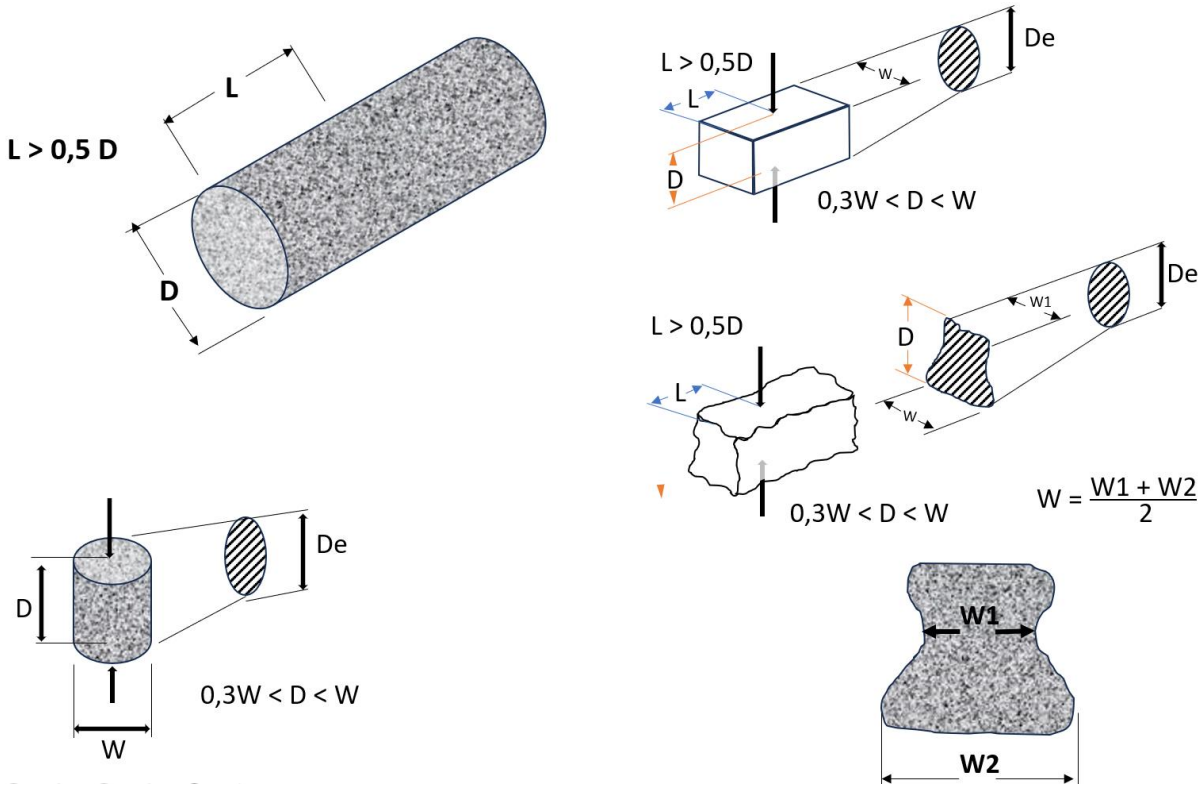


Figura 12. Geometría de probetas y muestras irregulares para ensayo de carga puntual, mofificado de (Jordá Luís et al., 2015; NLT-252/91, 1991; UNE 22950-5, 1996).

Se debe garantizar que el equipo cuente con una capacidad de carga suficiente para romper las muestras más grandes que puedan ser admitidas por el instrumento (Figura 13). Asimismo, es crucial que las lecturas posean una precisión mínima de ± 5%P (M. A. Galvan Ceballos & Seron Ganez, 2020).

Figura 13. Prensa Franklin para ensayo de carga puntual.

El ensayo Franklin proporciona el índice de carga puntual de la roca (Is), el cual esta correlacionado con la resistencia a compresión simple (σ_c).

El índice a carga puntual no corregido (Is) se calcula utilizando la fórmula:

$$Is = \frac{P}{D_e^2} \quad (5)$$

Donde el parámetro es conocido como diámetro equivalente, puede ser calculado con la expresión:

$$D_e^2 = \frac{4\,x\,W\,x\,D}{\pi} \quad (6)$$

Donde,

W = anchura media de la muestra, que es la semisuma de las anchuras máxima y mínima.

D = distancia entre las puntas de los conos del equipo, los cuales están hechos de acero endurecido o carburo de wolframio.

El valor (Is) puede variar según el diámetro equivalente (De) en los ensayos que involucren el uso de muestras irregulares. Esta particularidad requiere la realización de una corrección por tamaño para conseguir un valor único relacionado a resistencia a la carga puntual (Galvan et al., 2014). Por convención, se emplea el ($Is_{(50)}$), correspondiente al valor obtenido con una muestra de diámetro de 50 mm. (Jordá Luís et al., 2015).

$$Is_{50} = (\frac{D}{50})^{0,45} Is \quad (7)$$

Para corregir muestras con diámetros superiores a 54mm, se pueden aplicar gráficas donde se obtienen los parámetros de corrección (Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007) (Figura 14).

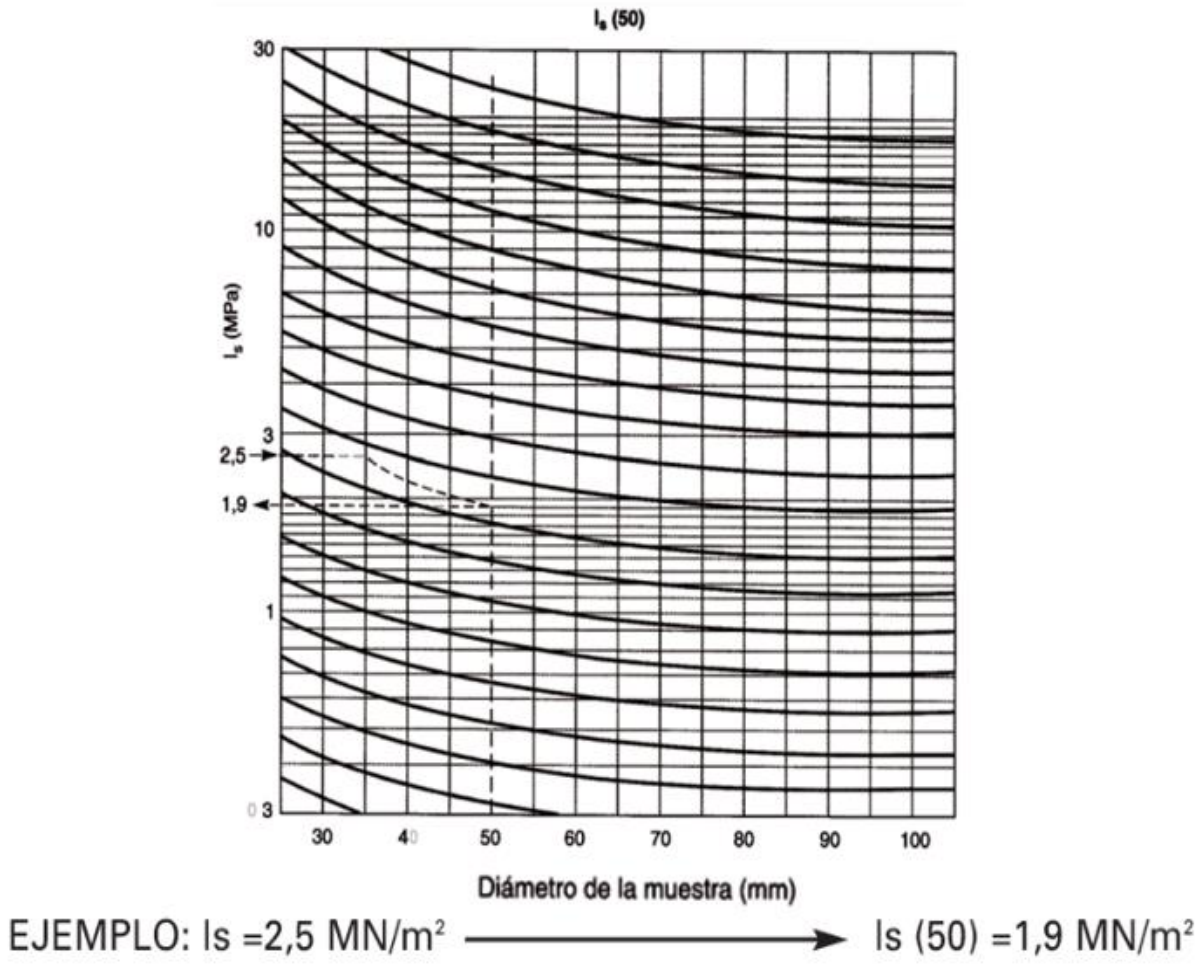


Figura 14. Corrección por diámetro de muestra para ensayo PLT (Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007).

Se pueden definir tres procedimientos a seguir para calcular el valor requerido:

i) Ensayo sobre muestras cuyo valor de D sea muy próximo a 50mm. No requiere corrección.

ii) Muestras de tamaños distintos. Para este caso, los valores se grafican en ejes logarítmicos representando el diámetro equivalente (D_e^2) y carga de rotura (P). Se construye una recta para interpolar el valor de P correspondiente a D_e^2 y posterior cálculo de $Is_{(50)}$.

iii) Muestras de tamaño menor a 50 mm o pequeños fragmentos de roca. Se calcula aproximadamente el índice de resistencia a carga puntual corregido $Is_{(50)}$. Para tal efecto, se usan las siguientes expresiones:

$$Is_{50} = F \; x \; Is \qquad (8)$$

Donde F es un factor de corrección calculado según:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad (9)$$

Existen muchas correlaciones que pueden ser usadas una vez obtenido el índice $Is_{(50)}$. A continuación, se exponen las más utilizadas:

Broch y Franklin (1972), Correlación con resistencia a compresión simple:

$$\sigma c = 24\ x\ Is_{50} \quad (10)$$

Broch (1993), relación entre resistencia a tracción T_o y el índice de carga puntual:

$$Is_{50}: To = 1,5\ x\ Is_{50} \quad (11)$$

Debido a la dispersión en los resultados obtenidos, se recomienda ensayar la mayor cantidad de muestras posibles (Figura 15). También es recomendable, dependiendo del tipo de obra y diseño, la ejecución de ensayos complementarios que aseguren los valores finales de diseño (Ramírez & Alejano, 2008).

Figura 15. Cantidad de muestras y estado de ejemplares antes y después del ensayo.

2.2.14. Ensayo de tracción indirecta

También conocido como ensayo brasileño, es un método de laboratorio económico y simple que permite aplicar sobre la sección diametral de una muestra cilíndrica, una fuerza de compresión a velocidad de 200N/s hasta alcanzar su rotura (Figura 16), la que resulta coincidente con el plano de carga. Con este procedimiento, se obtiene el valor de resistencia de tracción de la muestra (M. A. Galvan Ceballos & Seron Ganez, 2020). Existen estudios que respaldan la aplicación del método en materiales frágiles, con la adopción de diferentes modelos los cuales se basan en el estrés efectivo por tracción (Andreev, 1991).

La resistencia a compresión simple puede correlacionarse con el resultado del ensayo a tracción directa mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_c \approx= 8\sigma_{tB} \quad (12)$$

Donde

σ_c = Resistencia a compresión uniaxial (Mpa).

σ_{tB} = Resistencia a la tracción brasileña.

Figura 16: Ensayo tracción indirecta, laboratorio caminos canales y puertos UPM.

2.2.15. Ensayo de compresión simple

En la actualidad, el ensayo de compresión simple es el más importante, difundido y utilizado en el área de la geotecnia para determinar el comportamiento mecánico de la roca en el diseño de estructuras superficiales y subterráneas (Galvan et al., 2014; Kahraman, 2001). Sin embargo, se debe tener presente que la resistencia a compresión uniaxial de la roca no es una propiedad intrínseca del material, ya que las propiedades intrínsecas de los materiales no dependen de la geometría o condiciones de la muestra o del ensayo, respectivamente (Gavilanez & Andrade, 2004). Con esta premisa, la toma de muestras para este ensayo se pueden realizar directamente de testigos de perforación obtenidos en un sondaje de investigación o mediante la ejecución de una perforación de laboratorio sobre un bloque de roca extraido directamente del macizo rocoso (Figura 17), sin uso de explosivos o perturbaciones mecánicas agresivas que puedan ocasionar que las microfisuras existentes aumenten o se propaguen antes del ensayo de laboratorio, ocasionando consecuentemente valores inferiores a los reales (Ramírez & Alejano, 2008).

Figura 17: Muestra ensayada a compresión simple, laboratorio caminos canales y puertos UPM.

El ensayo a compresión uniaxial o resistencia a compresión simple de la matriz rocosa es el valor obtenido al aplicar una fuerza de compresión a una muestra estandarizada de roca sin la intervención de fuerzas de confinamiento (M. Galvan Ceballos, 2015). El ensayo permite determinar la resistencia a compresión uniaxial de una probeta cilíndrica de roca, que debe tener el doble o triple de altura con relación al diámetro propio de la muestra, además de obtener datos esenciales como la cohesión y el ángulo de fricción para simulaciones numéricas y diseños de estructuras superficiales y subterráneas (Ramírez & Alejano, 2008; Sivakugan et al., 2014). También es recomendable que la probeta presente un diámetro mayor de 10 veces el tamaño máximo del grano de la roca, o un diámetro no inferior a 50 mm (Tabla 14). También se debe considerar que la superficie lateral de la probeta debe ser lisa y estar libre de irregularidades; al mismo tiempo, las caras laterales deben ser planas formando un ángulo recto con el eje de la probeta (M. A. Galvan Ceballos & Seron Ganez, 2020). Se debe tener en cuenta que muestras largas pueden romper por inestabilidad elástica y muestras cortas pueden no considerar planos preferenciales de rotura; al mismo tiempo, el valor obtenido puede disminuir con el porcentaje de saturación que tenga la muestra antes del ensayo (Gavilanez & Andrade, 2004).

Tabla 14. Tolerancia en fabricación de probetas para ensayo a compresión uniaxial, (UNE, 1990).

Tolerancia respecto a:	Deformabilidad de la roca		
	Baja	Media	Alta
Desviación de la generatriz respecto a la dirección axial.	±0,3mm	±0,4mm	±0,5mm
Planitud de la base.	±0,02mm	±0,5mm	±0,1mm
Desviación respecto al ángulo recto, del ángulo del eje de la probeta con la base.	10'	20'	30'

Pese a las limitaciones de esta prueba para determinar el comportamiento mecánico de la roca (Kahraman, 2001), esta sigue siendo muy utilizada para obtener las constantes elásticas de la roca, conocidas también como módulo de Young y coeficiente de Poisson (Calderon Carrillo, 2014). El objetivo principal de este ensayo en geomecánica es clasificar la roca por su resistencia aplicando un criterio de rotura adecuado (Mohr-Coulomb y Hoek-Brown).

Se puede concluir que para analizar la matriz rocosa existen numerosos ensayos de campo y laboratorio. Estos ensayos requieren una comprensión profunda del método y una estandarización de procesos que permitan su efectiva aplicación.

2.3. Propiedades geomecánicas de las discontinuidades

Las discontinuidades, al ser planos de debilidad, afectan notablemente la estabilidad de un macizo rocoso, el cual puede presentar bloques de diferentes tamaños y formas que deslizan sobre una o dos juntas que se combinan para formar un planos de deslizamiento (Jiang et al., 2013). Las propiedades de los macizos rocosos dependen en gran medida del estado de las fracturas; al entender la geometría y las propiedades de estas, se puede disminuir la incertidumbre sobre su comportamiento y predecir la interacción que tendrán las estructuras a ser emplazadas dentro o sobre los macizos rocosos (Kulatilake & Wu, 1986; Park & West, 2001). En el presente apartado, se abordarán estrictamente las propiedades de las juntas que pueden ser evaluadas en campo mediante análisis geomecánico de taludes rocosos (Figura 18).

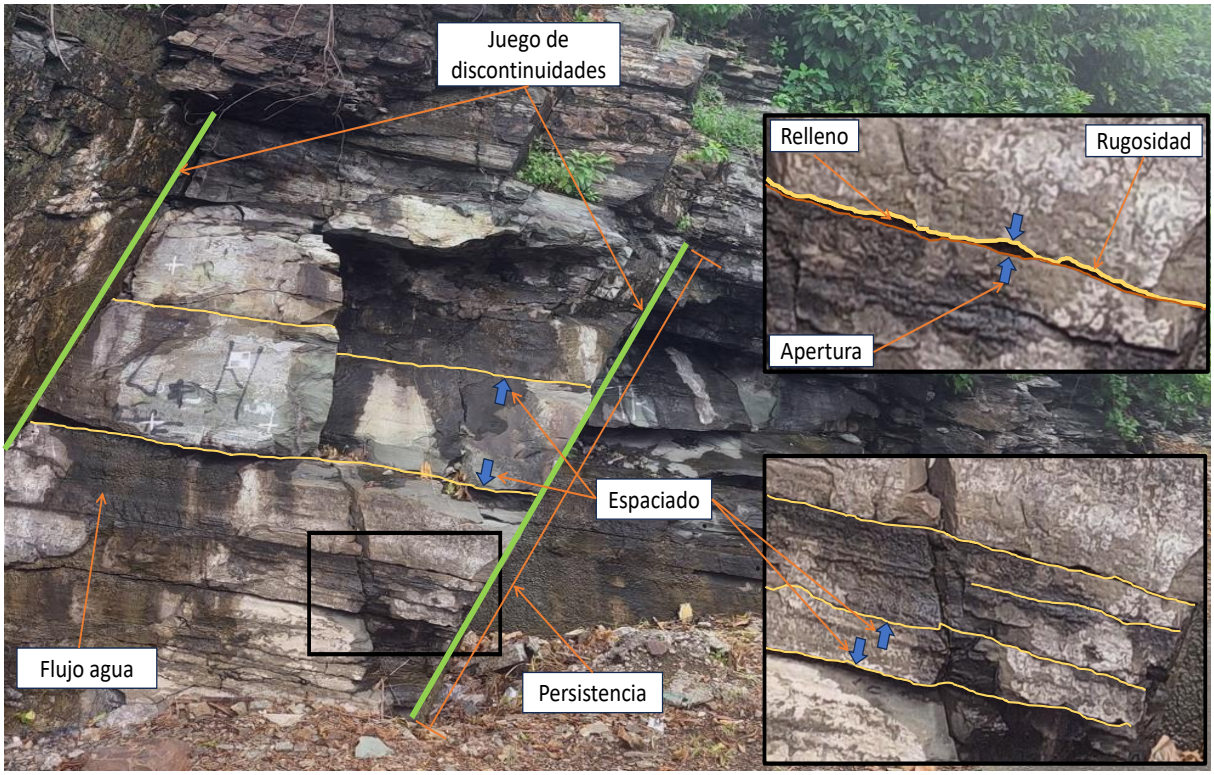


Figura 18: Propiedades de las juntas en un talud rocoso.

2.3.1. Tipo y orientación de las discontinuidades

Debido a que el término "discontinuidad" no hace referencia al origen, edad o geometría de esta, al momento de analizar los planos significativos de ruptura o fractura mecánica de la matriz rocosa se deben hacer aclaraciones sobre los planos que aparecen en las primeras fases de formación de la roca, así como en fases posteriores a su formación producto de esfuerzos tectónicos (Priest, 1993). Un ejemplo claro de discontinuidad primaria o de origen son los planos de foliación, o estratificaciones presentes en rocas metamórficas y sedimentarias respectivamente. Por otro lado, tenemos las diaclasas, fallas y esquistosidad como los ejemplos comunes de discontinuidades producto de esfuerzos tectónicos (Jorda et al., 2016; Palmström, 2001).

Posteriormente, para realizar una correcta descripción de las diferentes familias de juntas que se pueden encontrar en un talud, el especialista debe recopilar información sobre orientación, persistencia, espaciado, rugosidad, resistencia, apertura, relleno y presencia de agua en una discontinuidad (Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007). A continuación, se abordará el primero de ellos, en el cual se destacan dos parámetros fundamentales: i) la dirección que presenta el plano analizado con referencia al norte magnético o dirección de buzamiento (Dip

Direction en inglés) y ii) el buzamiento del mismo plano (Dip en inglés) (Figura 19) modificada de (Hoek et al., 2000; Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, 1997).

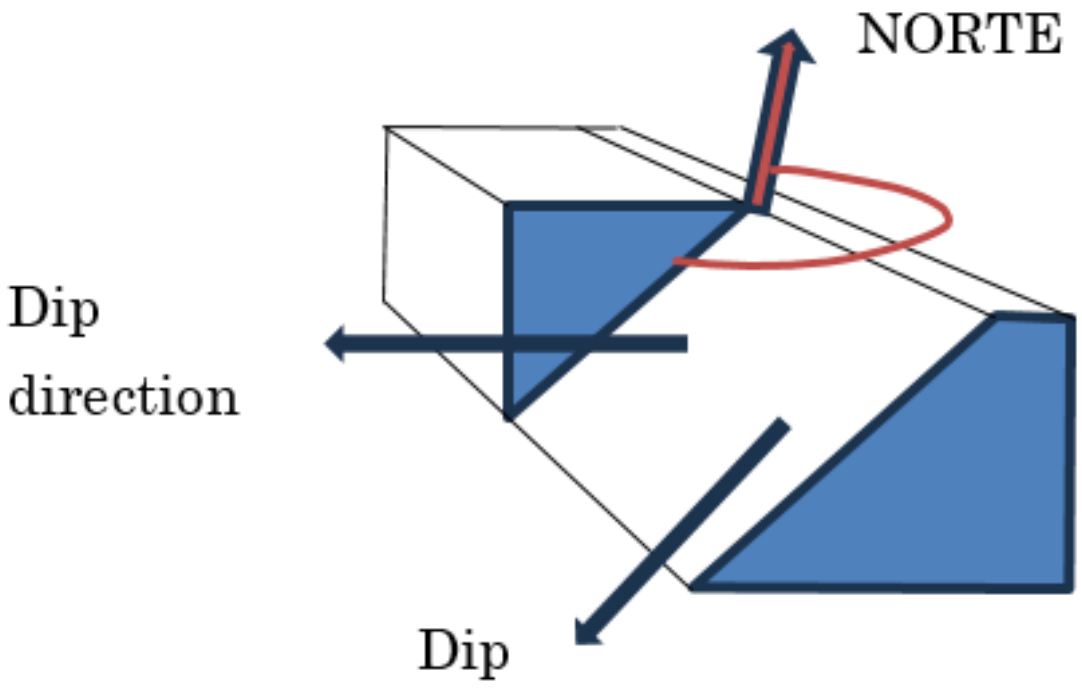


Figura 19: Representación geomecánica de la orientación de juntas.

2.3.2. Censo de discontinuidades

Las discontinuidades presentes y su posición influyen directamente en la estabilidad del macizo rocoso. En este sentido, los planos de debilidad pueden aparecer de forma singular (Tabla 15), caracterizado por la no repetición del plano dentro del macizo rocoso (por ejemplo una falla), o sistemática, caracterizada por la repetición de planos dentro del macizo rocoso (sets o familias de juntas), los cuales presentan valores similares al momento de realizar la caracterización estructural de los planos (Dip – Dip dir) (Jordá, 2015).

Tabla 15. Tipos principales de discontinuidades, (Gonzáles de Vallejo,Li & Ferre, M, 1999; RENFE, 2003).

Discontinuidades	Singulares	Sistemáticas
Planares	Fallas	Planos de estratificación Diaclasas o juntas
	Diques	Microfallas Planos de esquistosidad Juntas estilolíticas
	Kink bands y planos axiales	
Lineales	Ejes de pliegues	Intersección de discontinuidades planares Lineaciones

2.3.3. Espaciado

El espaciado, también conocido como espaciamiento, se define como la distancia posible entre dos discontinuidades contiguas. La literatura especializada define tres tipos de espaciados: i) Espaciado normal de familia, que puede definirse como el espacio medido perpendicularmente a los planos típicos de una determinada familia, ii) Espaciado de familia, medida no necesariamente perpendicular a dos diaclasas consecutivas pertenecientes a la misma familia de juntas; y iii) Espaciado total, medida realizada en una determinada dirección sin importar que las fracturas existentes sean o no de la misma familia.

El uso o no de un determinado tipo de espaciado está ligado al objetivo final que busca el levantamiento de campo, es decir, si es o no importante para el resultado final que las medidas del espaciado sean entre discontinuidades de la misma familia o no. Por ejemplo, se usa un espaciamiento normal para determinar el sumando RMR_3 del índice de Bieniawski, lo cual no es importante si lo que queremos es calcular el RQD en el frente de un talud (Priest & Hudson, 1981).

Como se ha mencionado, el espaciado en las fracturas permite hacer una descripción del estado de estas en el talud analizado. El ISRM de 1981 propone una descripción específica de las juntas basada en el espaciado de ellas (Tabla 16).

Tabla 16. Espaciado de discontinuidades.

Espaciado (cm)	Descripción
0 – 2	Extremadamente cerrado
2 – 6	Muy cerrado
6 – 20	Cerrado
20 – 60	Moderado
60 – 200	Amplio
200 - 600	Muy amplio
> 600	Extremadamente amplio

Las discontinuidades en un talud pueden tener diferentes direcciones con respecto a la cara expuesta del corte. Esta variación en la posición de las diaclasas puede ocasionar que, al realizar el levantamiento de las mismas (por ejemplo, mediante un scanline), estas no sean censadas de forma precisa conforme a la realidad del macizo rocoso (Priest & Hudson, 1981). Para comprender este principio, se supondrá tres tipos de familias de juntas A, B y C (Figura, 20), que hipotéticamente tienen un especiado igual. Como se puede observar, cada conjunto de fracturas presentan diferentes posiciones en comparación con la línea de referencia para conteo de discontinuidades o "scanline". Al analizar detenidamente cada familia, se puede decir que la familia "A", debido a su posición preferencial frente al scanline, es la que tiene más posibilidad de ser cuantificada, concluyendo que esta familia de diaclasas se repite con mayor frecuencia que las otras familias presentes. La familia de juntas "B", al presentar un ángulo más agudo con respecto a la línea de levantamiento, ve disminuida su posibilidad de ser censada, por lo tanto, su valor es menor que el de la familia de fracturas "A". Por último, la familia de discontinuidades "C", al ser subparalelas al scanline, tiene la menor posibilidad de ser contada, y por lo tanto, su valor será el menor de todas las familias de juntas presentes en el talud de estudio (Rocscience, 2019).

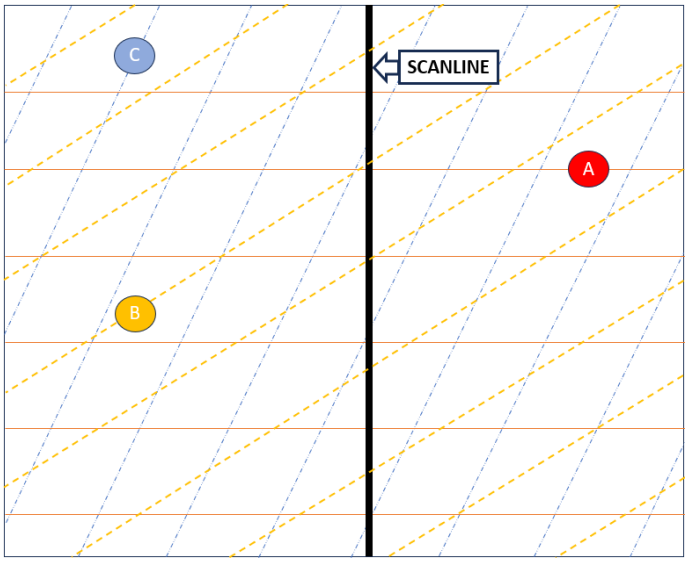


Figura 20: Levantamiento de tres familias de discontinuidades, modificado de Rocscience.

Se ha identificado que cualquier tipo de combinación de juntas ubicadas aleatoriamente, las cuales estén agrupadas y espaciadas uniformemente, conduce a una distribución exponencial negativa de la frecuencia de espaciamiento, lo que permite definir una relación entre la frecuencia media de diaclasas por metro (λ) y el (RQD) (Priest & Hudson, 1976).

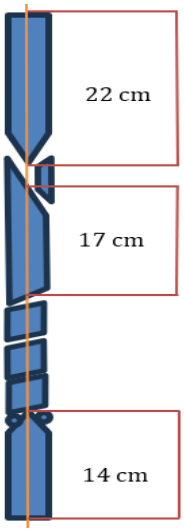
Para evitar errores debido a la sobreponderación de discontinuidades con mejor posición frente al scanline, se puede aplicar un coeficiente de ponderación de diaclasas para corregir el sesgo en la medición (Terzaghi, 1965). Este coeficiente geométrico de ponderación (W), debe ser aplicado a cada uno de los planos (no a estructuras lineales) medidos al levantar el espaciado de las familias de juntas. Se recomienda que al representar en un estereograma la densidad de polos, el especialista aplique el coeficiente a cada polo individual, obteniéndose así una representación más real de polos de una familia frente a otra.

2.3.4. RQD

El Rock Quality Designation, es un índice de calidad de roca, el cual es una modificación del porcentaje de recuperación de núcleos (Deere & Deere, 1988). El RQD se introdujo debido a la necesidad de definir la calidad del macizo rocoso, considerando que hasta la fecha en la que se presentó el índice RQD, la calidad de la roca solo se obtenía mediante la descripción geológica del macizo y el porcentaje de recuperación de núcleos de perforación (Deere & Deere, 1967). Es importante mencionar que el RQD originalmente fue desarrollado como un

método para estudiar las condiciones del macizo y los requisitos de soporte en túneles. Sin embargo, debido a su importancia y aplicabilidad, el índice ha ganado popularidad hasta el punto de ser utilizado como base de nuevas clasificaciones geomecánicas para diferentes tipos de obras de ingeniería superficiales y subterráneas (Z. T. Bieniawski, 1974; Cecil, 1975; Coon RF, 1970; Steckley et al., 1975), así como para establecer correlaciones con diferentes métodos de exploración (Coon RF, 1970; Leucci & De Giorgi, 2006; Palmstrom, 2005; Schunnesson, 1996; Sjøgren et al., 1979).

Si en el estudio realizado se ejecutan sondeos con recuperación de testigo, el RQD se define como el porcentaje de recuperación de fragmentos de roca formados por planos naturales de discontinuidad, cuya longitud del testigo de perforación sea superior a 10 cm, medida desde el centro del testigo. Para este caso, se utiliza la fórmula:



$$RQD\% = \frac{Suma\ de\ fragmentos\ superior\ a\ 10\ cm}{Longitud\ total\ de\ la\ maniobra\ de\ perforación} * 100 \quad (13)$$

$$RQD\% = \frac{22cm+17cm+14cm}{100cm} * 100$$

$$RQD\% = 53$$

En caso de no contar con testigos de perforación y considerando que el RQD tiene una relación directa con la ubicación y cantidad de juntas en un talud rocoso, se han propuesto métodos alternativos para determinar su valor, teniendo en cuenta el número de fracturas por metro lineal o por metro cúbico.

Una de estas fórmulas consiste en determinar el valor de RQD a partir de λ, el cual está relacionado con la cantidad de discontinuidades o la frecuencia media de juntas por metro lineal (medido en un scanline) (Priest & Hudson, 1976, 1981).

$$\text{RQD por metro lineal} = 100e^{-0.1\lambda\, x}\ (0.1\lambda + 1) \quad (14)$$

Donde λ = Número de fisuras / espacio

Otra ecuación es la propuesta por Palmstron, que permite calcular el valor de RQD a partir del conocido índice volumétrico de juntas o Jv, (Palmstrom, 1975; Palmström, 2001).

$$\text{RQD por metro cúbico} = 115 - (3.3)Jv \quad (15)$$

Donde Jv = Número de fisuras por metro cúbico

Los valores obtenidos mediante los métodos descritos pueden proporcionar una descripción exacta de la calidad de masa rocosa (Tabla17).

Tabla 17. Puntuación valoración RQD (Deere & Deere, 1967).

RQD %	Calidad de la masa rocosa
<25	Muy pobre
25 - 50	Pobre
50 - 75	Medianamente Buena
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

2.3.5. Abertura

Se define la abertura de un plano de debilidad como la distancia medida de forma perpendicular entre las dos caras o labios homólogos de una misma junta o falla, también se puede definir como la separación existente entre los labios de dichas discontinuidades. En el análisis de resistencia al corte de juntas, la abertura es un parámetro crucial a considerar, dado que la existencia o ausencia de contacto entre los labios de la junta puede aumentar o disminuir a cero la resistencia al corte. En la actualidad existen tablas que permiten describir las aberturas de las fracturas considerando la medida de estas en campo (Tabla 18).

Tabla 18. Abertura de juntas basado en (ISRM, 1981).

Abertura (mm)		Descripción
0	0.1	Muy cerrada
0.1	0.25	Cerrada
0.25	0.5	Parcialmente abierta
0.5	2.5	Abierta
2.5	10	Moderadamente ancha
10	100	Muy ancha
100	1000	Extremadamente ancha
➢ 1000		Cavernosa

2.3.6. Relleno

Considerando los valores y conceptos referentes a las aberturas de discontinuidades, el relleno es un concepto estrechamente ligado a la abertura que una diaclasa presenta y la facilidad que el entorno dispone para aportar material a la abertura existente. En este sentido, una junta abierta tiene mayores posibilidades de recibir y atrapar material entre sus labios que una fractura cerrada o muy cerrada, siendo, por lo regular, el espesor máximo del relleno igual a la abertura de la discontinuidad. El relleno de las diaclasas puede ser muy variado, desde relleno duro (fragmentos de roca) hasta relleno blando (arcillas o limos). El tipo de relleno (por ejemplo, la arcilla) condiciona de manera importante la resistencia al corte de las juntas, y por tal motivo, el levantamiento exacto de sus propiedades en el campo es de vital importancia para entender los resultados de laboratorio o la asignación de valores de modelación (Indraratna et al., 2010).

2.3.7. Persistencia

La persistencia de las juntas o continuidad de las discontinuidades geológicas es un parámetro de suma importancia al momento de acometer efectivamente un levantamiento geomecánico, debido a que la persistencia tiene un impacto significativo en la resistencia del macizo rocoso (Einstein et al., 1983; Shang et

al., 2018). La persistencia, en conjunto con otros parámetros propios de las diaclasas, permite determinar el tamaño relativo de los bloques que forman macizos rocosos articulados. Dependiendo de su correcta caracterización, se pueden evitar errores como la subestimación del tamaño de los bloques de roca (B. H. Kim et al., 2007). Considerando que las juntas, junto con su relleno, son los parámetros más importantes que controlan la respuesta mecánica de macizos, en la actualidad se llevan a cabo múltiples estudios en el afán de entender la influencia que tiene la persistencia de las fracturas en macizos rocosos y su resistencia al corte (Al-E'Bayat et al., 2023, 2024; Hu et al., 2023). Las tablas para evaluar este parámetro se expondrán en el apartado sobre "clasificaciones geomecánica para taludes rocosos".

2.3.8. Rugosidad

Se define a la rugosidad como las ondulaciones o irregularidades que se pueden encontrar en las superficies de la rocas y que pueden ser medidas sin el uso de equipos de aumento (Ferrer & Gonzalez Vallejo, 2007; Jorda et al., 2016). Introducido por Barton en 1973, el coeficiente de rugosidad de juntas (JRC) es un método simple y efectivo para cuantificar la rugosidad de las fracturas y su resistencia al corte, considerando el efecto escala (Barton et al., 2023). La rugosidad de las discontinuidades afecta directamente el comportamiento de las diaclasas tanto a nivel de laboratorio como a nivel de macizo rocoso, lo que la convierte en un parámetro muy importante a considerar al momento de analizar la estabilidad y seguridad de estructuras ligadas al macizo rocoso (Packulak et al., 2019). Clásicamente, para obtener una descripción aproximada de la rugosidad del macizo rocoso, se utiliza el JRC (Figuras 21 y 22), el cual se obtiene mediante observación directa o mediante el uso del peine de Barton (Gálvez Caballero, 2019; Yánez Borja & Jordá Bordehore, 2021). En la actualidad, existen muchos métodos novedosos basados en diferentes técnicas que prometen mejorar la estimación de la rugosidad de las juntas, tanto a nivel de macizo rocoso como de laboratorio (Adnan et al., 2023; García-Luna et al., 2021b, 2021a; B. Li et al., 2023; C. Wang et al., 2023; Zhang et al., 2023).

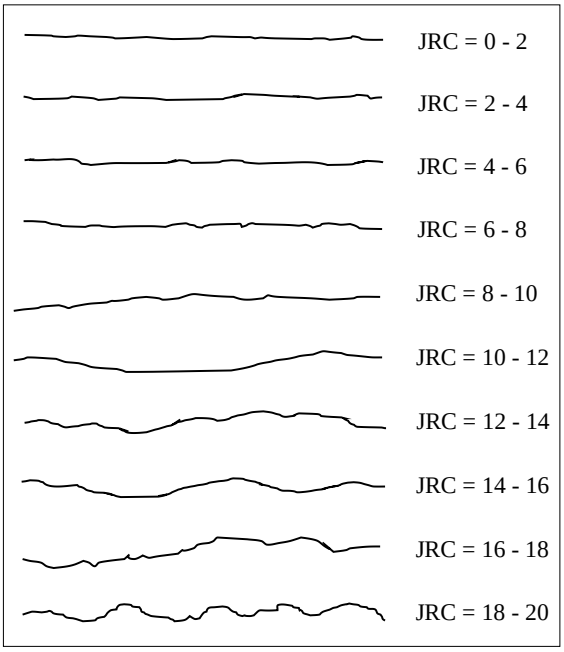


Figura 21: Perfiles para determinar JRC, para un rango o escala de 10 cm (Barton & Choubey, 1977).

Es importante recordar que al aumentar la longitud de la junta el valor de JRC disminuye lo que implica una reducción de la resistencia y la rigidez máxima al corte, así como el ángulo máximo de dilatancia (Barton & Choubey, 1977).

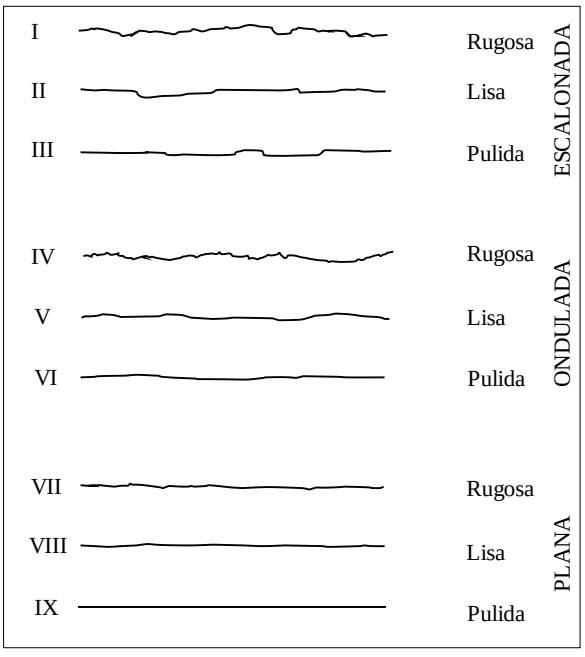


Figura 22: Perfil de rugosidad, rango 1 a 10 m (ISRM 1981).

2.3.9. Ensayo tilt test

El ensayo del tilt test es una prueba fácil, observable, repetible y económica para medir el coeficiente de rugosidad y el ángulo de fricción básico de una junta (Barton & Choubey, 1977; Hencher, 1976; Jordá-Bordehore et al., 2021). Este ensayo está actualmente estandarizado por la ISRM (Alejano et al., 2018) y consiste en colocar bloques o testigos de roca sobre una plataforma inclinante en la que se fija el bloque inferior o dos testigos a la base y se deja libre el bloque de roca muestreado o el testigo de perforación en la parte superior, los cuales se deslizarár al superar su umbral de fricción (Figura 23). Como intuimos, la física ligada a este procedimiento es básica y consiste en registrar el aumento del ángulo de inclinación de la plataforma hasta que el bloque o testigo superior deslice; momento en el cual se registra la lectura final del ensayo, asumiendo que el ángulo es medido en un momento justo antes del deslizamiento, siendo este valor correspondiente al ángulo de fricción del material ensayado (Ruiz & Li, 2014). Si bien no existe evidencia contundente de que la velocidad angular y el tipo de equipo (manual o automático) ejerzan una influencia significativa sobre los resultados del ensayo, se recomienda que el mismo sea efectuado a una velocidad de inclinación de aproximadamente de 10°/min (Alejano et al., 2017; Pérez-Rey et al., 2016). En este tipo de pruebas si se usan testigos de peroración es de gran importancia la preparación de la muestra (acabado de la superficie), así como la eliminación de posibles restos de roca que queden en la superficie de deslizamiento, lo cual puede conducir a irregularidades en los valores de medida (Coulson, 1972; Hencher, 1976, 1977, 2012; Krahn & Morgenstern, 1979).

En caso de que no se disponga de muestras preparadas o del equipo de laboratorio idóneo para el ensayo, se recurre a ensayos de campo en los cuales se puede ejecutar el ensayo sin la necesidad de preparación previa de muestras (Jordá-Bordehore et al., 2021). Para realizar esta prueba, se debe en primer lugar evaluar la rugosidad de las juntas a ser ensayadas, la componente normal relacionada al peso del bloque superior y medir el ángulo de inclinación al momento del deslizamiento. Aplicando este procedimiento y mediante el uso de la ecuación propuesta por Barton-Bandis se puede calcular la fricción básica (ϕb) (Barton & Bandis, 1982, 1990).

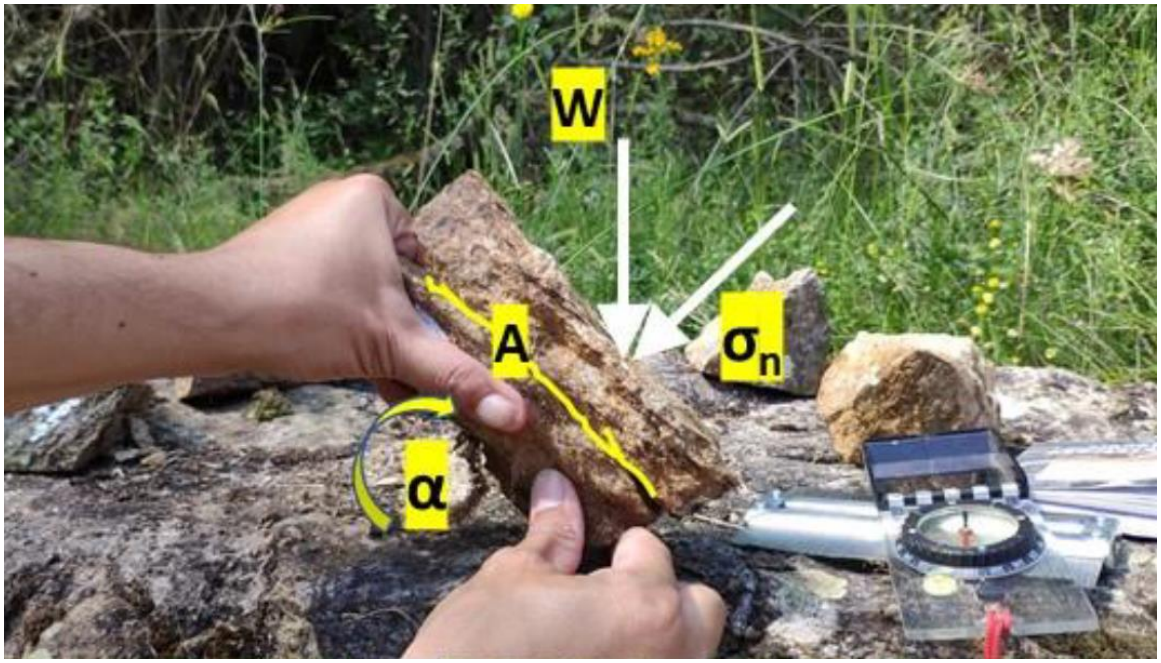


Figura 23: Procedimiento de campo valor de fricción básico (ϕb), tomado de (Jordá-Bordehore et al., 2021).

2.4. Fotogrametría

La fotogrametría, termino de origen griego que puede traducirse como "la métrica de lo escrito con luz", se remonta a los trabajos de artistas como Durero y Leonardo Da Vinci quienes exploraron los principios de esta técnica. Posteriormente Meydenbauer acuña el término y formaliza su práctica en el siglo XIX cuando inicia su trabajo de levantamiento de perspectivas fotográficas de arquitecturas (Nunez Andres et al., 2015). La ISRM en 1978 ya consideró el empleo de la fotogrametría para la determinación de coordenadas de puntos sobre superficies expuestas (Barton, 1978). En la actualidad los equipos y técnicas usados en fotogrametría ofrecen resultados con mayor velocidad, precisión y resolución (Jaboyedoff et al., 2012).

En esencia la fotogrametría se puede entender como la disciplina que ejecuta medidas indirectas de objetos tridimensionales utilizando perspectivas fotográficas. Siguiendo el procedimiento general, se puede reconstruir la forma que tiene cada haz fotográfico y su posición espacial con respecto a un sistema de referencia externo. Con este proceso, se pueden proporcionar las coordenadas

tridimensionales de cada punto levantado sobre el objeto medido a partir de un fotograma (mínimo dos imágenes perspectivas, consecutivas y traslapadas) (Lopez Viejo et al., 2011).

El objetivo principal de la fotogrametría consiste en determinar cuantitativamente las magnitudes geométricas de objetos tridimensionales medidos mediante fotointerpretación, que también puede ser conocida como teledetección cuando desde plataformas a gran altura se trabaja con sensores multibanda (Arozarena Villar & Otero Pastor, 2016; Nunez Andres et al., 2015).

La fotogrametría para el caso de macizos rocosos, según la distancia del objeto analizado, puede ser dividida en fotogrametría digital terrestre de corto alcance (Sturzenegger & Stead, 2009) y fotogrametría aérea o de largo alcance (Kääb & Vollmer, 2000). La presente investigación se centrará en la terrestre de corto alcance.

En la evaluación de taludes rocosos, es común emplear procedimientos previamente probados (Figura 24). El proceso facilita la recopilación de datos estructurales para análisis geomecánico y evaluación de la estabilidad de taludes rocosos (Borja-Bernal & Jordá-Bordehore, 2022).

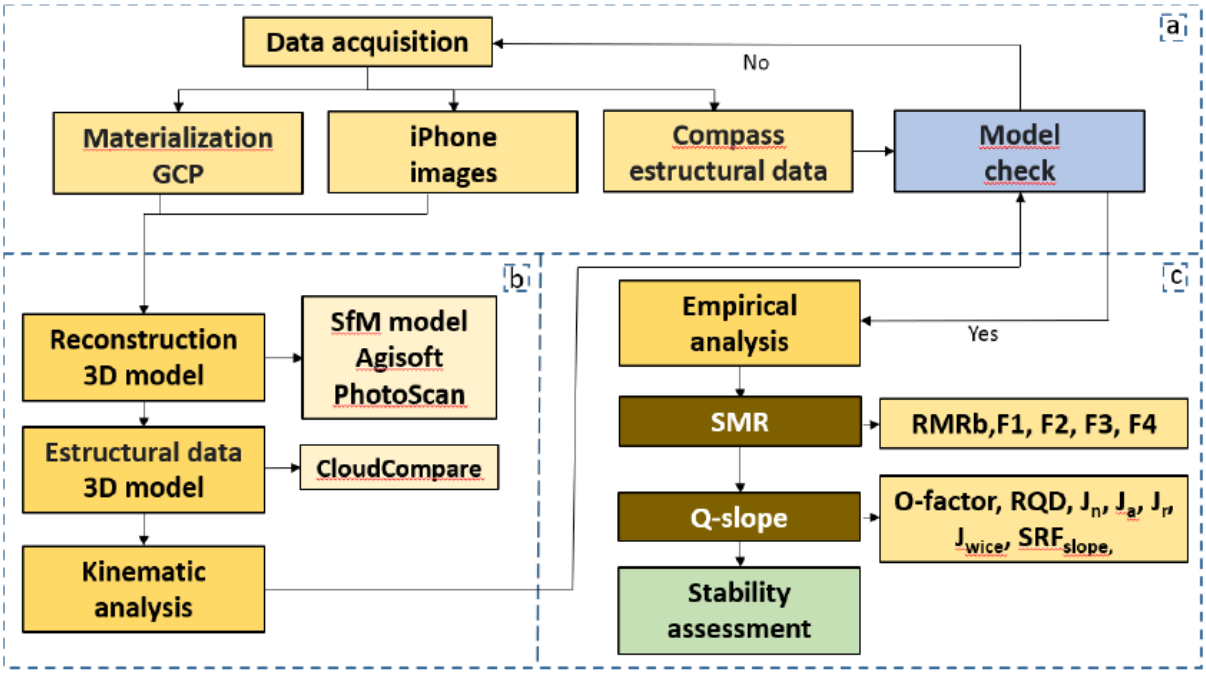
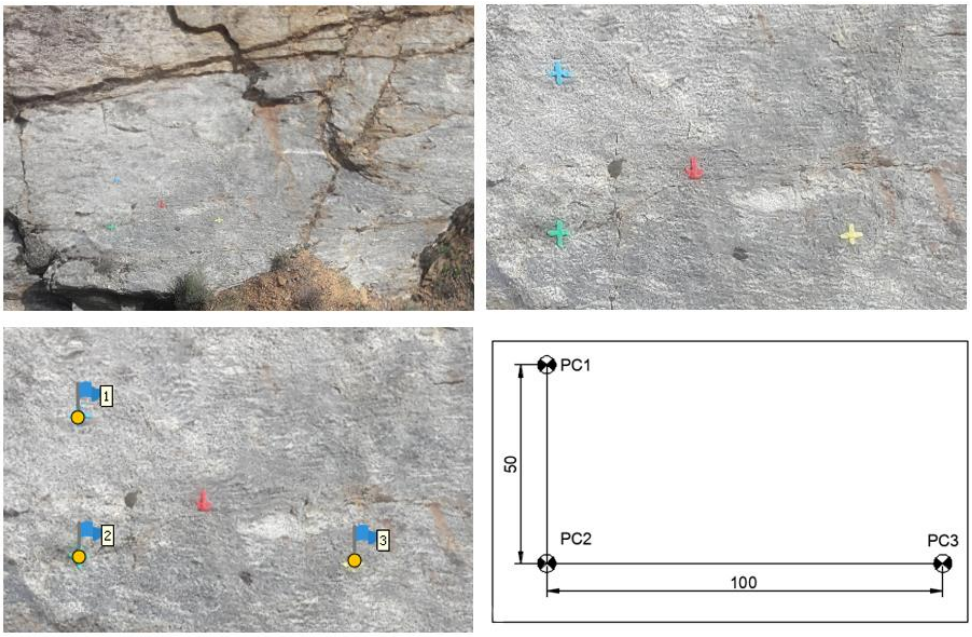


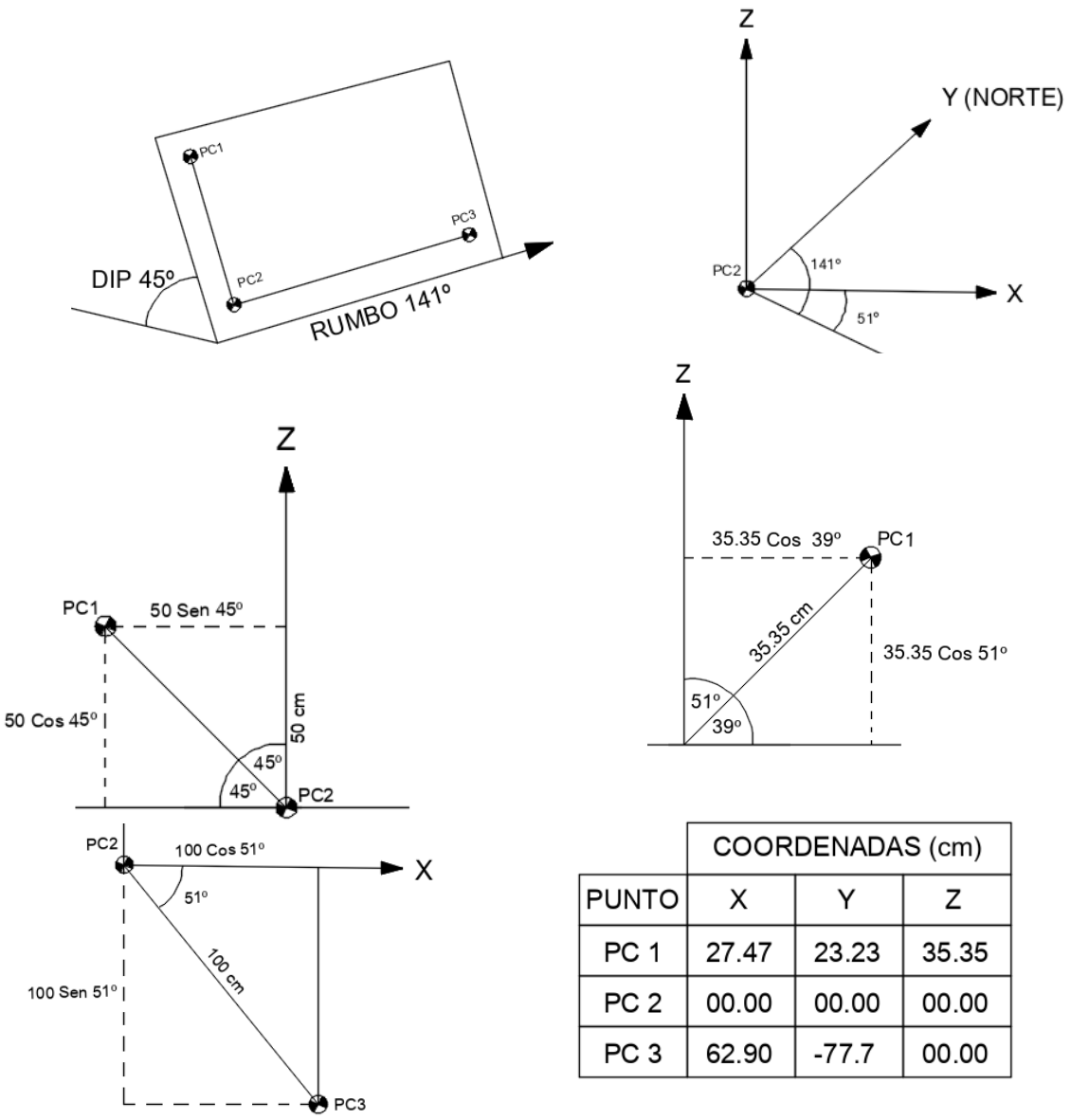
Figura 24: Proceso metodológico para clasificación de taludes rocosos usando fotogrametría.

En los siguientes apartados se tratará en detalle cada una de las etapas del proceso de evaluación de taludes rocosos mediante modelos 3D.

2.4.1. Structure from Motion

Structure from Motion (SfM), es conocida como una técnica fotogramétrica de bajo costo y facilidad de uso que permite la reconstrucción de modelos tridimensionales de alta resolución a partir de fotografías bidimensionales. Esta técnica conjuga el posicionamiento de cámaras y la ubicación tridimensional de puntos coincidentes en las escenas. La comparación de la técnica SfM con modelos de escaneo laser terrestre han demostrado que esta técnica puede lograr precisiones verticales a escala decimétrica sin importar la complejidad topográfica o la coberturas terrestres (Westoby et al., 2012). El proceso requiere que en las fotografías se integre información geométrica lo que se consigue con la inclusión de GCP (Ground Control Points) o puntos de control en el talud (Figura 25). A los GCP se les asignan coordenadas en un sistema de referencia global o local a un mismo píxel en diferentes fotografías. Con este procedimiento la nube de puntos tendrá menor error y estará correctamente escalada y orientada según el sistema de referencia utilizado. Si bien el escalado, rotación y traslación de la nube de puntos se puede resolver fácilmente esta puede verse afectada por el efecto bóveda o domo el cual introduce distorsiones y errores en el conjunto de puntos, lo cual es evitado con el empleo de los puntos de control (James & Robson, 2014; Riquelme, 2015).





	COORDENADAS (cm)		
PUNTO	X	Y	Z
PC 1	27.47	23.23	35.35
PC 2	00.00	00.00	00.00
PC 3	62.90	-77.7	00.00

Figura 25: Diagrama de ubicación y ejemplo de cálculo coordenadas para puntos de control o GCP.

2.4.2. Levantamiento de campo para aplicar la técnica SfM

El trabajo de campo para aplicar la técnica SfM se divide en cinco etapas fundamentales, las cuales se describen a continuación:

1.- Reconocimiento del sitio: Durante esta etapa, el investigador debe realizar un recorrido exhaustivo del talud de estudio. Se debe analizar las caras expuestas del talud, su dirección y ángulo de inclinación con respecto a las diferentes familias de juntas existente, y delimitar la zona de inestabilidad tanto de forma horizontal como vertical.

2.- Ubicación y materialización de puntos de control: En esta etapa del trabajo, se identifican planos representativos del talud expuesto. Sobre estas caras se ubican puntos de control (GCP), los cuales deben ser fácilmente identificables tanto sobre el terreno como en las fotografías que serán tomadas posteriormente. Los puntos materializados pueden ser de diferentes tipos y formas, tales como, clavos, placas, pegatinas, pintura, etc. Una vez materializados los puntos de control, se miden las distancias existentes entre las marcas, así como el rumbo de la alineación de puntos horizontales (PC1 y PC2) e inclinación entre marcas verticales (PC2 y PC3) (Figura 26). Esta información permite calcular las coordenadas que orientan la nube densa de puntos generada en el procesamiento de fotografías digitales.

Figura 26: Replateo de puntos de control en campo.

3.- Ubicación de estación fotográfica: Para iniciar el registro fotográfico, es posible usar diferentes equipos o dispositivos, desde cámaras simples hasta teléfonos inteligentes o drones de diferentes marcas y presupuestos. Se deben seleccionar cuidadosamente las ubicaciones para colocar los dispositivos de registro (estaciones para registro fotográfico), considerando aspectos como distancia, cobertura y ángulos de visión de los planos del talud (Figura 27). Con estos cuidados, se podrá garantizar la captura de todas las perspectivas y características de interés relevantes del talud rocoso para el posterior procesamiento de gabinete.

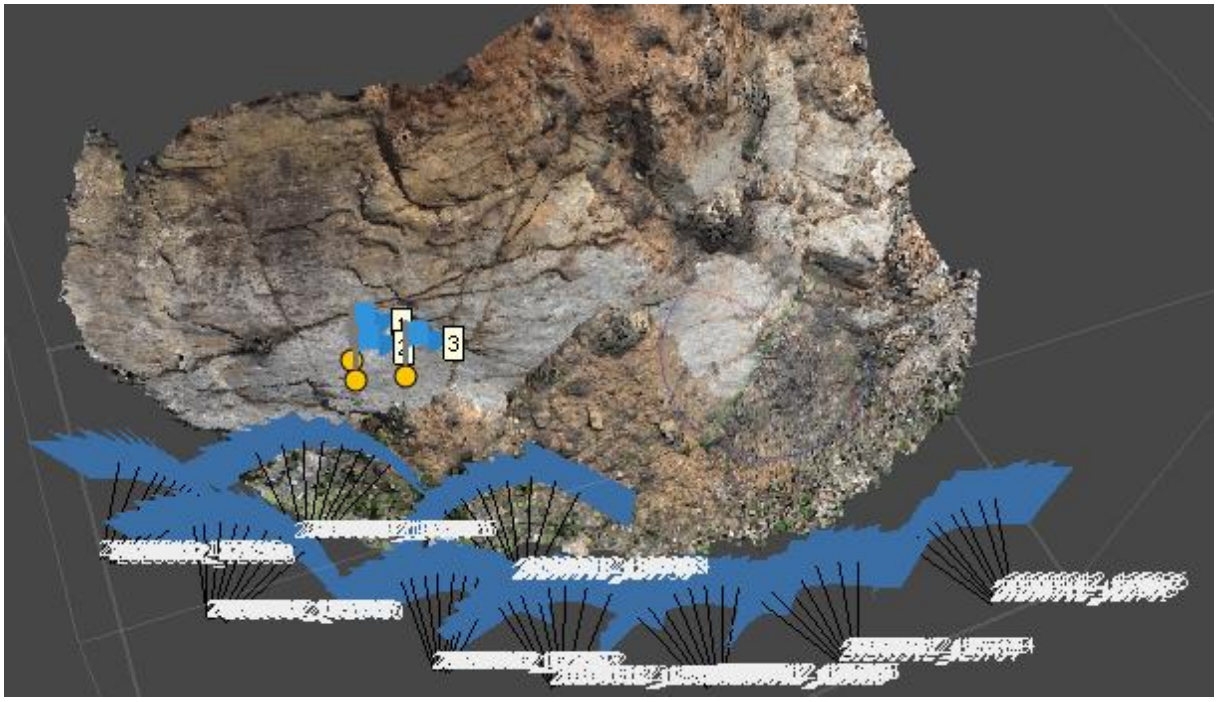


Figura 27: Puntos de control y ubicación de estaciones para registro fotográfico.

4.- Captura de imágenes: En este paso, se realiza el registro o captura de imágenes desde cada estación de fotografía establecida en el paso previo. Las imágenes deben cubrir todas las áreas de interés desde múltiples ángulos y, de ser posible, alturas, garantizando así una cobertura completa y una superposición adecuada de imágenes con el objetivo de tener puntos redundantes del objeto analizado en cada fotografía y su posterior enlazamiento. Se recomienda aprovechar la luz difusa del día para evitar sombras duras y obtener una iluminación uniforme en las imágenes. Además, se sugiere configurar el balance de blancos de forma manual para adaptarlo a la temperatura de color específica de la luz solar durante el levantamiento fotográfico. Se puede considerar la aplicación de un ISO bajo para obtener imágenes más nítidas y de mejor calidad en condiciones de luz natural. Otra recomendación puede ser el uso de formato RAW, si el instrumento lo permite, lo cual facilita ajustar la exposición, el balance de blancos y otros parámetros sin disminuir la calidad de la fotografía o el uso de filtros polarizadores que ayuden a disminuir los reflejos no deseados y mejorar el contraste. Por último, se recomienda siempre monitorear las condiciones climáticas antes de la salida de campo para planificar

adecuadamente el uso de equipos y accesorios, así como el mejor momento para acometer el trabajo.

5.- Control de calidad: este paso final es fundamental en el proceso y consiste en realizar una revisión de la calidad de las imágenes capturadas para garantizar que cumplan los requisitos o estándares exigidos para el procesamiento de gabinete. Se recomienda verificar la nitidez, exposición, superposición y ausencia de distorsiones que puedan afectar la generación de la nube densa de puntos 3D. En caso de tener fotografías que no pasen el control de calidad, se recomienda eliminarlas para el procesamiento de gabinete.

2.4.3. Parametrización de macizos rocosos en modelos 3D

La identificación y extracción de parámetros geomecánicos comúnmente se ha realizado mediante métodos clásicos (Rajendra et al., 2014). Debido a múltiples problemas de acceso, seguridad y economía, en los últimos años, este proceso se ha llevado a cabo a través de programas especializados de libre acceso (Girardeau-Montaut, 2016; Riquelme et al., 2016). Hasta 2015, el procesamiento de nubes de puntos 3D para mecánica de rocas se ejecutaba mediante herramientas informáticas que mayormente eran comerciales o no estaban disponibles de forma gratuita (Riquelme, 2015). Luego de este período, se liberaron dos programas de uso extendido que cuentan con complementos que permiten obtener una lista de datos estructurales (Figura 28) relacionados con Dip (buzamiento) y Dip-Dir (dirección de buzamiento), que posteriormente se visualizan en estereogramas interactivos trabajados mediante análisis cinemático (Dewez et al., 2016; Tung et al., 2018). En este contexto, las clasificaciones geomecánicas se procesan utilizando parámetros que pueden derivarse de nubes de puntos 3D. Es decir, la identificación de familias de discontinuidades es ampliamente aceptada por la comunidad científica, siempre y cuando la calidad de la nube sea suficiente para acometer con garantías el proceso de extracción de información.

La primera etapa en la obtención de información sobre las diaclasas presentes en el macizo rocoso implica determinar el vector normal de la superficie de cada punto y detectar familias de juntas planas. El siguiente paso es determinar espacialmente donde se encuentran estas fracturas de roca. Ejecutadas estas dos

etapas, se procede a evaluar la rugosidad, espaciado y persistencia de las discontinuidades utilizando la nube de puntos generada. Las dos técnicas comunes para generar nubes de puntos 3D son el escáner láser y la fotogrametría digital, dentro de esta última encontramos la técnica SfM, que ha ganado gran popularidad, especialmente en las aplicaciones desarrolladas para cámaras digitales de uso común (Riquelme, 2015).

Durante el desarrollo de la investigación se utilizó software específico, detallado a continuación.

- Agisoft Photoscan: software para procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y generación de nubes de puntos densa y datos espaciales en 3D (Agisoft, 2020).
- CloudCompare: Desarrollado por Daniel Giraud (Girardeau-Montaut, 2016) bajo el proyecto open source. Es un software de uso gratuito, dispone de gran cantidad de herramientas para trabajo con nubes y modelos 3D (Riquelme, 2015).
- Discontinuity Set Extractor (DSE): Desarrollado por Adrián Riquelme (Riquelme, A., 2015) creado en la Universidad de Alicante como parte de la tesis doctoral del autor. Es una herramienta de código abierto que permite detectar y extraer familias de discontinuidades a partir de puntos tridimensionales. Compatible con MATLAB en sistemas operativos Windows, MAC y Linux.

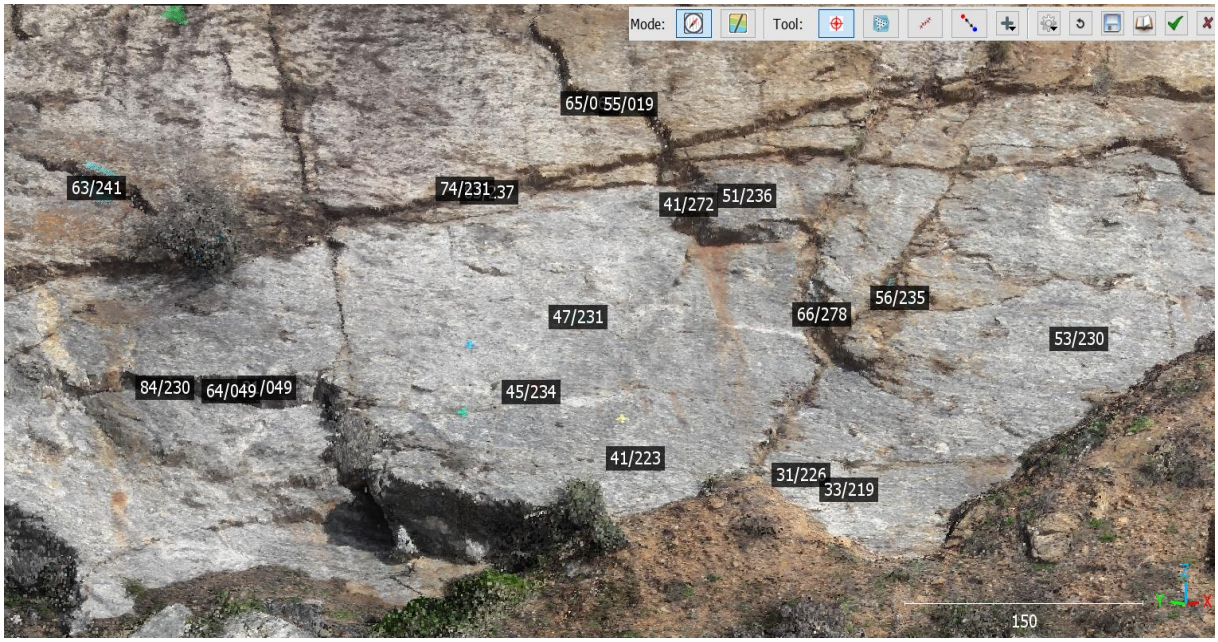


Figura 28: Extracción de parámetros estructurales de nube de puntos 3D.

Al analizar taludes rocosos, la técnica SfM sigue siendo versátil y económica para obtener nubes de puntos 3D. Esto facilita la adquisición de datos estructurales mediante el uso de software especializado, como por ejemplo el Cloud Compare o DSE (Discontinuity Set Extractor), para el posterior procesamiento de datos mediante métodos empíricos como el SMR o Q-slope (Delgado-Reivan et al., 2023).

En los últimos años, se han presentado algoritmos de código abierto que permiten progresar en el conocimiento existente sobre la eficacia, complejidad, precisión y robustez del método (Schonberger & Frahm, 2016). En la búsqueda de mejorar la recolección de datos y procesamiento semiautomático, se están realizando significativos aportes relacionados con la identificación inteligente de fracturas y extracción simultánea de datos (Pan et al., 2024). También se han propuesto sistemas de bajo costo y manejo mediante el uso de teléfonos inteligentes para monitoreo y detección de peligros en taludes rocosos (Fang et al., 2024).

2.4.4. Análisis cinemático

Los mecanismos de rotura propuestos por Hoek y Bray en 1974 pueden ser fácilmente representados mediante proyección estereográfica (Figura 29). Si analizamos las clases de roturas desde el punto de vista mecánico, se puede establecer que existen cuatro clases de roturas en taludes de roca: i) Roturas por deslizamiento sobre uno o varios planos que afloran en la cara expuesta del talud,

ii) Roturas por movimiento relativo de bloques sobre planos de debilidad que no afloran en la cara expuesta del talud, iii) Rotura que se produce por dos mecanismos, el primero por rotura de la roca y el segundo por deslizamiento sobre planos de discontinuidad; dentro de esta clase se pueden encontrar distintas variaciones y iv) Rotura por superficies circulares (Hoek et al., 1973; Hoek, E., Bray, 1974; Ramírez & Alejano, 2008).

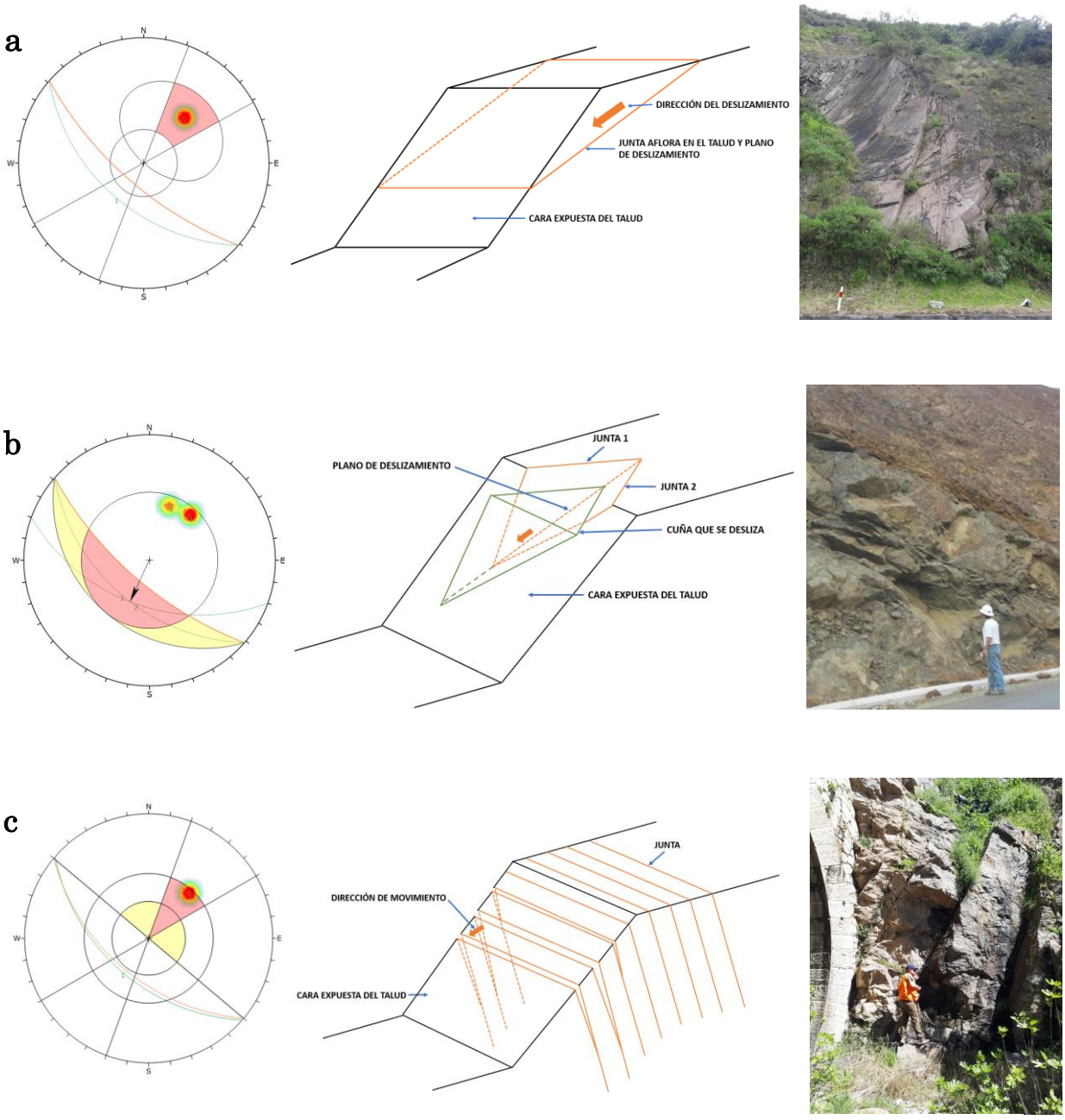


Figura 29: Modos de rotura en taludes rocosos: a) rotura plana, b) rotura en cuña y c) rotura en toppling.

2.5. Clasificaciones geomecánicas para taludes rocosos

En la actualidad, los sistemas de clasificación geomecánicos son conocidos por su utilidad en etapas de diseño o prediseño de proyectos civiles y mineros. Estos sistemas son ampliamente reconocidos y aplicados por múltiples técnicos e investigadores de todo el mundo para caracterizar las propiedades de los macizos rocosos y evaluar su estabilidad (Riquelme et al., 2016).

En el presente apartado se abordarán las clasificaciones geomecánicas para taludes más reconocidas a nivel mundial, por su uso extendido en el ámbito de la ingeniería e investigación científica, así como por la cantidad de publicaciones científicas indexadas.

2.5.1. Rock Mass Rating (RMR)

La clasificación RMR fue desarrollada en Sudáfrica y publicada en 1973 por el reconocido investigador Bieniawski, con revisiones en 1976, 1979, 1984 y 1989 (M. Romana et al., 2003). Esta clasificación permite relacionar los diferentes índices de calidad del macizo rocoso con parámetros de diseño aplicables en obras de construcción. El RMR tiene en cuenta seis parámetros fundamentales a ser considerados al momento del levantamiento de información en campo (Z. T. Bieniawski, 1989; Jordá-Bordehore et al., 2016; Laubscher, 1990; Tomás, Valdes-Abellan, et al., 2012), (Tablas 19 - 22).

1. Grado de fracturación del macizo rocoso medido en términos del valor RQD.
2. Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa.
3. Espaciados de las discontinuidades.
4. Condiciones de las diaclasas.
5. Efecto del agua (Condiciones hidráulicas del frente del talud).
6. Orientación de las juntas respecto a la excavación del talud o túnel.

Este último parámetro es muy debatido en el mundo de la práctica debido a que el valor relacionado a la orientación de las fracturas con respecto a la cara expuesta del talud es un factor que resta puntos a la calificación, con resultados en ocasiones fuera de un contexto real (Tabla 20). En este sentido, se aconseja,

para estabilidad de taludes rocosos, utilizar un criterio técnico lo suficientemente maduro para definir el uso o no de este parámetro en el cálculo del RMR básico para cada caso en particular. Como se verá más adelante el RMR corregido para taludes prácticamente no se usa, empleándose en su lugar el SMR.

La fórmula aplicable para cálculo de valor RMR es:

$$RMR\ ajustado = RMR\ básico + F \quad (16)$$

Tabla 19. Puntuación valoración RMR básico, (Z. T. Bieniawski, 1989).

1	Resistencia de la roca sana	Ensayo de carga puntual (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	En valores bajos de ensayos a compresión uniaxial	
		Compresión simple (Mpa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5 < 1
	Valoración		*15*	*12*	*7*	*4*	*2*	*1 0*
2	RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25	
	Valoración		*20*	*17*	*13*	*6*	*3*	
3	Separación entre diaclasas (m)		> 2	0,6 - 2	0,2 – 0,6	0,06 – 0,2	< 6 c m	
	Valoración		*20*	*15*	*10*	*8*	*5*	
4	Estado de las diaclasas		Muy rugosas. Discontinuidades sin separaciones. Bordes sanos y duros.	Ligeramente rugosas. Abertura < 1mm. Bordes duros	Ligeramente rugosas. Abertura < 1mm. Bordes blandos	Espejos de falla o con relleno < 5mm o abiertas 1-5 mm. Diaclasas continuas	Relleno blando > 5mm o abertura de diaclasas continuas > 5mm.	
	Valoración		*30*	*25*	*20*	*10*	*0*	
5	Agua freática	Caudal por 10m de túnel (l/min)	N u l o	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
		Relación presión de agua Tensión mayor	0	0,0 - 0,1	0,2 - 0,5	0,2 – 0,5	> 0,5	
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo	
	Valoración		*15*	*10*	*7*	*4*	*0*	

Tabla 20. Puntuación para corrección según orientación de diaclasas, (Z. T. Bieniawski, 1989).

Valoración (factor F)	Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Túneles	0	-2	-5	-10	-12
Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 21. Valoración y clasificación final para RMR, (Z. T. Bieniawski, 1989)

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Valoración	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20

La incidencia final de la evaluación de los parámetros antes mencionados se expresa mediante un índice de calidad conocido como RMR, el cual se obtiene por la suma de valores parciales de calificación. El índice de calidad RMR puede variar de 0 (pésima calidad) a 100 (óptima calidad) (Tabla 22).

Tabla 22. Descripción cualitativa y cuantitativa de macizos rocosos en relación al RMR, modificado de (Ramírez & Alejano, 2008).

Clase	I	II	III	IV	V
CALIDAD	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
VALOR RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
COHESIÓN (Kg/cm2)	> 4	3 - 4	2 - 3	1 - 2	< 1
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA	> 45º	35º - 45˚	25º - 35˚	15º - 25˚	< 15º

Con el valor calculado de RMR se puede realizar una evaluación cualitativa y cuantitativa del talud analizado. En este contexto, con el valor calculado para RMR se pueden obtener parámetros como cohesión y ángulo de rozamiento interno, lo que permite caracterizar de forma indirecta la calidad del macizo rocoso (Z. Bieniawski, 1979; Z. T. Bieniawski, 1989, 1993; Carrión Mero et al., 2019).

2.5.2. SMR

Este sistema de clasificación fue desarrollado como una alternativa viable para evaluar el riesgo de inestabilidad de taludes rocosos, el cual hasta ese momento se analizaba con la aplicación del Rock Mass Rating (RMR) para taludes de Bieniawski (Romana Ruiz et al., 2001).

El Slope Mass Rating SMR introduce parámetros que analizan el comportamiento de las discontinuidades frente a la cara expuesta del talud, así como también analiza indirectamente los modos de falla y métodos constructivos de excavación (Tomás, Cuenca, et al., 2012). En este enfoque, la estimación de la calidad del macizo rocoso se lleva a cabo tomando de base el índice RMR, el cual puede determinar diferentes clases de inestabilidad y riesgo asociado (M. Romana, 1988).

El (SMR), desde su aparición en 1985, ha sido probado en un gran número de taludes rocosos con diferentes grados de estabilidad. Destacandose que en algunos casos estos taludes solo requerían apoyo local, mientras que en otros casos más complicados, se requirió de un proceso de Re excavación total. Actualmente el sistema SMR es una técnica madura, versátil y muy aplicable para la evaluación de riesgos en taludes rocosos (M. Romana, 1991).

El método propuesto por Romana es considerado un método preliminar efectivo para la evaluación de taludes rocosos, que, aunque no reemplaza a los métodos de auscultación más detallados, sí proporciona algunas facilidades interesantes que pueden ser usadas tanto en campo como en oficina (M. R. Romana, 1993).

Una de las ventajas más relevantes del método es la definición cuantitativa de los factores de corrección. Esta singularidad del método ha permitido que, hasta la actualidad, el SMR se haya extendido en varios países de los cinco continentes y se publiquen múltiples comparaciones y modificaciones que han permitido mejorar la valoración final de la calidad del macizo rocoso. La extensa discusión

del método ha permitido su uso en diferentes ambientes, configuraciones y aplicaciones mediante diversos programas computacionales y reglamentos técnicos (M. Romana et al., 2015).

Las fórmulas aplicables para este método son:

$$SMR = RMR_b + (F_1 \; X \; F_2 \; X \; F_3) + F_4 \qquad (17)$$

El factor F1 es un parámetro que depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades presentes en el talud de corte, conocido como α_j , y el rumbo del corte representado como α_s (Tabla 23). El autor del método propuso para el cálculo del factor F1 la siguiente función continua.

$$F_1 = (1 - sen|A|)^2 \qquad (18)$$

Donde A = diferencia entre rumbos (juntas y talud)

Los valores asignados para este subparámetros están entre 0,15 (ángulo entre rumbos mayor a 30°) y 1,0 (cuando existe paralelismo entre rumbos)

F2, este sub parámetro, está relacionado con el buzamiento de la junta, conocido como (B), y específicamente ßj para roturas tipo planar. El valor de este subparámetro tiene los mismos valores que para F1. Se puede decir que este subparámetro analiza cómo la junta resiste al esfuerzo cortante al cual está sometida en un momento dado. Al igual que para el subparámetro descrito anteriormente, Romana propone una función continua que puede ser usada en caso de ser necesario:

$$F_2 = \; tan^2 \, (B) \qquad (19)$$

Donde B = es el buzamiento de la junta.

Los valores asignados para este subparámetros están entre 0,15 (para discontinuidades con buzamiento menor a 20°) y 1,0 (para juntas con buzamiento mayor a 45° o roturas por vuelco).

F3, es un parámetro tabulado que depende de la relación entre el buzamiento del talud, conocido como ßs, y el buzamiento de las fracturas, conocido como ßj. Al analizar este subparámetro en profundidad, se observa que mantiene los valores que fueron propuestos inicialmente por Bieniawski (dese 0 hasta -60 puntos), dependiendo si las juntas, en caso de rotura plana, afloran con mayor o menor intesidad en la cara expuesta del talud (M. R. Romana, 1993). Para los casos de rotura por vuelco, el calculista debe tener el criterio suficiente para aplicar un valor representativo de F3, dado que este tipo de rotura puede ser súbita en algunos casos y completamente estable en otros (Tomás et al., 2017).

Tabla 23. Factor de ajuste F3 para las juntas (M. Romana, 1985).

Factor (F1, F2, F3) ajuste de juntas		**Muy Favorable**	**Favorable**	**Normal**	**Desfavorable**	**Muy desfavorable**
P	[DDJ- DDS] =	> 30^o	30^o - 20^o	20^o - 10^o	10^o - 5^o	< 5^o
T	[DDJ-DDS-180^o]=	> 30^o	30^o - 20^o	20^o - 10^o	10^o - 5^o	< 5^o
	P/T VALOR F1	*0 . 15*	*0 , 40*	*0 , 70*	*0 , 85*	*1 , 00*
P/T	[Dj] =	< 20^o	20^o - 30^o	30^o - 35^o	35^o - 45^o	> 45^o
	T - VALOR F2	*0 , 15*	*0 , 40*	*0 , 70*	*0 , 85*	*1 , 00*
	P - VALOR F2	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*
P	[Dj–Ds]	> 10^o	10^o - 0^o	0^o	0^o - (- 10^o)	< - 10^o
T	[Dj+Ds]	< 110^o	110^o - 120^o	> 120^o	----	-----
	P/T - VALOR F3	*0*	*- 6*	*- 25*	*- 50*	*- 60*

DDJ= Dip direction de la junta, DDS= Dip direction del talud, DJ= Dip junta, DS= Dip talud.

El F4 es un factor de ajuste definido por el método de excavación empelado para generar el corte del talud o por la presencia natural del mismo, (Tabla 24).

Tabla 24. Factor de ajuste F4 para las juntas (Romana, 1985).

Factor ajuste de juntas	**Muy Favorable**	**Favorable**	**Normal**	**Desfavorable**	**Muy desfavorable**
Método de excavación	Talud natural	Precorte	Voladura suave	Voladura o mecánico	Voladura deficiente
P/T – valor F3	*+15*	*+10*	*+8*	*0*	*-8*

Romana propone una clasificación de estabilidad y tipos de rotura según el valor calculado para SMR (Tablas 25 y 26).

Tabla 25. Clases de estabilidad de macizos rocosos según Romana.

SMR	**0 - 20**	**21 - 40**	**41 - 60**	**61 - 80**	**81 - 100**
clase	**V**	**IV**	**III**	**II**	**I**
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	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Tabla 26. Valores para SMR según tipo de rotura, (Romana Ruiz et al., 2001).

Tipo de rotura	Rangos de smr	Frecuencia
Plana	SMR > 60	Ninguna
	60 > SMR < 40	Importantes
	40 > SMR < 15	Muy grandes
Cuña	SMR > 75	Muy pocas
	75 > SMR < 49	Algunas
	55 > SMR < 40	Muchas
Vuelco	SMR > 65	Ninguna
	65 > SMR < 50	Menores
	40 > SMR < 30	Importantes
Completas	SMR > 30	Ninguna
	30 > SMR < 10	Posible

El método SMR propone medidas que pueden implementarse en obra, las cuales están asociadas al valor específico del SMR, el tipo de rotura y el tamaño del bloque (Tabla 27) (Jorda, 2008; M. Romana, 1985, 1991; M. Romana et al., 2015).

Tabla 27. Recomendaciones constructivas según el SMR de Romana.

Valor SMR	Método de soporte	Tipo de rotura	Tamaño bloque
40 > SMR > 10	Re-excavación, drenaje, concreto y refuerzo	Tipo suelo	Posible
40 > SMR > 15		Plana	Muy grandes
40 > SMR > 30	Drenaje, concreto y refuerzo	Vuelco	Grandes
55 > SMR > 40	Concreto, refuerzo y protección	Cuña	Muchos
60 > SMR > 40	Concreto, refuerzo y protección	Plana	Importantes
SMR > 60	Refuerzo, protección o sin soporte	Plana	Ninguno
65 > SMR > 50	Concreto, refuerzo y protección	Vuelco	Menores
SMR > 65	Refuerzo, protección o sin soporte	Vuelco	Ninguno
75 > SMR > 49	Refuerzo, protección o sin soporte	Cuña	Algunos
SMR > 75	Sin soporte	Cuña	Muy pocos

2.5.3. Q-slope

El Q-slope (Barton & Bar, 2015), es una modificación del índice Q para taludes (Bar & Barton, 2018b). Sirve para caracterizar los macizos rocosos a medida que las obras de construcción se ejecutan, permitiendo el perfilado de bancos estables y, en ocasiones, libres de mantenimiento (Bar et al., 2016), lo cual es una considerable ventaja frente a método más numéricos que requieren trabajo previo de gabinete.

La primera publicación indexada del Q-slope en 2015 reporta que la metodología ha sido aplicada en Panamá, Australia, Laos, y República Dominicana (Barton & Bar, 2015). Desde entonces, se ha extendido a otros países como Papua Nueva Guinea, Turquía, Serbia, Eslovenia, y España entre otros (Bar & Barton, 2017).

En el presente estudio, se realizó una segunda revisión de literatura para establecer la dispersión, el interés científico y la aplicabilidad de la metodología Q-slope. La revisión abarcó las bases de datos WOS y SCOPUS, considerando para el análisis artículos científicos, actas de congresos, tesis de posgrado y fuentes no revisadas por pares, publicados hasta enero de 2022. Los resultados obtenidos demuestran la aplicación del método en Australia, Noruega, India, Irán, Países Bajos, Turquía, China, Estados Unidos, Italia, Argelia, Republica de Macedonia, Brasil, Hungría, y Malawi, destacandose especialmente su amplia adopción en el continente Américano (Fig. 1).

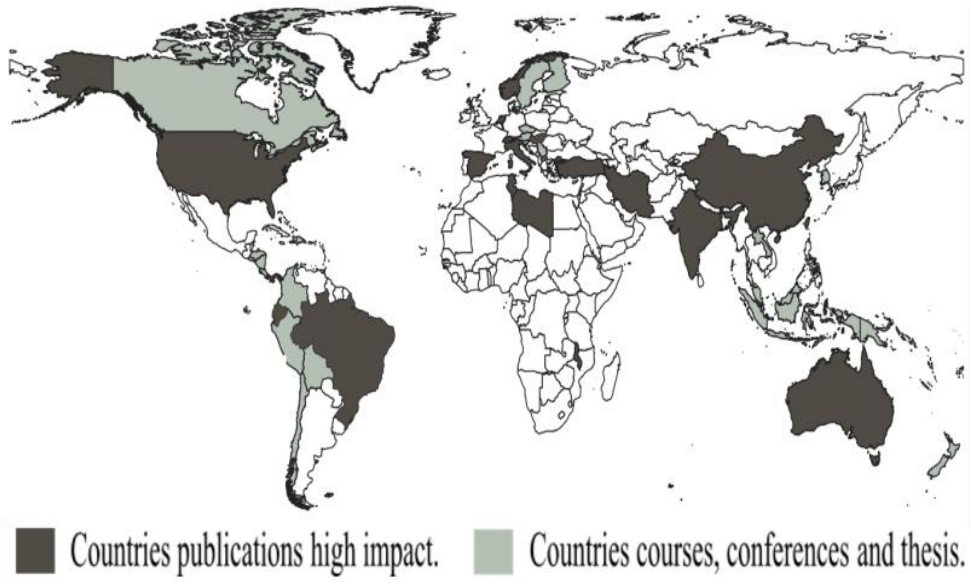


Figura 30: Difusión mundial de trabajos referentes a Q-slope.

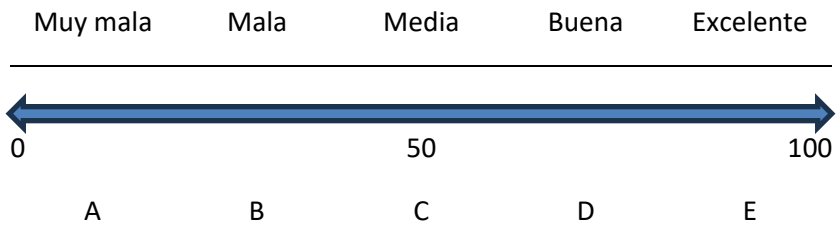
En el método Q-slope se mantienen sin modificaciones los parámetros RQD, Jn, Ja y Jr del método original Q-system (R. Jordá Bordehore, 2016; Jordá-Bordehore et al., 2023). En el Q-slope, la relación $(\frac{jr}{ja})$ es multiplicada por un nuevo factor conocido como O-factor, el cual está relacionado con la orientación de las discontinuidades (Bar & Barton, 2017; Borja-Bernal & Jordá-Bordehore, 2021). Se introducen como novedad términos como Jwice, que considera las diferencias climáticas existentes en el entorno donde se construyen los taludes estudiados, y el SRF_{slope}, que se especializa para taludes analizando diferentes aspectos como: i) las condiciones física del talud, ii) condiciones de estrés del macizo rocoso y iii) el análisis del estado de las juntas principales respecto al frente del talud (Bar & Barton, 2016).

La fórmula aplicable para este método es:

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_o \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (20)$$

Para comprender la fórmula propuesta por los autores, a continuación, se detallarán los subparámetros utilizados para el cálculo del valor de Q-slope. En primer lugar, el RQD, conocido como Rock Quality Designation (Tabla 28). Este parámetro se puede obtener tanto de testigos de perforación como de líneas de registro emplazadas en la cara expuesta del talud.

Tabla 28. Rock Quality Designation (RQD), modificada de (Barton & Bar, 2015).



Nota: i) Cuando se obtiene valores del RQD inferiores o iguales a 10, se debe tomar un valor estimado de 10 para el cálculo del índice Q. ii) Los intervalos de 5 unidades en el valor RQD, ejemplo: 100, 95, 90, etc. Se consideran suficientemente precisos para su evaluación.

Jn, en la fórmula propuesta por los autores del método (Bar & Barton, 2018a), es un valor tabulado que determina la cantidad de familias presentes en el talud de estudio (Tabla 29). Este parámetro va desde taludes completamente fracturados con valores máximos de Jn, hasta taludes masivos o sin juntas visibles, a los cuales se les asigna el valor más bajo del parámetro estudiado.

Tabla 29. Descripción del sistema de juntas (Jn), traducido de (Barton & Bar, 2015).

A	Roca masiva, sin diaclasas o con fisuras escasas	0.5 - 1
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 con terrones	15
J	Roca triturada, terrosa	20

El parámetro Jr (Bar & Barton, 2017) establece las condiciones en las que se encuentran las discontinuidades al momento del estudio (Tabla 30). Estas diaclasas deben ser analizadas desde tres puntos de vista: i) Existe o no contacto entre los planos que forma la junta, ii) De existir contacto entre los planos, este se ha producido después del corte o iii) No existe contacto entre los planos al momento del corte; en este caso, se analiza el relleno que presenta la fractura. En los casos i) y ii), también se analiza la rugosidad de los planos presentes y si los labios de la discontinuidad son o no ondulados.

Tabla 30. Descripción del número de rugosidad de juntas (Jr), traducido de (Barton & Bar, 2015).

a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad.		
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante.		
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	1,0
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas	0,5
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.	1,0
J	Zona arenosa, de gravas o roca triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad.	1,0

Notas:

i) Las descripciones se refieren a características de pequeña escala y características de escala intermedia, en ese orden.

ii) Sumar 1,0 si el espaciamiento medio del conjunto de juntas correspondiente es mayor a 3 m.

iii) Jr = 0,5 se puede utilizar para planos y lados lisos de la junta que tiene lineaciones, siempre que las lineaciones sean orientadas en sentido de una resistencia mínima.

iv) Jr y Ja se aplica al conjunto o conjuntos de discontinuidad que sea menos favorable para la estabilidad del talud tanto desde el punto de

vista de la orientación, así como a la resistencia al corte τ donde $\tau \approx \sigma_n tan^{-1} (\frac{jr}{ja})$.

Jr y Ja serán aplicadas al conjunto o conjuntos de discontinuidades menos favorables para la estabilidad (Tablas 30 y 31), considerando su orientación y la resistencia al corte (Barton & Bar, 2015).

Tabla 31. Número de alteración de juntas (Ja), traducido de (Barton & Bar, 2015).

a)	**Contacto roca-pared (sin rellenos de arcilla, sólo revestimientos)**	
A	Juntas con relleno impermeable, duro, reblandecido o susceptible a ablandamiento, bien cementado, cuarzo o epidota.	0,75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas.	1,0
C	Planos de discontinuidades ligeramente alteradas. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	2,0
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda).	3,0
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, por ejemplo, Caolinita o Mica. También Clorita, Talco, Yeso, Grafito, etc. Con pequeñas cantidades de arcillas expansivas.	4,0
b)	**Contacto entre planos de las discontinuidades ante un desplazamiento cortante (rellenos finos tipo Arcilla, con espesores aproximados de 1 a 5 mm).**	
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de Arcilla, etc.	4,0
G	Sobre consolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos.	6,0

H	Sobre consolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos.	8,0
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, tipo Montmorillonita. Para este caso el valor de (Ja) depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a las de las arcillas, con exceso de agua.	8 - 12
c)	**No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral arcilloso de gran espesor considerable o roca triturada).**	
M	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H, y J para las descripción de las condiciones de las arcillas).	(6 - 8 o 8 - 12)
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles.	5 , 0
O, P, R	Zonas o bandas continuas de arcilla, de gran espesor, ver clases G, H y J , para la descripción de las condiciones de las arcillas).	10 - 13 o 13 - 20

Jr y Ja deben aplicarse a las familias de juntas que se presentan menos favorables en el talud, considerando la estabilidad como la resistencia al corte.

El O-facto es un elemento clave del método Q-slope desarrollado por Barton en 2015. Este parámetro se enfoca en aspectos espcíficos sobre orientación de las fracturas respecto a la pendiente de la ladera y como estas condiciones afectan la estabilidad del talud (Tabla 32).

Tabla 32. Factor de orientación de discontinuidades (O-factor), traducido de (Barton & Bar, 2015).

Set A	Set B	Descripción
2,0	1,5	Orientación muy favorable
1,0	1,0	Poco favorable
0,75	0,9	Desfavorable
0,50	0,8	Muy desfavorable
0,25	0,7	Causa de falla si no se coloca soporte

Los autores recomiendan realizar un ajuste de orientación para discontinuidades existentes en los taludes rocosos. Apliquese el factor de orientación del Conjunto A, al conjunto de diaclasas más desfavorable existente entre las familias de juntas presentes. Si es necesario, apliquese el factor de orientación del Set B al conjunto de fracturas secundarias en caso de que se forme una cuña potencialmente inestable.

Las investigaciones publicadas por los autores proporcionan ejemplos de aplicación (Bar & Barton, 2017, 2018a): Consideremos una falla tipo cuña caracterizada por un Set A dominante y poco favorable, al cual se le adjudican los siguientes valores Jr=1.5, Ja=2; y un Set B menos dominante y que en conjunto forman una cuña a la que se le adjudican los siguientes valores Jr=2, Ja=1.

$$\frac{jr}{ja} = 1{,}5/2;\ 0 - \text{factor} = 0{,}5\ (\text{muy desfavorable}) \qquad (21)$$

$$\frac{jr}{ja} = 2/1;\ 0 - \text{factor} = 0{,}9\ (\text{desfavorable}) \qquad (22)$$

Valor total supuesto para falla tipo cuña: $(\frac{jr}{ja})_o$, para Q-slope =(1,5/2) x 0,5 x (2/1) x 0,9 = 0,68 (φ=34° – 35°).

El siguiente parámetro a ser analizado es el parámetro Jwice (Barton & Bar, 2015), el cual proporciona un valor de cálculo considerando las condiciónes climáticas en la zona de emplazamiento del talud y la condición estructural de la roca en el momento del levantamiento, así como su grado de estabilidad (Tabla 33).

Tabla 33. Número de condición geológica y ambiental (Jwice), traducido de (Barton & Bar, 2015).

Condición de la estructura rocosa	Clima desértico	Clima seco	Tormentas tropicales	Cuñas de hielo
Estructura estable, roca competente	1,0	0,7	0,9	0,9
Estructura estable, roca incompetente	0,7	0,6	0,3	0,5
Estructura inestable, roca competente	0,8	0,6	0,1	0,3
Estructura inestable, roca incompetente	0,5	0,3	0.05	0,2

Nota: Si tiene sistema de drenaje instalado aplicar, Jwice x 1,5.

Si existen instalados sistemas de refuerzo aplicar, Jwice x 1,3.

Si existen instalados sistemas de refuerzo y sistema de drenaje aplicar, Jwice x 1,5 x 1,3.

Los autores (Bar & Barton, 2017) proponen una tabla modificada de la propuesta en 2015 para analizar el factor por reducción de estrés (Tabla 34).

Tabla 34. Factor de reducción por estres (SRFslope), traducido de (Barton & Bar, 2015).

SRFa – condición física		
A	2,5	Aflojamiento débil y superficial de la estructura rocosa provocado por tronaduras o excavaciones.
B	5	Bloques sueltos, con signos de grietas de tensión y cizalla, susceptibilidad a la intemperie, alteración severa producto de tronaduras.
C	10	Como B, pero mayor susceptibilidad a la intemperie.
D	15	El talud se encuentra en una etapa avanzada de erosión y pérdida de cohesión debido a la erosión periódica producida por el agua y/o efectos de la cuña de hielo.
E	20	Talud residual con significativo transporte de material cuesta abajo.

SRFb – estrés			
F	2,5 - 1	σc / σ1* = 50 - 200	Rango moderado de fuerzas y estrés.
G	5 – 2,5	σc / σ1* = 10 - 50	Rotura o comportamiento plástico.
H	10 – 5	σc / σ1* = 5 - 10	Flujo plástico de material suavizado por deformación.
J	15 – 10	σc / σ1* = 2,5 - 5	Rotura o comportamiento plástico.
K	10 - 15	σc / σ1* = 1 – 2,5	Flujo plástico de material suavizado por deformación.

SRFc – discontinuidad dominante					
		Orientación de la discontinuidad			
		Favorable	Desfavorable	Muy desfavorable	Falla sin soporte
L	Discontinuidad dominante con poco o nada de arcilla.	1	2	4	8
M	Discontinuidad dominante con un RQD100=0**, debido a arcilla y roca triturada.	2	4	8	16
N	Discontinuidad dominante con un RQD300=0**, debido a arcilla y roca triturada.	4	8	12	24

* σc = resistencia a la compresión simple de roca intacta (UCS); σ1= tensión principal máxima.

** RQD100 = muestra de 1 metro tomada de forma perpendicular con respecto a la discontinuidad dominante; RQD300 = muestra de 3 metros tomada perpendicular a la discontinuidad dominante.

Una vez obtenidos los datos de cálculo y aplicada la fórmula para obtener el valor de Q-slope, los taludes deben ser clasificados según su grado de estabilidad. Para este proceso, se propone el uso de una gráfica (Bar & Barton, 2017) para predecir la estabilidad del talud (Figura 31). Esta gráfica requiere como parámetros de entrada el valor de Q-slope previamente calculado para el talud y el ángulo de inclinación en grados. Al situar estos pares ordenados en la gráfica se ubica un punto de caracterización, el cual puede catalogar el talud en tres posibles categorías: i) Estable, representada por la zona de color verde en la gráfica, ii) Taludes inestables, representada por la zona de color rojo y iii) Taludes con incertidumbre en su grado de estabilidad, representada por la zona gris del gráfico.

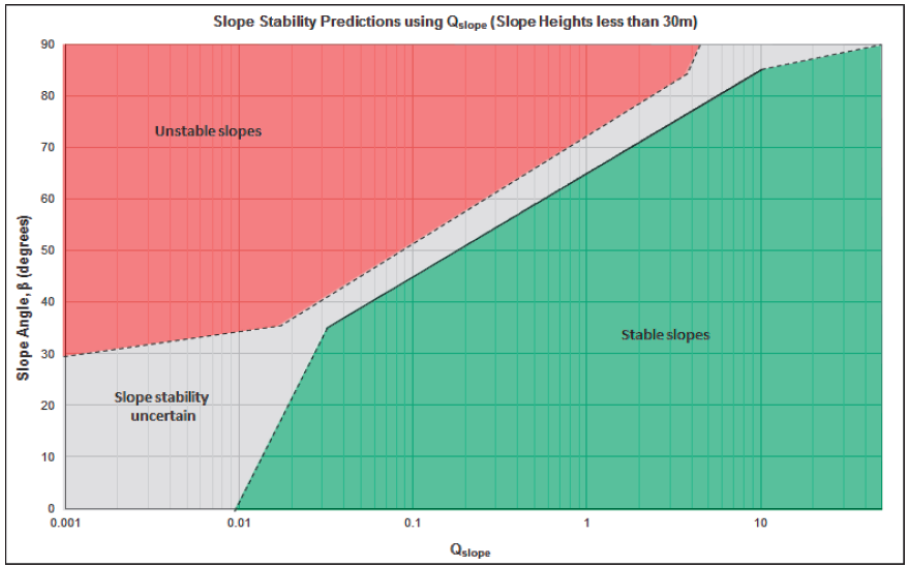


Figura 31. Carta para predicción de la estabilidad de taludes rocosos según Q-slope, (Bar & Barton, 2017).

2.5.4. Aplicación de la estadística en geomecánica de taludes.

Los métodos estadísticos juegan un papel importante en el procesamiento de información que, de otro modo, no podría ser analizada y aprovechada de manera óptima en la ingeniería de taludes, debido por ejemplo, a la aleatoriedad y la complejidad de la distribución de las discontinuidades (Y. Li et al., 2024).

El análisis estadístico permite gestionar la incertidumbre que es generada al procesar los datos obtenidos del levantamiento de información en campo y obtener valores que ayuden a disminuir la inseguridad sobre los resultados obtenidos. La ventaja de los métodos estadísticos frente a los deterministicos radica en la obtención de una solución basada en la probabilidad acumulada

(Napoli et al., 2018). Pese a las ventajas señaladas, el método estadístico debe ir asociado a una metodología que considere todos los aspectos generales a resolver (Figura 32).

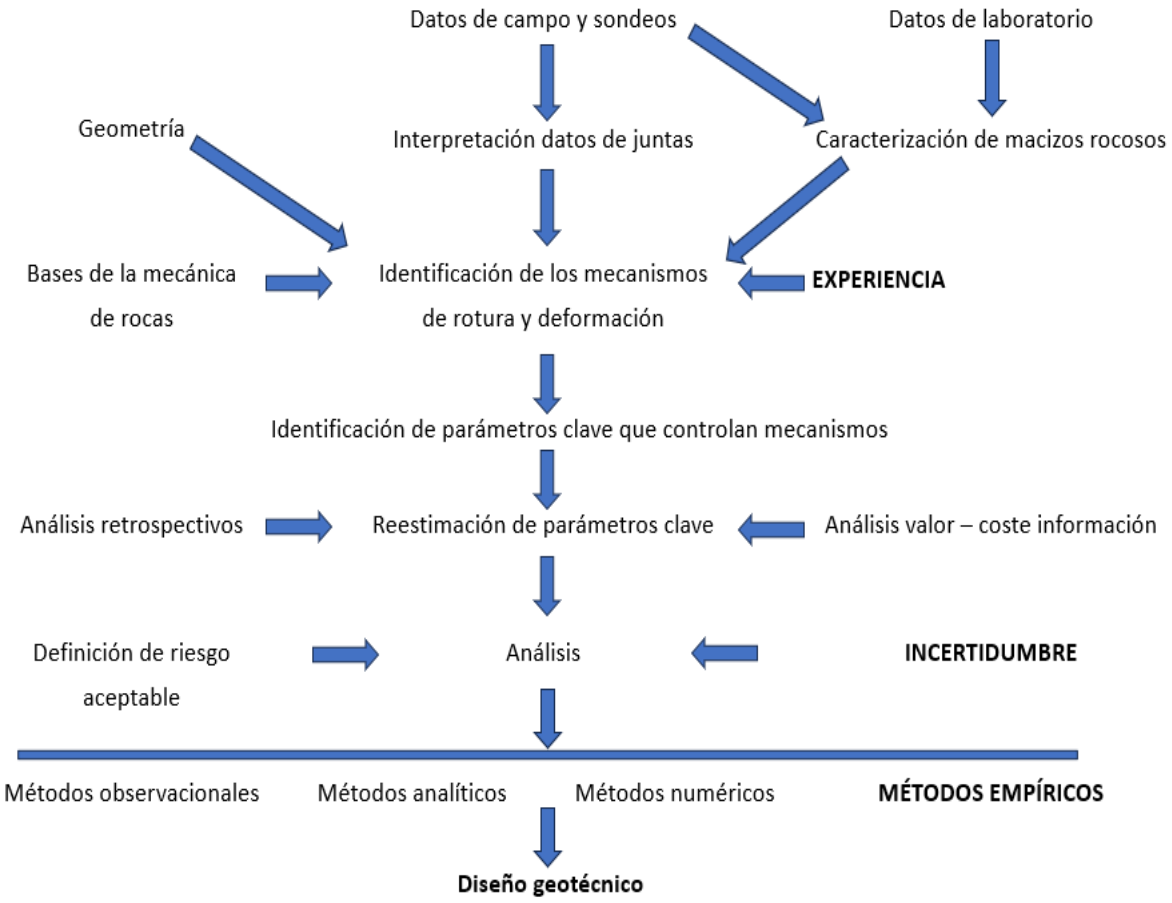


Figura 32. Esquema de diseño de taludes en mecánica de rocas con énfasis en el riesgo y la incertidumbre, modificado de (Ramírez & Alejano, 2008).

Al igual que el proceso general de diseño de taludes, los métodos empíricos, también presentan sub procesos que tienen implícito cierto grado de incertidumbre el cual es analizado mediante técnicas estadísticas que disminuyen el riesgo asociado a la definición de una clasificación adecuada de estabilidad existente (Alejano et al., 2008, 2011).

En la presente investigación se han utilizado algunas técnicas estadísticas que han permitido el procesamiento de información las cuales están o no implícitamente asociadas en el procesamiento y presentación de información y resultados. El ejemplo más básico es el uso de histogramas para procesar datos geomecánicos de campo y exponer los resultados obtenidos en la clasificación de taludes rocosos (Bar & Barton, 2018a; Jordá-Bordehore, 2017). El análisis cinemático es otro sub proceso en el cual se aplican técnicas estadísticos para la obtención de resultados en el procesamiento de información, las técnicas asociadas que se encuentran como parte de los software de análisis son: contorno estadístico de agrupación de orientaciones, orientación media y cálculo de confianza, la variabilidad de conglomerados y análisis de atributos de entidad cualitativa y cuantitativa entre otros (C. P. Borja Bernal & Jordá Bordehore, 2023).

Otra técnica estadística muy usada en ingeniería es la regresión lineal mediante la cual se puede establecer la relación existente entre múltiples datos obtenidos sobre estabilidad de taludes y definir gráficos que permiten usar este conocimiento para asociar datos futuros a un determinado comportamiento en específico, como por ejemplo, la carta de estabilidad propuesta para el método geomecánico Q-slope (Akingboye et al., 2024; Ansari et al., 2019; Bar & Barton, 2018b; Bar & McQuillan, 2021; Barton & Bar, 2015; Coletti et al., 2022).

2.5.4.1. MATRIZ DE CONFUSIÓN

La matriz de confusión es una herramienta empleada para evaluar el rendimiento de modelos de clasificación de machine learning, determinando en el proceso los errores que pueden presentarse en un modelo, sistema o método (Ayache et al., 2023; Safira et al., 2023; Sheng et al., 2023). La matriz de confusión proporciona una representación tabular de un modelo, esto se logra comparando los valores reales obtenidos con las predicciones realizadas por los modelos o métodos utilizados. En este estudio, se utilizó una metodología estadística de datos multivariantes para validar el método de investigación, permitiendo comparar la información obtenida in situ, con los datos generados por modelos computacionales para estabilidad de taludes rocosos (factor de seguridad) y los resultados obtenidos por métodos empíricos de clasificación geomecánica. (C. Borja Bernal et al., 2023).

El primer paso para desarrollar la matriz de confusión es comparar las predicciones realizadas por los modelos con los valores reales del conjunto de

prueba. Para este procedimiento se crea una matriz tres por tres donde las filas representan las clases reales (para nuestro caso la estabilidad observada en campo) y las columnas representan las clases predichas (la valoración obtenida por análisis empírico y cálculo de factores de seguridad), (Tabla 35).

Tabla 35: Matriz de confusión 3x3 para análisis de métodos empíricos.

		Observed class		
		S	QS	F
Predicted class	S	true	false	false
	QS	false	true	false
	F	false	false	true

El segundo paso es calcular los valores relacionados a datos verdaderos positivos (TP), verdaderos negativos (TN), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) para las subclases estable (S), cuasiestable (QS) e inestable o falla (F).

Posteriormente, usando los valores obtenidos en el paso 2 se calculan los índices que permiten catalogar el modelo. Primero se calcula el "truth overall" (TO) y "classification overall" (CO) de cada clase, mediante las sumas horizontales y verticales de los datos clasificados en el primer paso.

A continuación se pueden calcular varios indicadores de rendimiento:

Accuracy – recall (UA): conocido como exactitud, entrega la proporción de predicciones correctas (positivas y negativas) del total de casos.

$$UA\ (Accuracy) = \frac{True\ positive}{Truth\ overall} \quad (23)$$

Accuracy – precision (PA): también llamado Precisión, proporciona la proporción de instancias correctamente predichas como positivas en el total casos predichos como positivos.

$$PA\ (precision) = \frac{True\ positive}{Classification\ overall} \quad (24)$$

Recall: Conocido como Sensibilidad o Tasa de verdaderos Positivos, entrega la proporción de instancias positivas correctamente identificadas.

$$Recall = \frac{True\ positive}{TP + FN} \quad (25)$$

Tasa de Falsos Positivos (FPR): Proporción de instancias negativas incorrectamente predichas como positivas.

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (26)$$

Tasa de Falsos Negativos (FNR): Entrega la proporción de instancias positivas incorrectamente predichas como negativas.

$$FNR = \frac{FN}{FN + TP} \quad (27)$$

Finalmente, se calcula "overall accuracy" (OA) a partir de la suma de todos los valores verdaderos positivos de todas las variables, dividida por el número de datos totales obtenidos o la cantidad de casos analizados (ecuación). El error total del método se obtiene de la diferencia entre el valor máximo posible de (OA) y el valor calculado por la matriz de confusión para el mismo parámetro, expresado en porcentaje.

$$OA = \frac{\Sigma\ True\ positive\ (class\ Stable, Quasi - satble\ and\ Failed)}{n} \quad (28)$$

3. Compendio de publicaciones

3.1. Antecedentes

La investigación inicia el 25 julio de 2019, con la carta de aceptación al programa doctoral DIMARMA por parte de la UPM. Desde esta fecha, se llevaron a cabo acercamientos telemáticos con los tutores de tesis, en los que se definio un posible tema de investigación y se establecieron los objetivos iniciales, así como los posibles métodos y técnicas de análisis a ser implementados durante el estudio. Con el tema y objetivos iniciales definidos, se inició al análisis bibliográfico preliminar y se formularon los primeros supuestos de investigación. En el mismo año, se da inicio al proyecto de investigación FCI-026 titulado "Caracterización de la importancia relativa de parámetros geoambientales en procesos geodinámicos en un sector minero de Zaruma". Este proyecto tenía como objetivo principal la recolección de información de campo y la trasferencia de conocimientos adquiridos durante la primera etapa de la tesis doctoral.

El 21 de febrero de 2020, se realiza la primera estancia doctoral en España, centrada en la adquisición de conocimientos sobre técnicas fotogramétricas, trabajos de laboratorio y levantamiento geomecánico mediante los métodos SMR y Q-slope. Durante esta estancia, se ejecutaron diferentes ensayos de laboratorio y de campo, tales como el ensayo a compresión simple, PLT, uso de esclerómetro para estimar la resistencia del macizo rocoso y ensayo Tilt-test de laboratorio y campo para determinar ángulo de fricción en juntas. Adicionalmente, junto con otro estudiante de doctorado, se llevó a cabo prácticas de campo para levantamiento de imágenes de macizos rocosos y generación de modelos 3D mediante la técnica Structure From Motion (SfM). El 16 de marzo de 2020, y debido al inicio de la pandemia de COVID-19, la estancia doctoral fue suspendida abruptamente.

En Ecuador, se continuó con la instrucción vía telemática. Debido al confinamiento estricto impuesto por las autoridades se decidió trabajar sobre el procesamiento de información obtenida tanto en el proyecto de investigación FCI-026 como en la estancia doctoral del 2020. Para septiembre del mismo año y con el levantamiento parcial de las medidas de confinamiento se retomaron las

salidas de campo en varias provincias de Ecuador para levantamiento geomecánico y se inició la redacción del primer artículo científico.

En abril de 2021, se aprobó un nuevo proyecto de investigación FCI-013, titulado "Fotogrametría de objetos y sitios de interés geológico ambiental". El objetivo de este proyecto fue el de profundizar y aplicar los conocimientos en el área de la fotogrametría, técnica SfM, generando nuevo conocimiento en fotogrametría para divulgación científica. Durante el 2021 y 2022, se publicaron varios artículos en congresos y se continuó con la redacción y presentación de artículos científicos en revistas indexadas.

En 2023, se aprueba el último proyecto de investigación FCI-055 denominado "Evaluación de parámetros geomecánicos influenciados por variables ambientales", el cual tiene como objetivo iniciar nuevas investigaciones basadas en los resultados finales de la presente tesis doctoral. Desde inicios de 2021 hasta mediados de 2023, y considerando los resultados parciales obtenidos en el proceso investigativo sobre la aplicación del método Q-slope en Ecuador, se identificaron las últimas tendencias en el área de estudio, lo cual reorientó el tema de tesis. Como resultado de esta reorientación, se publicó el artículo sobre aplicación del Q-slope en taludes de invierno siendo el segúndo que trata esta problemática a nivel mundial. En la misma línea, se publica el último artículo del compendio, que trata sobre la aplicación práctica del análisis cinemático en taludes rocosos multicara, el cual tiene como fin, homogenizar los datos estructurales y realizar una aplicacíon eficiente de los métodos SMR y Q-slope. Las publicación no solo aportaron nueva y relevante información sobre el tema de investigación, sino que indirectamente también dejaron de manifiesto la dificultad existente al aplicar algunas metodologías geomecánicas en estructuras y ambientes complejos. Una de las principales novedades del presente estudio es la propuesta de mejora al método Q-slope presentada en el EUROCK 2024 de Alicante, España.

Por último del 21 de febrero al 19 de abril y del 01 de mayo al 31 de julio de 2024 se realizarón en España (UPM) y Ecuador (CIPAT – ESPOL) respectivamente la segunda y tercera estancias doctorales, las cuales tenían el objetivo de procesar información relevante, aprender el manejo de nuevos programas y equipos y trazar la hoja de ruta para la redacción del volumen final de tesis.

En resumen, como resultado de la presente investigación se aportó al conocimiento científico con la redacción de tres artículos indexados en revistas de alto impacto, ocho artículos en congresos internacionales (Tabla 36), creación de

tres proyectos de investigación en Ecuador, dirección y asesoría de tesis de grado y maestría en la Universidad de Guayaquil y Escuela Superior Politécnica del Litoral.

A continuación, se presenta la producción científica asociada al tema de tesis, desarrollada como una unidad temática dentro del marco metodológico propuesto.

Tabla 36. Listado de publicaciones en revistas y congresos internacionales

Artículos publicados en congresos y revistas internacionales	Nombre del evento o revista	Cita	* Etapa del estudio
Salidas de campo virtuales en asignaturas de Ingeniería del Terreno	Redes-Innovaestic	(Jordá-Bordehore, et al., 2020)	
Determination of frictional resistance pair Jr/Ja using a friendly – graphical approach in the Q-slope empirical method		(Borja-Bernal & Jordá-Bordehore, 2021)	
Teaching rock mechanics using Virtual Reality: laboratory practices and field trips during the confinement of the Coronavirus COVID-19 in Ecuador, Bolivia, and Spain		(García-Vela et al., 2021) 2021	2
Stability assessment of rock slopes combining Slope Mass Rating and Qslope classification systems: A case study in Cerro San Eduardo (Guayaquil, Ecuador)	EUROCK 2019	(Macías et al., 2021)	
Determination of the basic friction angle ϕb of joints using the field tilt test: results of various “fast” tests	IOP Conference Series: Earth and Environmental	(Jordá-Bordehore et	

on outcrops	Science	al., 2021)	
Volcanes virtuales: Aula invertida de geotecnia de materiales volcánicos a través de entornos virtuales y TICs	Redes-Innovaestic	(Jordá-Bordehore, et al., 2022)	
Virtual volcanoes: Flipped classroom on geotechnics of volcanic materials through Virtual and Augmented Reality	Cities on volcanoes 11	(Jordá-Bordehore, et al., 2022)	
Application of the SfM technique for geomechanical analysis according to SMR and Qslope	IX Latin American Rock Mechanics Symposium	(C. Borja Bernal et al., 2023)	
Stability Assessment of Rock Slopes Using the Q-Slope Classification System: A Reliability Analysis Employing Case Studies in Ecuador	Applied sciences	(C. Borja Bernal et al., 2023)	
Application of the Kinematic Assessment of Multi-faced Slopes Using Stereographic Projection: The Case Study of a Planar Failure on the Spondylus Coast, Ecuador	Applied sciences	(C. P. Borja Bernal & Jordá Bordehore, 2023)	3
Application of the Q-Slope Empirical Approach for Slope Stability Assessment of Spanish Mountain Roads in Winter—Combining Remote Techniques with Virtual Reality	Sustainability	(Borja & Jordá Bordehore, 2023)	
Geomechanical classification graphical Q-slope (GQ-slope)	EUROCK 2024	(L. Jordá Bordehore & Borja Bernal, 2024)	

* Las etapas del estudio están relacionadas a los objetivos de investigación los cuales se encuentran descritos en el gráfico 4 de la sección metodología de investigación.

3.2. Artículo 1 – Stability Assessment of Rock Slopes Using the Q-Slope Classification System: A Reliability Analysis Employing Case Studies in Ecuador

applied sciences

MDPI

Article

Stability Assessment of Rock Slopes Using the Q-Slope Classification System: A Reliability Analysis Employing Case Studies in Ecuador

Cesar Borja Bernal [1,2,*], Ricardo Laín [1], Luis Jordá [3], Miguel Cano [4], Adrián Riquelme [4] and Roberto Tomás [4]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, Calle de Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, Spain; ricardo.lain@upm.es
[2] Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Av. Raúl Gómez Lince s/n y Av., Juan Tanca Marengo, Guayaquil 090601, Ecuador
[3] Department of Land Engineering and Morphology, Universidad Politécnica de Madrid, ETSICCP, Calle Profesor Aranguren 3, Campus Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, Spain; l.jorda@upm.es
[4] Department of Civil Engineering, University of Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig, s/n, San Vicente del Raspeig, 03690 Alicante, Spain
* Correspondence: cesar.bbernal@alumnos.upm.es

Abstract: Q-slope is one of the most recent empirical geomechanical classification systems and the least studied in South America. This study aims to expand the knowledge base regarding the Q-slope geomechanical method and demonstrate its applicability and reliability in rock slopes of Andean countries, such as Ecuador. To this end, thirty rocky slopes have been characterized considering (1) the physical visual approach—geographic location, climate, lithology, alteration, and stability (to obtain values of Jr, Ja, Jwice, and SRFa)—and (2) geomechanical stations and kinematic analysis (for the determination of the type of failure, Jn, O-factor, and SRFc for Q-slope). Field data were collected in contrasting environments (coastal, mountain, and forest), and different failure modes were considered (planar, wedge, block, and flexural topplings) to better understand the method. The results and main contributions of this research are (i) verifying the applicability of the Jwice parameters in different climatic settings and (ii) validating the Q-slope method by applying a confusion matrix to evaluate its reliability for slope stability assessment. The overall accuracy obtained is 80%, placing the Q-slope geomechanical method in the highest evaluation quartile and thus classifying it as very good for slope characterization.

Keywords: slope stability; rock mass classifications; Andes; overall accuracy; Q-slope; reliability

check for updates

Citation: Borja Bernal, C.; Laín, R.; Jordá, L.; Cano, M.; Riquelme, A.; Tomás, R. Stability Assessment of Rock Slopes Using the Q-Slope Classification System: A Reliability Analysis Employing Case Studies in Ecuador. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 7399. https://doi.org/10.3390/app13137399

Academic Editors: Pietro Mosca, Sabrina Bonetto and Chiara Caselle

Received: 19 May 2023
Revised: 12 June 2023
Accepted: 16 June 2023
Published: 22 June 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Geomechanical classifications have been used since 1946 to characterize rock masses, mainly oriented to tunnel construction. The two most widely used geomechanical classifications are the Q-index [1] and rock mass rating (RMR) [2]. These classifications determine a quality index, estimate rock mass behavior, and provide guidelines to select the rock support measures in tunnels, open pit mines, and/or slopes [3,4]. The RMR was conceived for tunnels and adapted for foundations, open pit mining, and rock slopes and is probably the best-known and most commonly used geomechanical classification for the preliminary characterization of rock mass quality. Other classifications modify the RMR for rock slope analysis by adding correction factors such as the slope mass rating, SMR [5], initially employed for civil construction, and the mining rock mass rating, MRMR [6], used in open pit and underground mining. Although the Q-index is the leading classification system for underground design, it was not systematically applied to slopes until 2015. The Q-slope classification [7] modifies some Q-index parameters and enables the application to rock slopes. Q-slope is becoming very popular and has been applied to over 400 individual

case studies in many countries and different lithologies [8]. Nevertheless, SMR remains one of the most used geomechanical classifications for slope analysis [9,10]. SMR has been used for over 30 years, providing valuable insight into expected slope behavior. In contrast, the more recent Q-slope is an empirical rock slope engineering method used to quickly assess slope stability with minimal assumptions [11–13]. SMR and Q-slope have been successfully applied to geomechanically characterize civil construction rock slopes, global natural slopes, and quarries. However, its application and reliability in the Andean region remain relatively underexplored. The application of SMR and Q-slope in the Andean part of South America can fill a knowledge gap in terms of rock types and stability assessments on high mountain slopes.

Slope movements have become one of the most dangerous natural hazards, causing many human losses and substantial material damage annually [14]. With instabilities in rocky slopes, different methods can be used for stability evaluation. From a practical point of view, there are three main approaches to the study of rock slope failures: (a) application of geomechanical classifications and empirical analysis; (b) kinematic assessment or application of limit equilibrium methods (for block and circular failures), and (c) application of numerical methods such as finite element, finite difference, and discrete element approach. (b) and (c) present simple applications and require less information to generate reliable models; therefore, they are the most used approaches in the feasibility stages of a project.

In the study of shallow rock slopes—those without stress effects, with relatively homogeneous rock masses and heights under 50 m—limit equilibrium and kinematic are the most used methods, followed by geomechanical classifications. The Q-slope [7,8] indices can be applied to heavily fractured rock masses, presenting circular, wedge, toppling, or planar failures due to weak rock masses. Limit equilibrium methods can use slice methods and kinematic analysis. The three approaches are frequently combined in practice to study rocky slopes, with each technique providing complementary information [14,15].

Since its development in the 1970s, the Q system has been widely used in multiple projects related to civil engineering and underground mining [7]. In 2015, the empirical Q-slope method was presented, enabling technicians responsible for ongoing construction works to evaluate the stability of excavations and rock slopes as it progresses, correcting the inclination angles of the rocks in the field and profiled slopes [16]. The Q-slope index maintains the original RQD and Jn parameters of the Q-index but modifies and proposes adjustments for the Jr, Ja, and Jw factors and SRF:

i. On slopes, the relationship of (Jr/Ja) is multiplied by a subfactor "O", which considers the impact of discontinuity orientation on slope stability;
ii. The Jw factor is transformed into a double parameter that analyzes the relationship between the state of the slopes and the environment in which they are located;
iii. The SRF factor for slopes is divided into three potential lines of analysis depending on the existing field data: (a) physical condition, (b) stress, and (c) major discontinuity.

With these modifications, Q-slope values are obtained, spanning six orders of magnitude (from 0.001 to 1000) and thus determining the slope's recommended inclination angle and failure mode [17–19].

Whether applied to tunnels, open pit mines, or slopes, the success of geomechanical classifications is based on the applicability to different scenarios that benefit from a continuously updated database of real applications. For example, the SMR classification, initially developed in 2015 for limestones, marls, and siltstones along the Spanish east coast, has been applied to many lithologies and countries. In 2015, there was evidence of SMR in over 50 countries and five continents [10].

The first publication of the Q-slope index in 2015 reported its application in Panama, Australia, Laos, and the Dominican Republic [7]. It has been since extended and applied to many other countries such as Papua New Guinea, Turkey, Serbia, Slovenia, and Spain [8].

A scientific literature review was carried out to verify the applicability of the Q-slope. The search encompassed the WOS and SCOPUS databases and included studies published until January 2022. The results detected applications of Q-slope in Australia, Norway, India,

Iran, Netherlands, Turkey, China, the United States, Spain, Italy, Algeria, the Republic of Macedonia, Brazil, Hungary, and Malawi. Besides scientific papers, the analysis included conference proceedings.

However, when focusing on the Andean slopes of Ecuador, the results confirmed a gap regarding high-impact scientific publications. The number of publications associating Ecuador and the Q-slope method is scarce. This emphasizes the relevance and necessity to validate this method in the Andean region, specifically in Ecuador, to assess its reliability. The overarching aim is to provide greater visibility to the Q-slope both in the scientific world and in applied engineering, thus contributing to regional geotectonics.

The primary aim of this study is to evaluate the applicability of the Q-slope classification in Ecuador. To this end, slopes were selected to represent the four most common types of failures: planar, wedge, flexural toppling, and block or direct toppling. The outcomes of a conventional slope kinematic analysis are used to obtain the values of some parameters employed in the equations used by the geomechanical classification [20–22]. This study also evaluates the accuracy and reliability of the Q-slope to predict real failures compared to the recommendations given by the authors of the method [7].

2. Study Sites

The Andes is a mountain range spanning from southern Chile to Colombia, in the heart of the South American continent. It is characterized by young high elevations, high plateaus, and significant slopes with deep valleys, only surpassed by the Himalayas. The roads and railways of rugged countries such as Bolivia, Peru, and Ecuador are often affected by slope failure problems. These risks entail high maintenance costs, long delays and disruptions in services, and hazards and disasters across the network of national road routes.

Ecuador is located in the northwestern corner of South America, bordering Colombia to the north, Peru to the south, and the Pacific Ocean to the west (Figure 1). The insular region of Ecuador is represented by the Galapagos Islands, named by UNESCO as a World Heritage Site, which are part of the Ecuadorian territory and the Biosphere Reserve and Ramsar Sites [23]. The present study focuses on continental Ecuador, historically marked by strong seismic events that have shaped the regional geology, dividing the country into three geological regions: (i) coast or littoral; (ii) Sierra or Interandina; and (iii) Oriente or Amazonia (Figure 1).

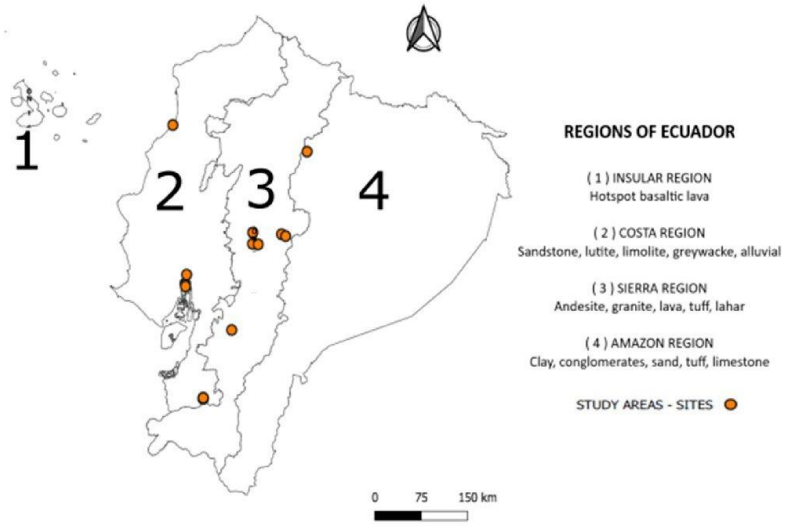


Figure 1. Geographic location of the study and geological regions of Ecuador.

The coast is subdivided into three sub-regions, south, central, and north, in which mainly sedimentary rocks are found, such as conglomerate, claystone, shale, and limestone. The Sierra is divided into north-central, central-south, and south-southwest. The predominant geology of the Sierra includes volcanic and intrusive rocks of the andesitic lavas, pyroclastic rocks, tuffs, and greywackes. The Amazon, also known as the Ecuadorian East, is divided into north, central, and south (west), with mainly sedimentary rocks such as conglomerate, sandstone, shale, claystone, gypsum, slate, and limestone. Geological materials originate from hot spots in the Galapagos Islands, with basaltic lavas dominating [24].

This section briefly lists the areas in which the studied slopes are located (Figure 1). The thirty study sites are located in seven different provinces of the three regions that constitute continental Ecuador: (i) Bellavista neighborhood, vía Las Aguas and Faculty of Natural Sciences of the University of Guayaquil (Guayas province), (ii) Coaque–Santa Teresa highway (Manabí province), (iii) Vías Cahuají–Cotaló, San Juan—Guaranda and Cascada Ojo del fantasma (Chimborazo province), (iv) Papallacta road from Quito to the east (Napo province), (v) El Cajas (Azuay province), (vi) Cantera Mesa, vías Pache–Piñas and Pacha–Ayapamba (El Oro province), and (vii) vía Ambato–Guaranda, zones Cashisagua and Gallo Rumi (Bolívar province).

Guayaquil (Guayas province) is the most important city on the coast of Ecuador. Guayaquil is nestled chiefly on the banks of the Guayas River, on soft sedimentary terrain with little relief. However, to the west of Guayaquil, there is a series of hills with maximum altitudes of 300 m a.s.l., formed by folded sedimentary rocks. In this province, seven slopes (aslope no. 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7) were studied on byways, courts, streets, and quarries. The heights of these slopes range from 4 to 18 m and include wedge, planar, and toppling stability failure types.

The Spondylus route follows the coast of Ecuador. Slope no. 8 is located in the coastal province of Manabí, on a highway called Coaque–Santa Teresa. The 12-m height slope is unstable and presents a wedge-type fault in Andesite Basalts.

The province of Chimborazo is placed in the south-central part of Ecuador and includes the Chimborazo, Tungurahua, and Altar Volcanoes as the most critical topographic features. The geology of Chimborazo is mainly composed of andesites, rhyolites, granites, lavas, volcanic tuffs, and laharitic flows. In this Andean province, five unstable and very steep Quasi-Stable slopes (slope no. 9, 10, 11, 12, and 13) are located in avenues and fairways, with heights ranging from 55 to 70 m and presenting wedge, toppling, and planar failures.

The main highway that connects the capital Quito (Sierra) to the East of Ecuador (jungle) crosses the Papallacta hot springs. This route crosscuts several basaltic lava flows of the Antisana volcano. The study slope (slope no. 14) comprises basaltic columns that project out of the road slope, causing tilting (i.e., toppling of blocks) of some columns towards the road.

The mountain pass known as El Cajas, located just 35 km from Cuenca, was declared a World Heritage Site by UNESCO. The road that connects Guayaquil to Cuenca records a 4000 m altitude difference along 120 km. The study slope (slope no. 15) within the Cajas National Park is structurally controlled and presents a typical instability of block toppling and planar failure depending on the slope area.

Piñas county is part of the El Oro (The Gold) province, named for its significant mineral deposits, actively mined since colonial times. The rocks that describe the geological system are andesitic lavas, granites, rhyolites, and slates. Six sites of interest were studied (slope no. 16, 17, 18, 19, 20, and 21), evidencing wedge failures and toppling.

The province of Bolivar extends from the slopes of the Chimborazo volcano, Arenal sector 4400 m a.s.l., to the town of Balsapamba, located 200 m a.s.l. The study areas are geologically represented by lava flows, pyroclastic rocks, laharitic flows, shales, and greywackes. Land features and accessibility to the sampling sites were the main criteria for choosing the study areas. In this province, nine slopes were surveyed, two on the Ambato–Guaranda road (slope no. 22 and 23), three in the San Juan area (slope no. 24, 25, and 26), three in the Cashisagua area (slope no. 27, 28, and 29) and one in the Gallo

Rumi area (slope no. 30). These slopes show three common failure types: planar, toppling, and wedge.

3. Materials and Methods

The proposed methodology was developed in three different phases (Figure 2): (i) fieldwork for data acquisition; (ii) processing of the recorded information; and (iii) validation and reliability analysis employing a confusion matrix analysis.

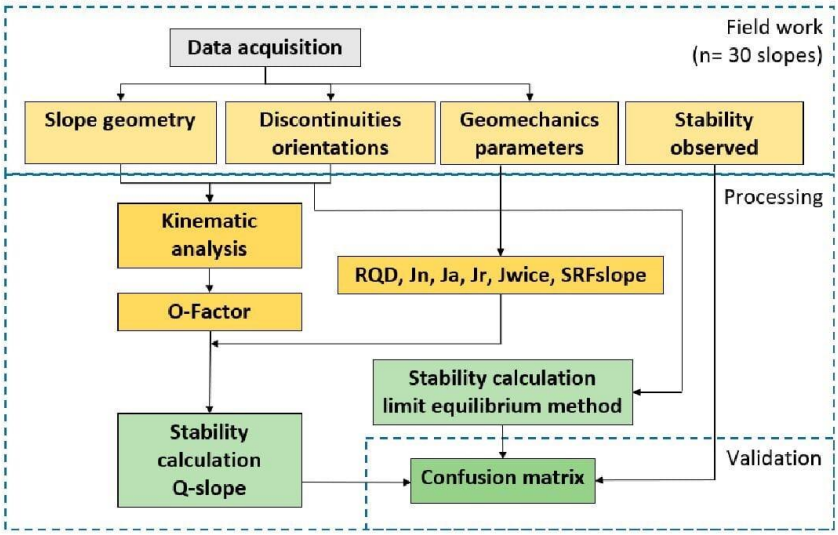


Figure 2. Scheme of the methodology followed for the application of the Q-slope method.

3.1. Data Acquisition

Fieldwork was carried out from March 2020 to January 2021. Thirty slopes were studied in seven provinces of the three continental Ecuador regions (Figures 1 and 3a). At each geotechnical survey (i.e., observation point), geometrical, physical, and structural data were collected regarding the type of rock matrix and behavior of the discontinuities that composed the bedrock (i.e., roughness, openness, persistence, and presence of water). Structural data of joints and discontinuities (dip/dip direction) were also registered, which enabled the identification of the failure for each slope. All the main types of failure were observed (i.e., wedge, toppling, and planar), with wedge failure being the most representative of the study (Figures 3 and 4). During fieldwork, slope stability was also estimated in situ as stable, almost stable, or unstable based on the signs of instability observed in the slope. Most slopes were classified as unstable at the end of the survey, while the remainder were classified as almost stable and stable.

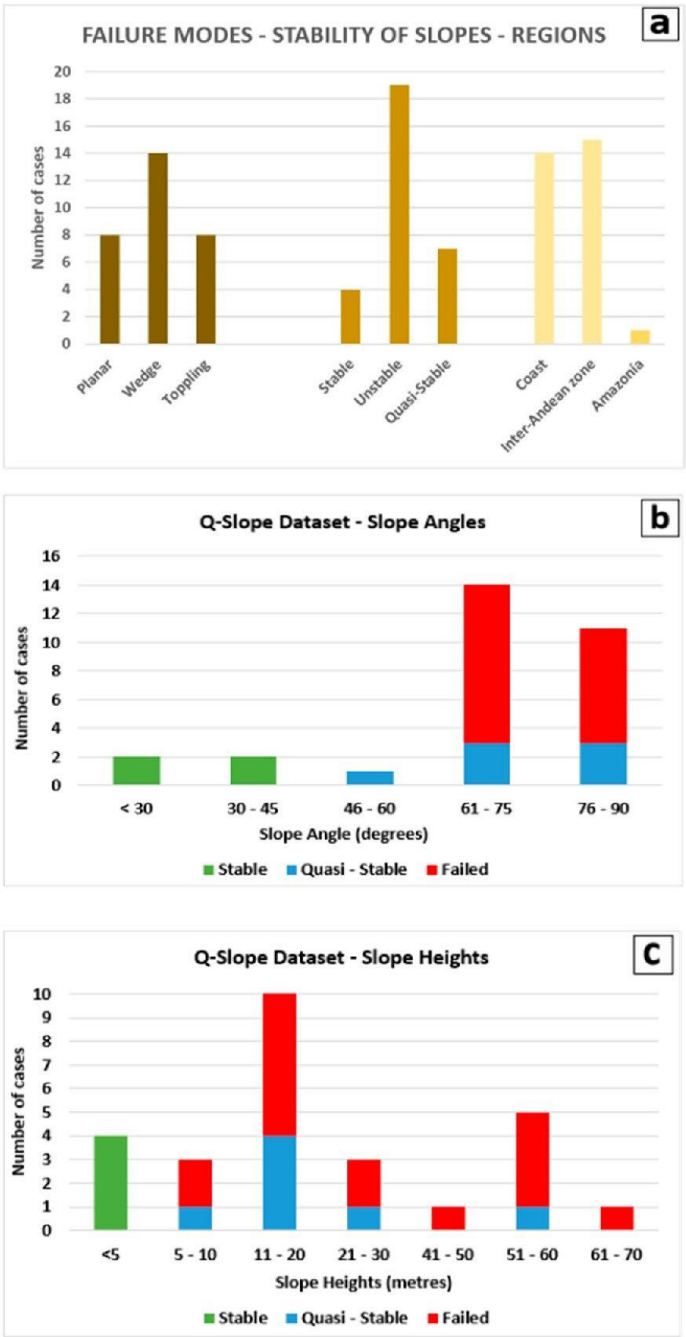


Figure 3. Case studies analyzed herein: (**a**) failure modes, stability, and study regions, (**b**) stability and slope angle, and (**c**) stability and height.

Figure 4. *Cont.*

Figure 4. Type of stability: (**a**) stable slope no. 2 of the School of Natural Sciences University of Guayaquil; (**b**) Quasi stable slope no. 22 on the Ambato-Guaranda road, slopes of the Chimborazo volcano; (**c**) unstable slope no. 9 of the Cahuají–Cotaló highland region road; (**d**) slope no. 15 in El Cajas, which presents overturning type rupture; (**e**) slope no. 14, in Papallacta (Ecuador), where block toppling is present in basaltic columns; (**f**) slope no. 5, in the Bellavista area, Guayaquil (Ecuador), which presents planar failure in siliceous siltstones; and (**g**) slope no. 8, in the Coaque–Santa Teresa roadway (Ecuador), which shows wedge failure in andesitic basalts.

3.2. Basic Kinematic Assessment

The analysis of wedge, planar, and block toppling failure is a tridimensional-type problem. The visualization of the interactions between discontinuity planes and slopes is exceptionally complex to analyze using isometric projection but considerably simplified with stereographic projection, in which the planes are represented by points (i.e., poles). Kinematic assessment is based on the analysis of the relative orientation of discontinuity planes or poles regarding the slope, establishing four main types of failure: (a) planar; (b) wedge; (c) flexural toppling; and (d) direct toppling [25].

Instabilities depend on the relationship between friction, the orientation of the joints, and the angle of the slope. The kinematic representation of data obtained in situ and the direct observation of evidence of instability in the slope enables a preliminary stability

assessment. This initial analysis provides a broader perspective of the problem and establishes a standard for the selection of values related to the joint set number (Jn), the favorable or unfavorable orientation of the discontinuities (O-factor), major discontinuity (SRFc), and stable and unstable structure.

In order to assess the kinematic stability of the rock blocks, the shear strength of discontinuities is needed. In this paper, Barton's (2002) criteria for the "frictional component" of joints is used while considering the cohesion = 0 to be conservative in the design. The "Frictional Component (FC) is given by the following formula [26]:

$$\mathrm{FC}\ (\mathrm{deg}) = \tan^{-1}\left(\frac{J_r}{J_a} \times J_w\right) \quad (1)$$

3.3. Rock Slope Quality Assessment Using Q-slope

The Q-index for slopes (or Q-slope) was conceived in 2014, mainly for an immediate application to a hydroelectric power dam in the Dominican Republic. However, the first publication on its application occurred in 2015 [7].

The equation applied to estimate the value of the Q-slope index shares two-thirds of its content with the original Q-index for underground works [7,27]. The Q-slope is calculated by Equation (2).

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \cdot \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_o \cdot \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (2)$$

where:

RQD: Rock quality designation;
J_n: Joint set number;
J_r: Joint roughness number;
J_a: Joint alteration number;
O-factor: Orientation factor for the ratio Jr/Ja;
J_{wice}: Environmental and geological condition number, which replaces the
Joint: water reduction factor (Jw) of the original Q-index;
SRF: Stress reduction factor for the slope. It is the maximum value between SRF_a (which addresses physical condition), SRF_b (which addresses stress, similarly to the one used in the Q-index); SRF_c: (which considers major discontinuity).

One of the novelties of the Q-slope is the discontinuity orientation factor, known as the O-Factor, which provides an adjustment to the orientation/orientations of the joints present in the studied slope [7]. This parameter is obtained after the joint kinematic analysis establishes the type of failure, considering the orientation of the main joints and the geometry of the slope. The O-Factor is determined from a table in which the only information required is whether the joint (planar failure) or joints (in the case of wedge failure) are very favorably oriented, quite favorable, unfavorable, very unfavorable, or causing failure if unsupported [8]. The information required to identify the O-Factor is easily obtained from the preliminary kinematic analysis of the study cases and field data.

Another parameter of interest is the strength reduction factor (SRF), which is relevant to consider when the quality of the materials constituting the rocky mass is not high and the heights of the slope increase. These singularities require the appropriate study of the strength state [8]. The strength reduction factor is estimated from the most unfavorable value recorded for subfactors SRFa, physical condition; SRFb, which analyzes various stress–strength ranges; and SRFc, major discontinuity. These subfactors are calculated from data on the type of excavation, blasting, susceptibility to weathering, the physical state of the blocks that constitute the slope, erosion state, unconfined compressive strength, the physical state of the major discontinuity, RQD, and maximum main strength. Depending on available data on sub-parameters a, b, and c, the authors suggest selecting the most unfavorable value or discarding one of the complementary sub-values and only considering

the one with the most reliable information that allows for the selection of the best value for SRF.

For further details about the description and pondering of each factor, the reader is referred to [7,28].

The authors of method [7] also proposed the maximum stable angle of the slope (β), expressed in sexagesimal degrees, for a given Q-slope value (Equation (3)).

$$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65^{\circ} \quad (3)$$

The geomechanical Q-slope classification requires information on the impact of the construction method on the slope, the state of the surroundings, and effects on exposed slopes, considering the weather, water effects, ice, and evidence of material transportation by gravitational force. Evidence of constructive methods and environmental state was carefully surveyed and compared with the back-analysis of variables—this procedure minimized significant errors in the final evaluation.

3.4. Calculation of the Factor of Safety

The factor of safety is calculated from kinematic analysis using limit equilibrium methods. RocPlane and RocTopple software from Rocscience are used for the evaluation of the stability of planar and toppling failures, respectively. Similarly, the freeware Orwa is used for the case of wedges [29,30]. The factor of safety (FoS) is then calculated for each slope in a deterministic mode, which is representative of the actual state of the study slopes.

3.5. Validation and Reliability of the Results (Confusion Matrix)

A confusion matrix is a tool employed to assess the errors of a classification system [31,32].

A statistical methodology of multivariate data was used to validate the study method, which compares the information obtained in situ against data calculated by software and the classification method. In the case study presented herein, data on the estimated or observed stability of slopes were compared with the information calculated by the empirical Q-slope method and factor of safety (FoS) obtained with software through a confusion or error matrix [33].

The first step in developing a confusion matrix is to classify obtained data as true positives and true negatives or false positives and false negatives. This was accomplished for the sub-classes stable, quasi-stable, and failed. The later calculation of the truth overall and classification overall of each class required the horizontal and vertical sums of the data classified in step one.

The percentage value of user accuracy—recall (UA) and producer accuracy—precision (PA) is the ratio between the true positive values of each analyzed class and the values obtained in step one for truth overall and classification overall, respectively (Equations (4) and (5)).

$$\text{UA (recall)} = \frac{\text{True positive}}{\text{Truth overall}} \quad (4)$$

$$\text{PA (precision)} = \frac{\text{True positive}}{\text{Classification overall}} \quad (5)$$

Finally, the overall accuracy (OA) is calculated from the sum of all true positive values of all variables, divided by the amount (n) of samples analyzed (Equation (6)). The overall error of the method is obtained from the difference between the maximum OA value possible and the value calculated by the confusion matrix for the same parameter.

$$\text{OA} = \frac{\Sigma \text{ True positive (class Stable, Quasi} - \text{stable and Failed)}}{\text{n}} \quad (6)$$

4. Results

Figure 3 shows the Q-slope dataset (case studies) of the failure modes, stability study

the one with the most reliable information that allows for the selection of the best value for SRF.

For further details about the description and pondering of each factor, the reader is referred to [7,28].

The authors of method [7] also proposed the maximum stable angle of the slope (β), expressed in sexagesimal degrees, for a given Q-slope value (Equation (3)).

$$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65^{\circ} \quad (3)$$

The geomechanical Q-slope classification requires information on the impact of the construction method on the slope, the state of the surroundings, and effects on exposed slopes, considering the weather, water effects, ice, and evidence of material transportation by gravitational force. Evidence of constructive methods and environmental state was carefully surveyed and compared with the back-analysis of variables—this procedure minimized significant errors in the final evaluation.

3.4. Calculation of the Factor of Safety

The factor of safety is calculated from kinematic analysis using limit equilibrium methods. RocPlane and RocTopple software from Rocscience are used for the evaluation of the stability of planar and toppling failures, respectively. Similarly, the freeware Orwa is used for the case of wedges [29,30]. The factor of safety (FoS) is then calculated for each slope in a deterministic mode, which is representative of the actual state of the study slopes.

3.5. Validation and Reliability of the Results (Confusion Matrix)

A confusion matrix is a tool employed to assess the errors of a classification system [31,32].

A statistical methodology of multivariate data was used to validate the study method, which compares the information obtained in situ against data calculated by software and the classification method. In the case study presented herein, data on the estimated or observed stability of slopes were compared with the information calculated by the empirical Q-slope method and factor of safety (FoS) obtained with software through a confusion or error matrix [33].

The first step in developing a confusion matrix is to classify obtained data as true positives and true negatives or false positives and false negatives. This was accomplished for the sub-classes stable, quasi-stable, and failed. The later calculation of the truth overall and classification overall of each class required the horizontal and vertical sums of the data classified in step one.

The percentage value of user accuracy—recall (UA) and producer accuracy—precision (PA) is the ratio between the true positive values of each analyzed class and the values obtained in step one for truth overall and classification overall, respectively (Equations (4) and (5)).

$$\text{UA (recall)} = \frac{\text{True positive}}{\text{Truth overall}} \quad (4)$$

$$\text{PA (precision)} = \frac{\text{True positive}}{\text{Classification overall}} \quad (5)$$

Finally, the overall accuracy (OA) is calculated from the sum of all true positive values of all variables, divided by the amount (n) of samples analyzed (Equation (6)). The overall error of the method is obtained from the difference between the maximum OA value possible and the value calculated by the confusion matrix for the same parameter.

$$\text{OA} = \frac{\Sigma \text{ True positive (class Stable, Quasi} - \text{stable and Failed)}}{\text{n}} \quad (6)$$

Table 1. Q-slope values, geomechanical parameters, location, characteristics, and stability of the analyzed slopes (* drainage measures installed).

No.	Zone of Ecuador	Province of Ecuador	Location	Use	Height in Meters	Slope Angle in Degrees	Q-Slope Value Calculation Factors						Stability Observed	Failure Mode
							RQD	Jn	(Jr/Ja)o	Jwice	SRF Slope	Q-slope Value		
1	Coast	Guayas	F. CC NN 1	Byway	10	85	70	9	0.759	0.05	10	0.030	Unstable	Wedge
2	Coast	Guayas	F. CC NN 2	Court	4	30	75	12	0.750	0.3	10	0.141	Stable	Planar
3	Coast	Guayas	F. CC NN 3	Street	4	30	65	12	0.375	0.3	10	0.061	Stable	Toppling
4	Coast	Guayas	Las Aguas *	Street	15	75	90	12	0.563	0.075	10	0.032	Unstable	Toppling
5	Coast	Guayas	Bellavista	Street	18	50	60	15	0.375	0.7	8	0.131	Q-stable	Planar
6	Coast	Guayas	Santa Rosa	Quarry	2	10	98	12	0.375	0.5	15	0.102	Stable	Toppling
7	Coast	Guayas	Santa Rosa	Quarry	3	20	99	12	0.375	0.5	10	0.155	Stable	Toppling
8	Coast	Manabí	Coaque–S.Teresa	Avenue	12	70	80	15	0.044	0.7	8	0.020	Unstable	Wedge
9	Andean	Chimborazo	Cahuají–Cotaló 1	Avenue	60	80	90	15	0.075	0.5	10	0.023	Unstable	Wedge
10	Andean	Chimborazo	Cahuají–Cotaló 2	Avenue	55	75	90	12	0.083	0.5	10	0.031	Unstable	Planar
11	Andean	Chimborazo	Cahuají–Cotaló 3	Avenue	60	65	95	12	0.063	0.5	10	0.025	Unstable	Wedge
12	Andean	Chimborazo	Cahuají–Cotaló 4	Avenue	70	75	95	12	0.038	0.5	10	0.015	Unstable	Wedge
13	Andean	Chimborazo	Cascada	Fairway	60	75	95	12	0.563	0.7	5	0.623	Q-stable	Planar
14	Amazon	Napo	Papallacta	Avenue	18	90	90	15	0.380	0.6	5	0.270	Unstable	Toppling
15	Andean	Azuay	El Cajas	Avenue	13	77	100	9	0.380	0.6	5	0.500	Q-stable	Planar
16	Coast	El Oro	La Mesa 1	Quarry	50	82	75	15	0.150	0.05	10	0.004	Unstable	Toppling
17	Coast	El Oro	La Mesa 2	Quarry	60	80	30	12	0.056	0.05	10	0.001	Unstable	Wedge
18	Coast	El Oro	La Mesa 3	Quarry	25	74	55	15	0.100	0.05	15	0.001	Unstable	Toppling
19	Coast	El Oro	Pache-Piñas	Avenue	17	70	100	12	0.380	0.3	5	0.190	Q-stable	Wedge
20	Coast	El Oro	Pacha–Ayapamba 1	Avenue	15	78	85	15	6.075	0.3	10	1.033	Q-stable	Wedge
21	Coast	El Oro	Pacha–Ayapamba 2	Avenue	25	85	80	15	6.075	0.3	10	0.972	Q-stable	Wedge
22	Andean	Bolívar	Ambato–Guaranda 1	Highway	10	75	95	9	0.750	0.9	10	0.713	Q-stable	Planar
23	Andean	Bolívar	Ambato–Guaranda 2	Highway	18	77	65	15	0.083	0.7	10	0.025	Unstable	Planar
24	Andean	Bolívar	San Juan 1	Avenue	15	70	60	12	0.169	0.3	10	0.025	Unstable	Wedge
25	Andean	Bolívar	San Juan 2	Avenue	10	75	80	12	0.125	0.2	10	0.017	Unstable	Toppling
26	Andean	Bolívar	San Juan 3	Avenue	12	75	90	12	0.225	0.3	10	0.051	Unstable	Wedge
27	Andean	Bolívar	Cashisagua 1	Avenue	17	77	80	12	0.025	0.3	10	0.005	Unstable	Wedge
28	Andean	Bolívar	Cashisagua 2	Avenue	20	72	85	12	0.019	0.3	10	0.004	Unstable	Wedge
29	Andean	Bolívar	Cashisagua 3	Avenue	30	80	95	12	0.375	0.3	10	0.089	Unstable	Planar
30	Andean	Bolívar	Gallo Rumi	Avenue	12	72	50	15	0.050	0.2	10	0.003	Unstable	Wedge

Table 2. Kinematic assessment of the studied rock slopes.

No.	Zone of Ecuador	Slope Dip	Slope Dip Direction DipDir	Failure Mode	Joint DipDir	Joint Dip	Joint 2 DipDir (Wedges)	Frictional Component FC (Degrees)	Factor of Safety FS	Stability Factor of Safety
1	Coast	85	060	Wedge	072	65	023	48	0.27	Unstable
2	Coast	30	035	Planar	030	73		37	>1	Stable
3	Coast	30	215	Toppling	192	16		37	>2	Stable
4	Coast	75	180	Toppling	187	15		37	>3	Stable
5	Coast	50	192	Planar	180	44		30	0.6	Unstable
6	Coast	10	208	Toppling	203	17		21	>1	Stable
7	Coast	20	345	Toppling	336	34		21	>2	Stable
8	Coast	70	110	Wedge	034	60	140	30	0.73	Unstable
9	Andean	80	090	Wedge	155	77	077	11	0.25	Unstable
10	Andean	75	095	Planar	108	77		25	>1	Stable
11	Andean	65	090	Wedge	034	62	117	30	0.61	Unstable
12	Andean	75	115	Wedge	151	61	048	30	0.51	Unstable
13	Andean	75	180	Planar	186	49		37	0.5	Unstable
14	Amazon	90	210	Toppling	065	80		30	0.23	Unstable
15	Andean	77	161	Planar	175	31		32	>1	Stable
16	Coast	82	050	Toppling	056	82		11	0.33	Unstable
17	Coast	80	325	Wedge	289	88	038	5	0.77	Unstable
18	Coast	74	272	Toppling	272	78		11	0.58	Unstable
19	Coast	70	126	Wedge	203	85	105	29	>1	Stable
20	Coast	78	137	Wedge	163	71	063	32	0.4	Unstable
21	Coast	85	145	Wedge	139	84	184	30	0.31	Unstable
22	Andean	75	060	Planar	062	79		37	>1	Stable
23	Andean	77	120	Planar	105	76		9	0.14	Unstable
24	Andean	70	040	Wedge	345	43	272	14	0.62	Unstable
25	Andean	75	020	Toppling	010	63		14	0.59	Unstable
26	Andean	75	028	Wedge	113	44	004	40	0.83	Unstable
27–28	Andean	72	005	Wedge	309	71	009	20	0.33	Unstable
29	Andean	80	080	Planar	099	77		37	0.13	Unstable
30	Andean	72	015	wedge	310	77	093	7	1.16	Stable

Statistical analysis of data revealed that of the 30 values obtained in the field (observed class), processed by the Q-slope method and processed by software (predicted class) according to the stable, almost stable, and failure sub-classes:

- For statistical study cases a and b, 24 values are true positive values, and only 6 were classified as false positives–negatives; for statistical case c, 21 are true positive values, and 9 cases were classified as false positives–negatives.
- For case a, a 100% value was obtained in producer accuracy (precision) with the stable and quasi-stable classes–the remaining sub-classes and statistical cases produced 95% and lower values.
- Regarding user accuracy (recall), 100% values were obtained for all statistical cases with sub-class stable. Case a with sub-class failed also produced a 100% value. Other sub-classes and statistical cases registered values of 89% and lower.
- The overall accuracy parameter, which defines the quality of the result obtained for the classification method (Guan et al., 2020), provided an 80% value for statistical cases a and b and 70% for case c.

Considering that the number of stable, quasi-stable, and unstable slopes is random and that the distribution of sub-class values in the confusion matrix is not homogeneous, the metric F1 score was selected as it summarizes effectively in a single value the precision and recall of the method [34].

Table 3. Results of the confusion matrices for the three statistical study cases, considering data observed in the field, calculated with Q-slope and calculated with software (Factor of safety-FoS).

Statistical Case a: Predicted Class (Q-slope) Compared to Observed Class							
Sub-Class	**n (Truth Overall)**	**n (Classified)**	**Accuracy**	**Precision**	**Recall**	**F1 Score**	**Overall Accuracy**
1	4	4	100%	1.00	1.00	1.00	
2	7	1	80%	1.00	0.14	0.25	80%
3	19	25	80%	0.76	1.00	0.86	
Statistical Case b: Predicted Class (FoS) Compared to Predicted Class (Q-slope)							
Sub-Class	**n (Truth Overall)**	**n (Classified)**	**Accuracy**	**Precision**	**Recall**	**F1 Score**	**Overall Accuracy**
1	4	9	83.33%	0.44	1.00	0.62	
2	1	0	96.67%	0.00	0.00	0.00	80%
3	25	21	80.00%	0.95	0.80	0.87	
Statistical Case c: Predicted Class (FoS) Compared to Observed Class							
Sub-Class	**n (Truth Overall)**	**n (Classified)**	**Accuracy**	**Precision**	**Recall**	**F1 Score**	**Overall Accuracy**
1	4	9	83.33%	0.44	1.00	0.62	
2	7	0	76.67%	0.00	0.00	0.00	70%
3	19	21	80.00%	0.81	0.89	0.85	

5. Discussion

There is a clear correlation between slopes visualized as stable and those calculated as stable using the Q-slope. Slope no. 2, 3, 6, and 7, classified as "stable", are also classified as "stable" according to the graph proposed in 2017 for the Q-slope. It should be mentioned that slope no. 2 and 3 have been controlled for seven consecutive years because of their geographical location and access,t exhibiting no evidence of instability during the monitoring period. Slope no. 5 was classified in the field as "not very stable" and is in the zone of "Quasi-Stable" slopes in the Q-slope graph [8].

However, for the remaining 25 slopes, there are slight differences between what is predicted by the Q-slope method and what is observed. Slope no. 13, 15, 19, 20, 21, and 22 were classified in the field as "Quasi-Stable". However, they were located in the "unstable slope" graph area. The original graph [8] seems conservative and on the safe side for these slopes (Figure 6), which is very reasonable for empirical and pre-design analysis.

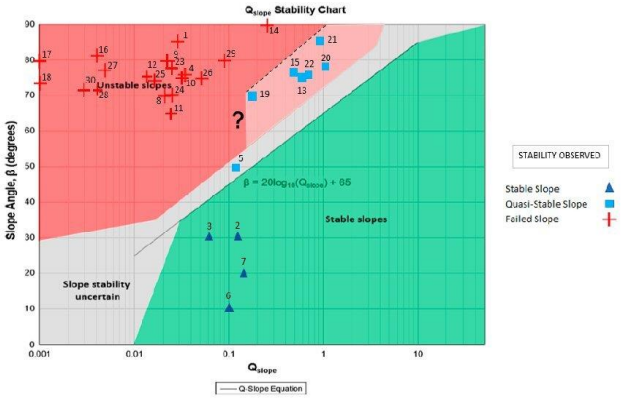


Figure 6. Modification proposal for limit lines separating stability categories. Plotted over the slope-angle and rock mass quality chart proposed by Barton and Bar (2017) with the results from Figure 5.

Considering the data obtained for slopes 13, 15, 19, 20, 21, and 22 in the present work, an extension to the area of "Slope stability uncertain" is proposed, and the door is also left open for new studies to determine the possible projection from the proposed area towards the lower part of the "Unstable slopes–slope stability un-certain" zone. The kinematic analysis does not consider rock mass quality but analyzes the equilibrium of rigid blocks that destabilize through one or more surfaces and slip on each other. In the 30 analyzed cases, failures occurred through discontinuities, and kinematic analysis was the best representation of reality. Although the friction angle and joint directions are not considered in the equation proposed by Barton and Bar (2015) (Equation (1)), these are necessary to validate the faults identified in situ, related to joint orientation and how slope faults are produced. This analysis enables the selection of a suitable O-factor, essential for Q-slope calculation. Based on the kinematic analysis, the amount of joint sets present can be ratified, and therefore, the value of Jn that represents the analyzed slope can be defined.

The main issue encountered when using the Q-slope index is the precise determination of the O-factor in those slopes affected by toppling failures. In addition, this O-factor is highly biased when quantifying slopes affected by toppling ruptures. The authors of the Q-slope method determined that applying the O-factor to toppling cases could consider the same criteria of planar and wedge cases. Still, in flexural and block toppling, the discontinuity and intersections dip inside the bedrock (180° more than direct planar failure). This suggests a revision is required when applying the O-factor to toppling (in Q-slope). With flexural toppling failure, there is just one joint set to be considered (as in planar failure), but the critical factor is slightly different. Direct or block toppling is infrequent because it involves three joint sets, of which two present an intersection dipping inwards between the rock mass and the basal plane. Regarding block toppling failure, the O-factor should consider the intersection pole of the two planes that delimit the corner. This intersection must dip towards the mountain. The O-factor should also consider the basal joint of the block in a similar approach to the kinematic assessment of planar failure. However, obtaining an O-factor value from the corner intersection or basal joint analyses is not recommended.

This research indirectly validates the Jwice and SRFa parameters by providing data collected at different altitudes or extreme topographic zones in very humid tropical and high mountain environments with ice. The results emphasize the need to determine the quality of the rock and the stress to which it is subjected (Jwice and SRFb parameters) when calculating the Q-slope. A relevant contribution presented herein is the statistical reliability assessment based on a confusion matrix to establish Q-slope's individual and general predictive precision, providing high metrics.

The analysis of the results obtained from the confusion matrix indicates that data confusion can be attributed to the current threshold for quasi-stable slopes in the Q-slope graph proposed by Barton and Bar in 2015. This zone presents conservative (considering safety) values between Q-slope values of 0.02 and 0.4 and slope angles between 35 and 84 on the Q-slope stability graph. This singularity in the Q-slope graph requires further research that enables the zone's broadening, as proposed by Jorda [19]. It must be highlighted that the six slopes that were not classified as quasi-stable by the Q-slope method and do not present evident field instability processes are located very close to the area of uncertain stability proposed by the authors of the method in 2015. The potential broadening of the zone of quasi-stable slopes would improve the confusion matrix metrics presented in this study, obtaining future results in favor of the empirical method studied herein.

6. Conclusions

Rock mass classifications have been successfully used worldwide for rock slope characterization for multiple reasons: effectiveness due to their connection with empirical methods and dissemination and communication across scientists, engineers, and the general public. In other words, rock mass classifications "put numbers to geology" [35]. The Q-slope method was applied herein in three natural regions of Ecuador—coast, mountains, and jungle—where igneous, sedimentary, and metamorphic rocks exhibiting different weathering conditions were found.

The result of the stability analysis using the Q-slope method determined that of the 30 slopes analyzed, 25 are in unstable conditions, 1 is almost stable, and 4 slopes are in stable conditions. The results demonstrated that instability processes occur for slopes starting at 61 degrees of inclination and 6 m high.

One of the main modifications implemented in the Q-method for its application to slopes is the shear strength, which, in our specific case, is obtained by multiplying the Jr/Ja ratio by the new O-factor. Nevertheless, when slopes that present toppling failures are studied, the method does not clearly establish the values to be considered for the O-factor (differently from the cases of planar and wedge failures). Therefore, future investigation is advisable to determine the O-factor values rigorously and accurately, especially for the toppling cases. The parameter could depend on the difference in strikes and dips between slope and joints, following the determination of the F1, F2, and F3 factors of the SMR correction.

Considering the values obtained and the metrics calculated for each class of statistical case a, it can be concluded that as sub-class 1 presents high values for precision and recall, the method can perfectly classify this sub-class. For sub-class 2, a high precision value is obtained with a low recall value; in this case, the method does not classify this class very well—however, when it does, it is highly reliable. For sub-class 3, the model provides a low precision value and a high recall value, which suggests that the method classifies the sub-class well but can also confuse the individuals of other sub-classes. The F1 score values obtained for each sub-class in the different statistical cases analyzed present values that range from 0.62 to 1, indicating that the Q-slope method is a balanced method that can confuse some cases as false but is also capable of correctly classifying all positive true cases, such as those of sub-class 1 of statistical case a. Only sub-class 2 of statistical case a returned an F1 score value of 0.25, which means that the model can confuse values as false for this specific case. Sub-classes 2 for statistical cases b and c present null values because the calculated FoS is a fixed value that only defines if the slope is stable or unstable. In these cases, a direct association could not be made between the quasi-stability obtained in situ and that predicted by the empirical method and FoS.

In general, considering that overall accuracy can be divided into quartiles, classifying quartile C1 as bad, C2 as intermediate, C3 as good, and C4 as very good, the value obtained for OA herein occupies the highest quartile, ranking the method as very good.

The results demonstrated the applicability and reliability of the Q-slope method in Ecuador. This Andean country can be considered a natural laboratory for geosciences because of its diversity in geological, geomorphological, and environmental conditions.

Author Contributions: Conceptualization, C.B.B., L.J. and R.L.; methodology, C.B.B. and L.J.; validation, C.B.B., L.J., R.L., R.T., M.C. and A.R.; formal analysis, L.J., R.T. and C.B.B.; investigation, C.B.B., L.J. and R.L.; writing—original draft preparation, C.B.B., L.J., R.L., R.T., M.C. and A.R.; writing—review and editing, C.B.B. and L.J.; supervision, C.B.B., L.J., R.L., R.T., M.C. and A.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was partially funded by the University of Alicante (vigrob-157 project), the Prometheus Project of the Secretariat of Higher Education, Science, Technology and Innovation of the Republic of Ecuador (for field data acquisition from 2014 to 2015), FCI Projects at the Faculty of Natural Sciences of University of Guayaquil, and by Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital in the framework of the project CIAICO/2021/335.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors are grateful to Roberto Chan and Marlon Cabrera at ESPOL for their assistance in gathering data along the Guayaquil slope. Thanks are extended to Rafael Jordá (Rudnik engineers, S.L.) and Ximena Robles for their collaboration in Coaque and Papallacta, respectively. Special thanks are given to RocscienceEducation version at ESPOL and the MSc and Ph.D. Students.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mech.* **1974**, *6*, 189–236. [CrossRef]
2. Bieniawski, Z.T. Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. In *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1989.
3. Pantelidis, L. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2009**, *46*, 315–325. [CrossRef]
4. Moon, V.; Russell, G.; Stewart, M. The value of rock mass classification systems for weak rock masses: A case example from Huntly, New Zealand. *Eng. Geol.* **2001**, *61*, 53–67. [CrossRef]
5. Romana, M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In Proceedings of the International Symposium on Role of Rock Mechanics, Zacatecas, Mexico, 2–4 September 1985; pp. 49–53. Available online: https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=253061 (accessed on 16 July 2022).
6. Laubscher, D.H. Geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* **1990**, *90*, 257–273. [CrossRef]
7. Barton, N.; Bar, N. Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. In Proceedings of the ISRM Regional Symposium, EUROCK 2015, Salzburg, Austria, 7–10 October 2015; pp. 157–162.
8. Bar, N.; Barton, N. The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mech. Rock Eng.* **2017**, *50*, 3307–3322. [CrossRef]
9. Romana, M.; Tomás, R.; Serón, J.B. Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: Thirty years review. In Proceedings of the 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, Montreal, Canada, 10–13 May 2015; pp. 1–10.
10. Tomás, R.; Romana, M.; Serón Gáñez, J.B. Review of the Current Status of the Geomechanic Classification Slope Mass Rating (SMR). *Bol. Soc. Española Mecánica Suelos Ingeneiría Geotécnica* **2017**, *190*, 25–32. Available online: http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/70953 (accessed on 20 September 2022).
11. Azarafza, M.; Nanehkaran, Y.A.; Rajabion, L.; Akgün, H.; Rahnamarad, J.; Derakhshani, R.; Raoof, A. Application of the modified Q-slope classification system for sedimentary rock slope stability assessment in Iran. *Eng. Geol.* **2020**, *264*, 105349. [CrossRef]
12. Siddique, T.; Pradhan, S.P.; Vishal, V.; Singh, T.N. Applicability of Q-slope Method in the Himalayan Road Cut Rock Slopes and Its Comparison with CSMR. *Rock Mech. Rock Eng.* **2020**, *53*, 4509–4522. [CrossRef]
13. Yellas, C.; Benzaid, R.; Tekkouk, M. Application of classification systems for the assessment of rock mass stability—Case of national road 43, Jijel, Algeria. *Arab. J. Geosci.* **2021**, *14*, 203. [CrossRef]
14. Umrao, R.K.; Singh, R.; Ahmad, M.; Singh, T.N. Stability Analysis of Cut Slopes Using Continuous Slope Mass Rating and Kinematic Analysis in Rudraprayag District, Uttarakhand. *Geomaterials* **2011**, *1*, 79–87. [CrossRef]

15. Siddique, T.; Masroor Alam, M.; Mondal, M.E.A.; Vishal, V. Slope mass rating and kinematic analysis of slopes along the national highway-58 near Jonk, Rishikesh, India. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* **2015**, *7*, 600–606. [CrossRef]
16. Bar, N.; Barton, N.R. Empirical slope design for hard and soft rocks using Q-slope. In Proceedings of the 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Houston, TX, USA, 26–29 June 2016; Volume 2, pp. 1301–1308.
17. Bar, N.; Barton, N. Q-slope: An empirical rock slope engineering approach in Australia. *Aust. Geomech. J.* **2018**, *53*, 73–86.
18. Bar, N.; Barton, N. Rock slope design using q-slope and geophysical survey data. *Period. Polytech. Civ. Eng.* **2018**, *62*, 893–900. [CrossRef]
19. Jordá-Bordehore, L. Application of Q slope to Assess the Stability of Rock Slopes in Madrid Province, Spain. *Rock Mech. Rock Eng.* **2017**, *50*, 1947–1957. [CrossRef]
20. Wyllie, D.C.; Mah, C.W. Rock slope engineering: Civil and mining. In *Rock Slope Engineering*, 4th ed.; CRC Press: London, UK, 2017. [CrossRef]
21. Hoek, E.; Bray, J. *Rock Slope Engineering*, 3rd ed.; Institution of Mining and Metallurgy: London, UK, 1981.
22. Jorda, L.; Tomás, R.; Rodriguez, M.A.; Abellan, A. *Manual de Estaciones Geomecánicas*; Universidad Politécnica de Madrid: Madrid, Spain, 2016; p. 208.
23. UNESCO. Galapagos Biosphere Reserve, Ecuador. 1976. Available online: https://en.unesco.org/biosphere/lac/galapagos (accessed on 16 July 2022).
24. Wolf, T. *Geografía y Geología de Ecuador*; Brockhaus, F.A., Ed.; Leipzig: Alicante, Spain, 1892. Available online: http://files.bernardo-servin-massieu.com/200000059-af10bb00a5/tabasco.pdf (accessed on 10 January 2021).
25. Jordá-Bordehore, L.; Tomás, R.; Cano, M.; Riquelme, A. Evaluación de la calidad geomecánica de taludes inestables en la zona andina mediante la aplicación de la clasificación Slope Mass Rating. In Proceedings of the 10° Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica, A Coruña, España, 19–21 October 2016; Volume 1, pp. 313–320. Available online: https://www.researchgate.net/publication/309611438_Evaluacion_de_la_calidad_geomecanica_de_taludes_inestables_en_la_zona_andina_mediante_la_aplicacion_de_la_clasificacion_Slope_Mass_Rating (accessed on 29 January 2021).
26. Barton, N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2002**, *39*, 185–216. [CrossRef]
27. Barton, N.; Grimstad, E. Tunnel and cavern support selection in Norway, based on rock mass classification with the Q-system. *Nor. Tunn. Soc.* **2014**, *23*, 39. Available online: https://www.researchgate.net/publication/321874893_Tunnel_and_cavern_support_selection_in_Norway_based_on_rock_mass_classification_with_the_Q-system (accessed on 29 January 2021).
28. Bar, N.; Barton, N.R.; Ryan, C.A. Application of the Q-slope method to highly weathered and saprolitic rocks in Far North Queensland. In Proceedings of the ISRM International Symposium—EUROCK, Ürgüp, Turkey, 29–31 August 2016; Volume 1, pp. 585–590. [CrossRef]
29. Rocscience. 2D and 3D Geotechnical Software | Rocscience Inc. 2019. Available online: https://www.rocscience.com (accessed on 15 June 2021).
30. Mikola. Roozbeh Geraili Mikola—Codes & Demos. 2018. Available online: http://www.roozbehgm.com/codes.html (accessed on 20 September 2022).
31. Visa, S.; Ramsay, B.; Ralescu, A.L.; Van Der Knaap, E. Confusion Matrix-based Feature Selection. In Proceedings of the 22nd Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference 2011, Cincinnati, OH, USA, 16–17 April 2014. Available online: https://www.researchgate.net/publication/220833270_Confusion_Matrix-based_Feature_Selection (accessed on 19 July 2022).
32. Beauxis-Aussalet, E.H.L. Simplifying the Visualization of Confusion Matrix. In Proceedings of the BNAIC—Benelux Conference on Artificial Intelligence, Nijmegen, The Netherlands, 6–7 November 2014. Available online: https://www.researchgate.net/publication/302412429_Simplifying_the_Visualization_of_Confusion_Matrix (accessed on 17 July 2022).
33. Stehman, S.V. Selecting and Interpreting Measures of Thematic Classification Accuracy. *Remote Sens. Environ.* **1997**, *62*, 77–89. Available online: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425797000837 (accessed on 20 September 2022). [CrossRef]
34. Yacouby, R.; Axman, D. Probabilistic Extension of Precision, Recall, and F1 Score for More Thorough Evaluation of Classification Models. In Proceedings of the First Workshop on Evaluation and Comparison of NLP Systems 2020, Online, November 2020; pp. 79–91.
35. Hoek, E. Putting numbers to geology—An engineer's viewpoint. *Q. J. Eng. Geol.* **1999**, *32*, 283–293. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

3.3. Artículo 2 – Application of the Kinematic Assessment of Multi-faced Slopes Using Stereographic Projection: The Case Study of a Planar Failure on the Spondylus Coast, Ecuador

applied sciences

MDPI

Article

Application of the Kinematic Assessment of Multi-faced Slopes Using Stereographic Projection: The Case Study of a Planar Failure on the Spondylus Coast, Ecuador

Cesar Patricio Borja Bernal [1,2,*] and Luis Jordá Bordehore [3]

[1] ETSI Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, Calle de Ríos Rosas, 21, 28003 Madrid, Spain
[2] Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Av. Raúl Gómez Lince s/n y Av. Juan Tanca Marengo, Guayaquil 090601, Ecuador
[3] Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain; l.jorda@upm.es
* Correspondence: cesar.borjab@ug.edu.ec

Abstract: This manuscript presents a relevant practical application of the stability analysis of multi-face slopes that uses the concept of the restricted daylight envelope in multi-faced slopes (MFS). The methodology was applied to the back analysis of a case study of a failed slope in mudstones and sandstones on the Spondylus coast in Ecuador. The instabilities analyzed included several rock cliffs with dihedral rock faces in mudstones. It is interesting to analyze the failure mechanism of these natural coastal slopes because, on the Spondylus coast, several hotels and tourist spots are located near the upper parts of some similar regions. The stereographic projection methodology can simulate complex geometries and simplify the analysis.

Keywords: sliding; coast; geotechnics; cliff stability; kinematic assessment

Citation: Borja Bernal, C.P.; Jordá Bordehore, L. Application of the Kinematic Assessment of Multi-faced Slopes Using Stereographic Projection: The Case Study of a Planar Failure on the Spondylus Coast, Ecuador. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 8245. https://doi.org/10.3390/app13148245

Academic Editors: Helin Fu, Zhen Huang and Jiabing Zhang

Received: 14 May 2023
Revised: 3 July 2023
Accepted: 8 July 2023
Published: 16 July 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction and Scope

Stereographic projection methods have been widely extended to slope analysis in jointed rocks and the possible failure modes [1] since the first studies by Markland in 1972 [2] and John in 1968, 1972 [3,4]. Although 40 years have passed since these works were published and powerful computer tools have been developed, stereographic projection in block kinematic analysis is still current. Stereographic projection allows a quick view of the possible failure modes of the slope, such as planar, wedge, and toppling, and reduces the analyzed elements to one dimension: planes to curves, straight lines to points, etc. This research focuses on an analysis of the three-dimensional geometry of slopes with several faces, which has not been much studied in the literature [1].

Most kinematic analyses of rock slopes only consider the fact that the slope face has a constant strike (single-faced SFS) [5]. In 2002, Yoon et al. [5] introduced the concept of and kinematic criterion for multifaceted (also known as multi-faced) slope MFS failure in an intuitive and highly effective way by focusing on the analysis of planes and vectors, not on the pole criterion, which is the most common method [1].

"In stereographic projection, the sliding envelope of a multi faced slope (MFS) is the union of single-face envelopes formed on the surface of the slope" (Yoon et al. [5]). Jordá-Bordehore et al. [1] proposed to combine the methodology for multi-faced slopes [5] with the most usual approach for the kinematic assessment of single-faced slope daylight envelope and pole analysis [6,7].

The aim of this research is to show a real case of a failed slope for which the stability assessment can only be explained using a methodology that unifies the traditional criteria for rock–slope analysis based on poles [6–9] with the conclusions of the work of Yoon et

al. [5] for MFS, where the criteria for instability were defined using the representation of the poles of the plane approach. The unstable sector in stereographic projection is defined using poles and daylight envelopes [1] instead of planes [5]. The conventional kinematic analysis using constant-strike slopes cannot explain or assess this case. The suggested methodology for the back analysis is effective in explaining the mechanism of planar failure of real slopes, for example, the slate rocks on the Manta coast of Ecuador, and can be extrapolated to other slopes on the Spondylus coast, many of which are typical situations of multi-faced slopes (MFS). The coast of Ecuador, like other coasts with outcrops of marked stratification (Flysch de Zumaia in Spain), presents inlets and outlets, the analysis of which can be approached with the MFS methodology that we propose in this work. There are few studies on the kinematic stability of rocky slopes in Ecuador [10–12]. This work reinforces the database and the methodology proposed by Yoon et al. [5] for the Andean zone.

The stability of rock slopes in superficial situations in relatively competent rock masses is usually controlled by the equilibrium of the blocks that form them. This equilibrium is normally studied using kinematic assessment methods that only consider the friction of the most relevant joints and their orientation with respect to the slope. The main contribution and objective of this study is to apply the aforementioned approach to a real slope and verify its effectiveness. It is important to note that this is the first application of this methodology in the Andes, a mountain range with complex slope stability problems, many of which are difficult to model. This study demonstrates that this methodology can be an effective stability methodology.

2. Materials and Methods

The study site is a representative area of the type of failure to be analyzed. Along the coast of Ecuador, in such places as Montañita, Olón, and Ayangue, we find coastal cliffs with stability problems linked to the erosion of the waves and tides at the foot of the cliffs. To adequately analyze the failure mechanism, it is necessary to understand that many landslides are produced through stratification with tensile cracks in vertical slopes, but that the classic models do not fit reality well enough because they consider the slope in the form of a two-dimensional section. This presents a real problem in three dimensions. Conducting MFS slope studies using 3D models sometimes requires computer programs that are not yet accessible to many researchers. The methodology proposed in this work is accessible since it utilizes stereographic projection and reduces the problem to one less dimension. To show the effectiveness of the methodology, we have chosen a test site where the typology is easily identified and represents the difficult approach ofYoon et al. [5] in a very didactic way.

The analysis of interactions between discontinuity planes and slopes is extremely complex to solve using 3D models and isometric projection but is considerably simplified with stereographic projection [1]. We refer the reader to the bibliography for information on stereographic and kinematic assessments of rock slopes, especially using the MFS approach as detailed in Yoon et al. [5] and Jorda et al. [1]. The main idea of the methodology is to use the usual criteria in kinematic analysis for locating poles or planes in some areas of the stereogram that meet the instability conditions. Any pole or crossing of planes that fall in this zone implies kinematic instability between these fractures and the slope. What the MFS methodology does is expand the area known as the “restricted daylight envelope” by considering the slope not as a single plane but as a curved surface that can be simplified as an envelope that spans from one tangent plane to another passing through the tip or “nose” of the concave slope.

The back analysis methodology has been applied in the following way: the model must be equivalent to reality, and when a slope has failed, the model must indicate a safety factor ≤ 1. Normally, we assign joint strength parameters according to various approaches, whether empirical, laboratory, or a combination of both. In this case, we have reconstructed what slopes and detached blocks looked like in their initial situation before the

failure. If the analysis or calculation indicates a safety factor greater than unity (or the stable zone of the stereogram), then that means that our calculation is not realistic, and we therefore have to modify the resistance parameters of cohesion or friction until the result comes out to a safety factor of 1, or within the limit of the unstable zone of the stereogram.

The discontinuity friction angle is necessary to draw the friction circle; indeed, it is required in all kinematic analyses via stereographic projection. Friction (φ) is obtained from the Barton–Bandis failure criterion and onsite mapping [13–15].

3. Study Site

The study site is on the "Spondylus" coast of Ecuador (Figure 1), characterized by detritic sedimentary formations: siltstones, sandstones, and volcanosedimentary units. The cliffs in these materials show degradation processes, instability, and failures. The typical cliff failures at the study sites are summarized in Figure 2. The failed slope that we analyzed is located at a site named Punta Barbasquillo in the coastal city of Manta. It is a corner formed by a two-faced slope, and it shows a combination of planar sliding and toppling failure.

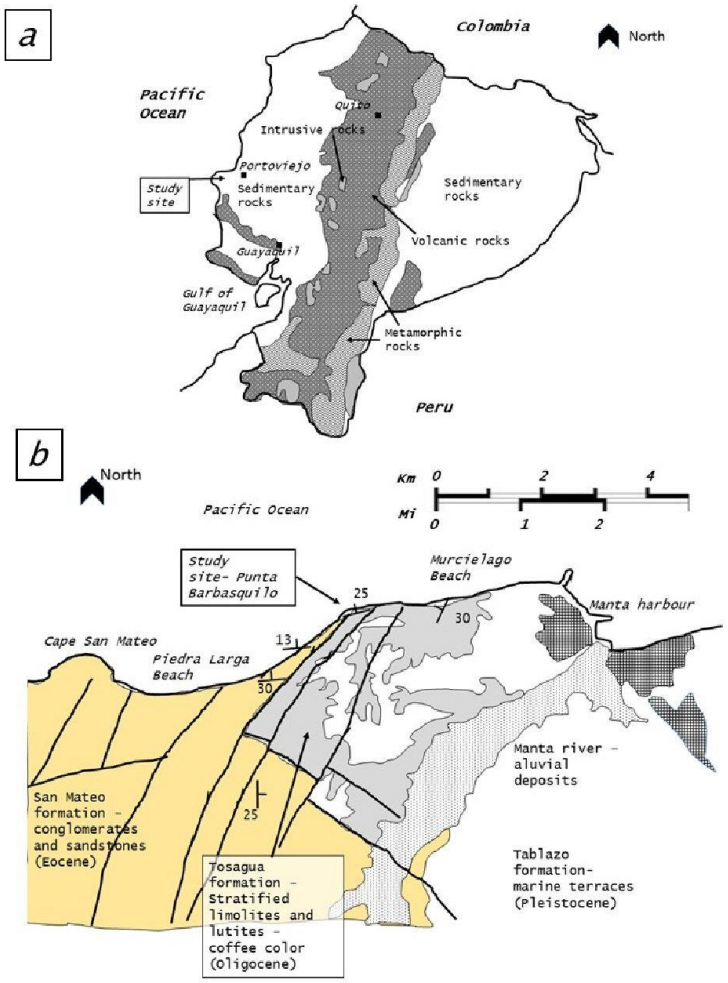


Figure 1. Lithologies of Ecuador (**a**) and geological context of the Manabi–Manta coast (**b**).

Figure 2. Panoramic view of Manta's coastline and its main types of rock cliffs: Images (**a**,**b**) hotels and buildings on top of the coast cliff, (**c**,**d**) show the basal strata, (**e**) shows relevant joints and (**f**) is the "Punta Barbasquillo.

Figure 2a shows Punta Barbasquillo, vertical slopes, and dipping mudstone strata between 25 and 40°. Figure 2b,d are located on Piedra Larga Beach, where there is shallow-dipping stratification and cliffs with medium-dipping slopes with many circular failures. Playa Murciélago (bat) beach (Figure 2c) is in a part of Manta's coast where many hotel constructions and foundations are located over the unstable cliffs but far enough from the scarp limit; in some cases, reinforcement of the cliff has been accomplished. We note the alternation of mudstones and more compact siltstones affected by normal faults in Figure 2e and the difference in resistance between the cliff and the beach (Figure 2f).

4. Results

4.1. Observational Results

The study area is located at Barbasquillo Cape (Manta, Ecuador), which is a cliff with inlets and outlets parallel to the coastThere are usually two or more vertical joints as well as a sub-horizontal stratification (S0) that is usually the sliding surface of planar failures. There are also many toppling failures due to vertical normal faults (Figures 2 and 3). Some tension cracks are "new," while others have developed following existing normal faults.

Figure 3a shows a typical failure mode in the cliffs of Piedra Larga Beach near Barbasquillo Cape. There are often circular failures through the rock mass, beginning in tension cracks (previous faults). These circular failures through the rock mass typically occur when the rock strength is very low, and they are not usual when blocks are formed in competent rock massifs. The tide line can undermine the toe of these cliffs, but it is not common. More often, the low tide exposes an extensive rocky platform of competent rock, as in Figure 2f. The failed rock mass is easily eroded, and in a short time, it is disintegrated by the action of the waves and tides (Figure 3(a-2)). The instabilities continue inland in an iterative process, and the cliffs gradually lose slices (Figure 3(a-3)).

This process of the unraveling of the slabs and the collapse of the cliff is something normal and habitual on the Spondylus Coast of Ecuador. The key point is to interpret how far it can progress in a determined period so that it does not affect infrastructure and houses located in the upper part of the coastline. The presence of tensile cracks associated with vertical structural domains is one of the most important mechanisms controlling the progression and stability of the cliff.

Figure 3b shows schematically the most typical failure mode in the Barbasquillo Cape area and Murcielago (bats) Beach. The failure process in those locations is a combination of planar sliding and toppling. The marine erosion of the lower part of the cliff and the detachment of some toe slices collaborate to trigger the cliff failure process. Depending on the case, this can be toppling, sliding, or a combination of both. In the case of stratification dipping more than 35°, the failure process is mainly planar, and vertical joints act as tension cracks (Figure 2b,f). Once the slice is detached (Figure 3b), the remaining cliff face angle is normally 90°, but it can also overhang at 110–120°, with a clear toppling tendency. Figure 3 summarizes the process leading to the failure scheme of Figure 2f.

Figure 2e highlights a normal fault in mudstones and siltstones. These vertical joints and faults collaborate to trigger cliff instabilities depending on the orientation and dip of the rock face. Figure 2b,f show horizontal strata with layers with diverse grades of resistance to weathering.

Figure 2d shows the beginning of the eroding process of a competent but fractured rock mass. These zones, when exposed to the iterative effects of sea waves and tides, form holes on the base part of the cliffs. This can trigger toppling failures and the filling with water and weathering of joints in planar failures. Figure 2c indicates the opposite phenomenon, that is, the lower part of the cliff is more resistant than the upper parts, causing extended horizontal platforms (Figure 2f). The image in Figure 2f is a transition between failure modes of Figure 3a,b where it is possible to notice a clear structural component in the sliding through the dipping stratification S0 to the sea. Over that plane, failure can be of three types, depending on the resistance and weathering of the rock mass of the cliff: (1) planar failure with tension crack; (2) toppling; and (3) circular failure through the rock mass.

The wide-platform beach, which can be seen in many cases (see Figure 2b,c), comprises a level of strong mudstone and sandstone just over the tide line, and these strata dip almost horizontally. In the areas where this platform dips 30–40 degrees, the morphology is that of a ridge of sharp escarpments (Figure 3b).

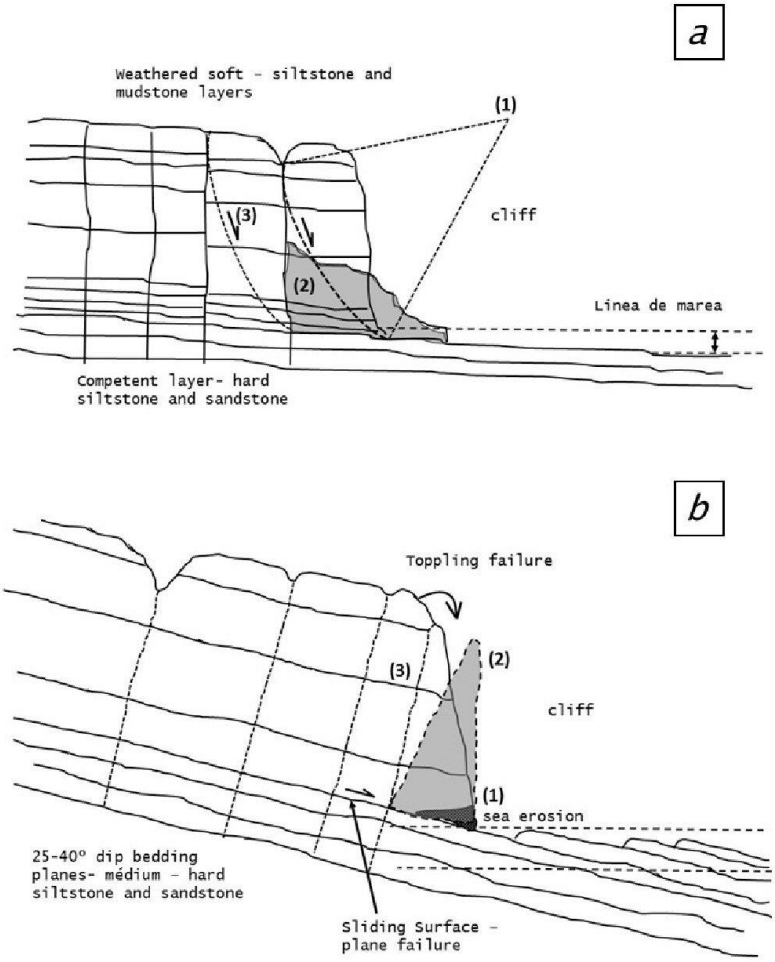


Figure 3. Scheme showing typical failure modes on Piedra Larga Beach (**a**) and Barbasquillo (**b**).

In Figure 3a, it is possible to notice a scheme showing a circular sliding mode and degradation of the weathered terrain and low-quality geomechanical properties on Piedra Larga Beach. In Figure 3a, (1) indicates the center of a circular failure, 2 and 3 progressive failure surfaces. Figure 3b shows a schematic of the rupture process in the cliff and the kinematic failures of block toppling and/or planar sliding in Punta Barbasquillo. In Figure 3b, (1) indicates the lower soft layer easily eroded, (2) is the detached block and (3) the final cliff coastline.

4.2. Planar Failure in the Two-Faced Cliff of Punta Barbasquillo Cape in Manta (Ecuador)

The slope of Figure 4 is the subject of the present study and is a combination of planar sliding and toppling of strata triggered by a set of subvertical discontinuities dipping inland. Barbasquillo Punta (Cape) is a very characteristic planar failure sliding through the stratification. The failure surface does not reach the upper-horizontal part of the cliff because of its low continuity and persistence. It is cut by a vertical fault and some more conjugated joints that delimit a unique block of some cubic meters in volume (Figure 4). This block fell in precedent times and has been completely removed by sea action—

erosion and weathering. The peculiarity of this cliff is that it has a dihedral shape similar to a "nose". This falls under the category of two-faced slopes (see methodology in [1,5]), with the left side of the "nose" watching the cliff from the sea—the left-side slope (LS) has a dip direction of N 050° E and a dip of 70°. The right side (RS) has a dip direction of N 365 E and dips around 70° (Figure 4).

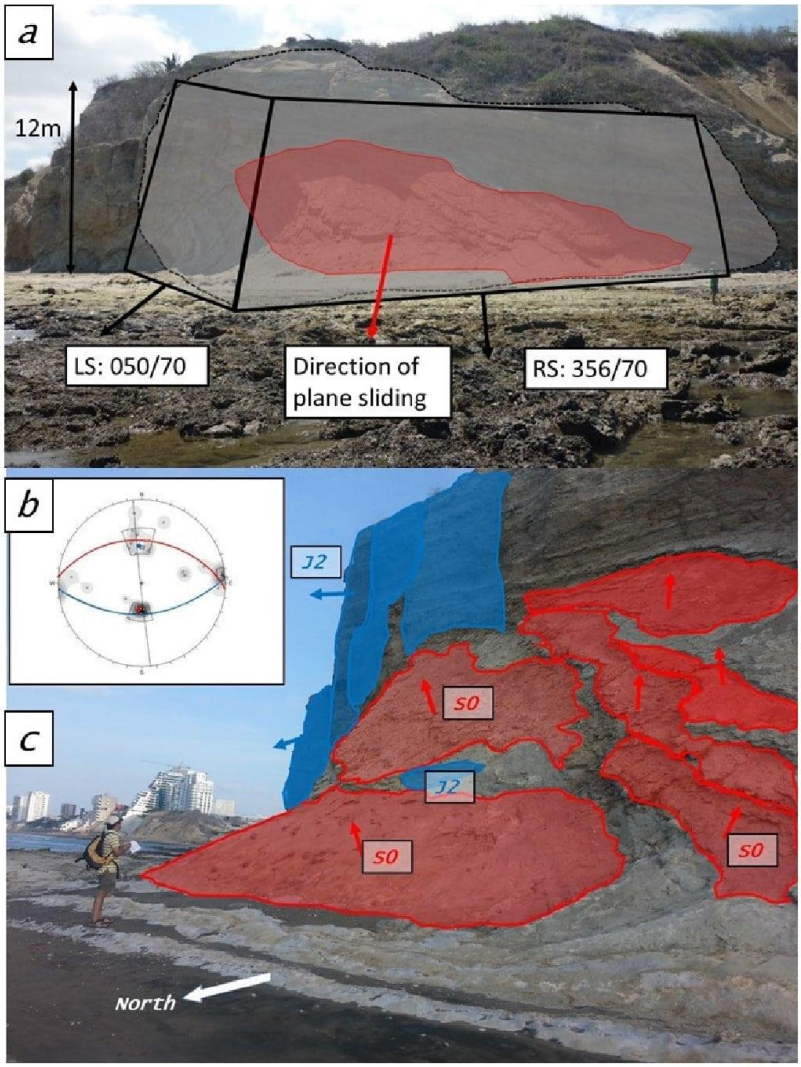


Figure 4. Scheme of Punta Barbasquilo before (**a**) and after the slope failure (**c**). Image (**b**) shows the stereogram of the slope and main joint set.

Figure 4a shows Punta Barbasquillo Beach before the cliff failure. Figure 4b is the stereographical representation of the main joints, while Figure 4c is the actual situation indicating the main joint sets determined on the two-faced slope of Barbasquillo. In Figure 4, stratification, or S0, is shown in red, and the joint set named J2, which forms the tension crack and induces the progressive strata toppling, and the third joint set, J1, vertical and minor, are shown in blue.

4.3. Kinematic Assessment

The main join sets are summarized in Table 1, which have been recognized in the geomechanical station (that is, an in situ geomechanical data and parameter observation point) in the back analysis of the failed slope. The field strength of discontinuities (C, φ) was assessed using the Barton–Bandis [13,14] criterion and in situ data (Schmidt hammer, JRC Barton's comb, etc.). An evaluation of the resistance of the joints has been proposed using parameters that can be obtained in the field without carrying out laboratory tests. For this reason, within the input of the Barton–Bandis criteria, a purely field methodology has been chosen to obtain the joint resistance and roughness.

Table 1. Joint sets in the slope analyzed in Punta Barbasquillo.

Join Set	Kind of Joint	Dip Dir (Degrees)	Dip (Degrees)	K Fisher Statistical Distribution	Joint Cohesion and Friction
S0	Stratification-sliding surface	004°	36°	106	C = 0 φ =34°
J1	Joint	264°	88°	2816	
J2	Joint—tensión crack	176°	50°	38	

The two front faces of the slope as well as the main joint sets were represented using stereographic projection (Figures 5 and 6). The results of the kinematic assessment indicate that the slope was unstable. The instability can be observed in the joint S0 poles located inside the restricted daylight envelope (Figure 5). The toppling risk that could exist in the cliff before the planar failure was analyzed using projection (see Figure 7). The potential toppling of J2 towards the left (LS) and right (RS) sides of the cliff was also analyzed. The kinematic assessment shows a potential but not important risk: the pole of the joint J2 is not inside the daylight envelope but very close to the limit zone. The J2 should therefore be considered a tension crack. Once planar sliding has occurred, the new slope face overhanging the vertical could trigger both block and flexural toppling (Figure 7b), as can be concluded from the new and wider daylight pole envelope.

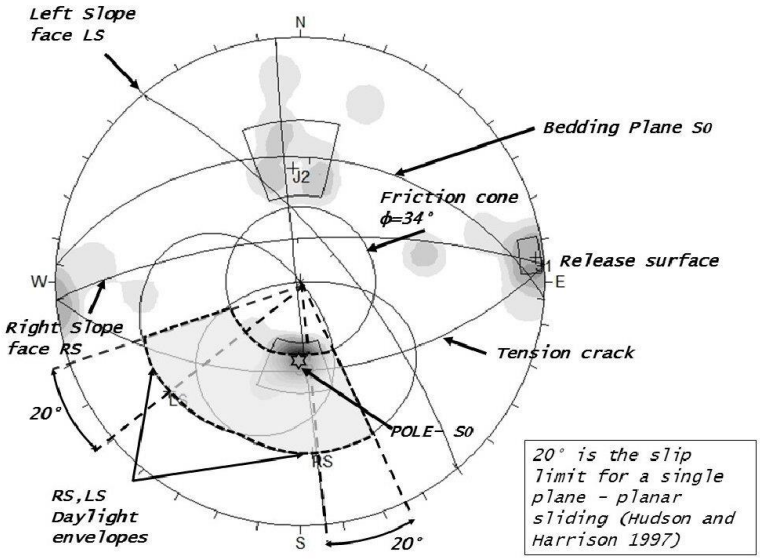


Figure 5. Stereographic representation of the joints and planes existing in the Barbasquillo slope using DIPS software [16].

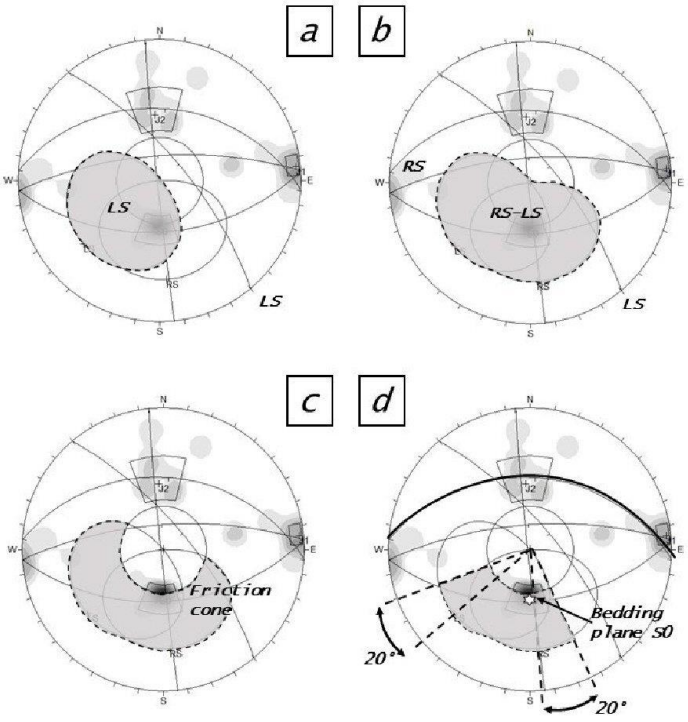


Figure 6. Process to design the restricted daylight envelope for a double-face slope **Right** and **Left** (RS-LS) following the Jorda et al. [1] methodology. Images (**a**,**b**) show the daylight envelope construction; image (**c**) is the intersection with the friction cone and (**d**) is the "restricted daylight envelope" with the lateral limits for planar failure.

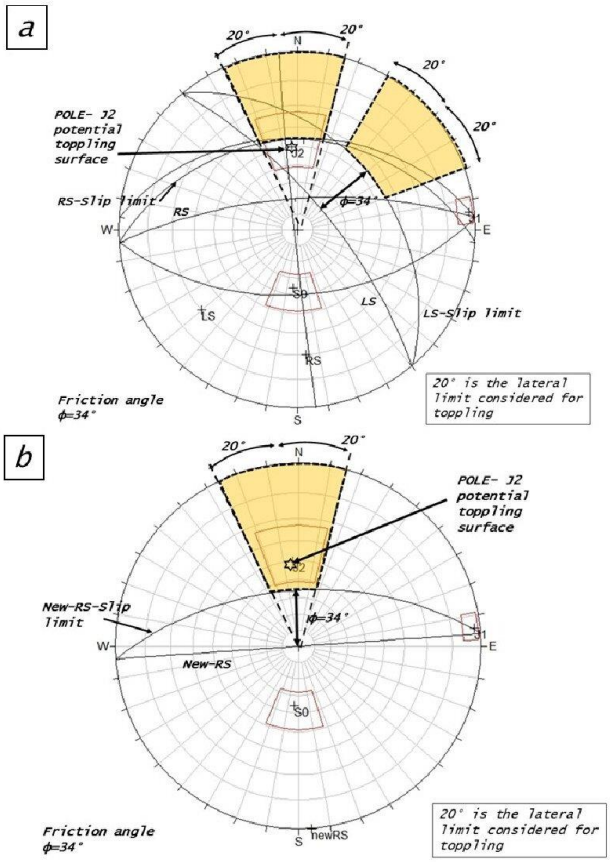


Figure 7. Stability assessment stereoplot before and after the Barbasquillo cliff's progressive failure. Image (**a**) shows the actual potential toppling failure for the right and left sides of the cliff: the slope dip angle is 70 degrees. Image (**b**) shows an unstable J2 joint because the pole falls into the yellow envelope: that was the initial situation when the cliff was vertical (90 degrees dip).

Figure 6a shows the daylight envelope for a single-face LS (Left Side). In Figure 6b, the expanded daylight envelopes for both left and right faces (LS-RS) are shown, while in Figure 6c, it is proposed that the daylight envelope is restricted by the friction cone. The pole of the bedding plane is inside the restricted daylight envelope, so the plane should be considered unstable, as can be deduced by the slope slide failure.

Figure 7a shows the stereoplot assessment of the potential toppling risk in Barbasquillo before the planar sliding. Figure 7b shows the stereoplot assessment of the potential toppling risk in Barbasquillo on the RS slope face in the present situation after planar sliding has occurred.

5. Discussion

We carried out a back analysis of a failed multi-face (MFS) round convex slope. The MFS approach, which combines a multi-face approach and a restricted envelope for poles, can reflect the actual situation and process of the unstable cliff. Often, "real" unstable cliffs show complex geometries such as double-, multi-, or even round-face slopes. These cases can be analyzed by Hemispherical Projection Methods (HPMs) and the kinematic analysis method proposed by Markland [2] and John [3,4]. The analysis of envelopes in the

kinematic approach is an efficient and visually very fast way of knowing whether or not a fracture or set can pose a stability problem on a slope in joined rock masses.

In this manuscript, all the slopes are natural cliffs that have suffered collapse, landslides, and progressive toppling controlled by discontinuities. The particularity of the study is the analysis of clearly three-dimensional geometries through stereographic projection. This methodology is clearly applicable to road-cut slopes since it is effective on high mountain routes with many curves.

6. Conclusions

This work is one of the few applications of the multi-faced slope (MFS) kinematic analysis methodology of Yoon et al. [5], together with that of Jordá et al. [1], and the only one to date in South America. It also reinforces the idea of aligning the technique with [12,13]; in these works poles are used instead of planes. [5].

Although it may seem complicated and not very intuitive, representing multi-faced slopes (MFS) in stereography greatly simplifies complex situations. It also allows a quick and effective analysis of an unstable situation. The alternative to this approach is that of models and numerical codes of discontinuities and fractured media, which are not very user friendly and extremely time-consuming. These methods are ineffective for the purpose of this study and for the typology of kinematic breaks clearly identifiable with a stereographic model. In addition, stereographic slope models allow you to easily design a stable slope simply by modifying its slope and seeing the result immediately on the stereogram. The methodology developed and applied here has multiple applications on variable-geometry slopes and curved faces. Among others, we find this type of situation on mountain roads that contour geological structures, and it is also very frequent on coastal cliffs, in river canyons, and in mountain gorges.

The MFS kinematic approximation is sufficiently conservative and yields reliable results, simulating complex realities in a simple and accurate way. Future lines of research may be aimed at other types of slopes in order to expand the method's database.

Author Contributions: Conceptualization, C.P.B.B. and L.J.B.; methodology, L.J.; validation, L.J.B. and C.P.B.B.; formal analysis, L.J.B.; investigation, C.P.B.B. and L.J.B.; writing—original draft preparation, C.P.B.B. and L.J.B.; writing—review and editing, C.P.B.B. and L.J.B.; visualization, L.J.B.; supervision, L.J.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Jordá-Bordehore, L.; Jordá-Bordehore, R.; Romero-Crespo, P.L. Kinematic assessment of multi-face round slopes using hemispherical projection methods (HPM). *Soils Rocks* **2016**, *39*, 167–176. Available online: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85021016216&partnerID=40&md5=28a6c438faa7b680ecced3520cf1509c (accessed on 7 July 2023).
2. Markland, J.T. A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imp. Coll. Rock Mech.* **1972**, *10*, 10.
3. John, K.W. Graphical stability analysis of slopes in jointed rock. *J. Soil Mech. Found. Div.* **1968**, *94*, 497–526.
4. John, K.W. Graphical Methods for Slope Stability Analysis. In *Rock Mechanics. International Centre for Mechanical Sciences*; Springer: Vienna, Austria, 1972; pp. 221–239.
5. Yoon, W.S.; Jeong, U.J.; Kim, J.H. Kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes. *Eng. Geol.* **2002**, *67*, 51–61. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00144-8.
6. Hudson, J.; Harrison, J. *Engineering Rock Mechanics—An introduction to the principles*; Pergamon, E., Ed.; Imperial College: London, England, 1997.

7. Wyllie, D.C.; Mah, C.W. *Rock Slope Engineering. Civil and Mining*; CRC Press: New York, NY, USA, 2004.
8. Lisle, R.J. Calculation of the daylight envelope for plane failure of rock slopes. *Geotechnique* **2004**, *54*, 279–280. https://doi.org/10.1680/geot.2004.54.4.279.
9. Lisle, R.J.; Leyshon, P.R. *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2004; ISBN 0521535824.
10. Delgado-Reivan, X.; Paredes-Miranda, C.; Loaiza, S.; Echeverria, M.D.P.V.; Mulas, M.; Jordá-Bordehore, L. Stability Analysis of Rocky Slopes on the Cuenca–Girón–Pasaje Road, Combining Limit Equilibrium Methods, Kinematics, Empirical Methods, and Photogrammetry. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 862. https://doi.org/10.3390/rs15030862.
11. Villalta Echeverria, M.D.P.; Viña Ortega, A.G.; Larreta, E.; Romero Crespo, P.; Mulas, M. Lineament Extraction from Digital Terrain Derivate Model: A Case Study in the Girón–Santa Isabel Basin, South Ecuador. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 5400. https://doi.org/10.3390/rs14215400.
12. Flor-Jiménez, M.; Avilés-Moran, H.; Villalta-Echeverría, M.; Murillo-Lozano, I.; Escobar-Segovia, K.; Mulas, M. Geotechnical and structural characterization of the Ignimbritas of the Saraguro group in the sector of Santa Isabel-Pucará, Ecuador [Caracterización geotécnica y estructural de las Ignimbritas del grupo Saraguro en el sector de Santa Isabel-Pucará, Ecuado]. In Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, Montego Bay, Jamaica, 24–26 July 2019.
13. Barton, N.; Bandis, S. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In Proceedings of the Rock joints: Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 4–6 June 1990; pp. 603–610.
14. Barton, N.; Bandis, S. EFFECTS OF BLOCK SIZE ON THE SHEAR BEHAVIOR OF JOINTED ROCK. In Proceedings of the Proceedings—Symposium on Rock Mechanics, Berkeley, CA, USA, 25–27 August 1982; pp. 739–760. Available online: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0020287706&partnerID=40&md5=5d336118bb29748ae5eee8962f78b3ca (accessed on 7 July 2023).
15. Bordehore, L.J.; Riquelme, A.; Cano, M.; Tomás, R. Comparing manual and remote sensing field discontinuity collection used in kinematic stability assessment of failed rock slopes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2017**, *97*, 24–32. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.06.004.
16. *Dips Version 5.0 Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data*; Rocscience Inc.: Toronto, ON, Canada, 2001. Available online: www.rocscience.com (accessed on 7 July 2023).

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

3.4. Artículo 3 – Application of the Q-Slope Empirical Approach for Slope Stability Assessment of Spanish Mountain Roads in Winter—Combining Remote Techniques with Virtual Reality

sustainability

MDPI

Article

Application of the Q-Slope Empirical Approach for Slope Stability Assessment of Spanish Mountain Roads in Winter—Combining Remote Techniques with Virtual Reality

Cesar Patricio Borja Bernal [1,2] and Luis Jordá Bordehore [3,*]

[1] E.T.S. Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, Ríos Rosas, 21, 28003 Madrid, Spain; cesar.borjab@ug.edu.ec
[2] Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Av. Raúl Gómez Lince s/n y Av. Juan Tanca Marengo, Guayaquil 090514, Ecuador
[3] Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain
* Correspondence: l.jorda@upm.es

Abstract: The Q-slope (2015) geomechanical classification is the only empirical methodology for slope stability analysis that considers the effect of ice. This article shows the results of its application for icy slopes in Spain. Despite its sunny image, Spain is a mountainous country with cold winters. Slopes alongside a mountain road and a ski resort carpark have been studied in Puerto de Navacerrada (Madrid region) and Benasque (Pyrenees). This work combines the manual collection of geomechanical data on slope characteristics with an empirical analysis of slope stability and remote data acquisition techniques (Structure from Motion, SfM). The results of the field data collection are shown in a metaverse with two approaches: a 360° image virtual tour and a 3D image repository. One of the novelties of this work is that researchers who wish to replicate these analyses can access a table of input parameters and make a virtual field trip to see the parameters included in this study. The results show that the Q-slope methodology is useful for stability analysis and is conservative in terms of recommendations: All the slopes that are seen as unstable appear as such, but some slopes that do not present problems are shown as "transitional" slopes. The data and observations taken are useful for increasing the methodology database and for completing existing graphs of stable vertical slopes with good quality, as well as slopes with little slope and low quality.

Keywords: photogrammetry; metaverse; structure from motion; mountain; ice; rock mass classification; slope analysis

check for updates

Citation: Bernal, C.P.B.; Jordá Bordehore, L. Application of the Q-Slope Empirical Approach for Slope Stability Assessment of Spanish Mountain Roads in Winter—Combining Remote Techniques with Virtual Reality. *Sustainability* **2023**, *15*, 15744. https://doi.org/10.3390/su152215744

Academic Editors: Yaxun Xiao, Yanchun Yin and Haitao Li

Received: 15 August 2023
Revised: 21 October 2023
Accepted: 24 October 2023
Published: 8 November 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction and Scope

1.1. Spanish Slopes in Winter

This work analyses the application of the Q-slope index to frozen slopes in Spain. For this, two mountainous areas with roads to ski resorts have been chosen: a small area in the center of Spain, near Madrid, and a larger area in the Pyrenees.

Spain is not a country known for its mountains and winter conditions but rather for its artistic culture, folklore, and beaches. However, it is worth highlighting some little-known aspects about the country: Its average altitude (average elevation) is 660 m.a.s.l. (meters above sea level), making it the eleventh most mountainous nation in Europe. For example, Austria's average altitude is 910 m.a.s.l, and France's is 375 m.a.s.l. [1]. Spain is crossed by a large number of mountain ranges, including the Pyrenees with 217 peaks over 3000 m.a.s.l. [2] (some of which have small glaciers). The Sierra Nevada is a mountain range in southern Spain and includes the Mulhacén summit, which at 3479 m.a.s.l., is the highest mountain in Europe outside the Caucasus and the Alps [3]. Although much of Spain has a Mediterranean climate with hot summers and relatively mild winters, the north

has an Atlantic climate that is influenced by storms from northern Europe, which often leave significant snowfall in the mountains. The interior of the peninsula has a non-extreme continental climate; low temperatures can be reached with significant frosts for several months of the year. The lowest temperature recorded in Spain in a non-mountainous and inhabited area was −30 °C (recorded in December 1963 in Calamocha in Teruel) [4]. The coldest measurement made at an official weather station was −32 °C as recorded at Estany Gento in the Lleida Pyrenees in February 1956. The Philomena storm in January 2021 set the record for a non-official weather station measurement with −34 °C measured at the Baqueira Beret ski resort in the Pyrenees [4]. There are 30 Spanish alpine ski resorts [5] (15 in the Pyrenees, 7 in the Cantabrian Mountains, 4 in the Iberian System, and 4 in the Central System and the Sierra Nevada). This final range is the southernmost range in Europe and the highest in Spain—and from whose peaks the Strait of Gibraltar and Africa are visible.

Given the significant frosts and snowfalls, there are many problems linked to unstable slopes in mountainous areas, with ice and snow causing potential avalanches on some roads. Spain has many tourists, and winter sports and mountain activities (hiking and climbing) are popular. Mountain massifs are usually accessed by car or train in severe winter conditions. The study of rock slope stability in winter is clearly an important challenge. For this reason, it is necessary to establish simple and effective methodologies for preliminary evaluations—and the Q-slope in alpine or arctic conditions [6] seems a priori a good methodology. As will be seen later, these empirical methodologies have their limitations; they are designed for a first evaluation: Later analyses will be carried out in detail considering other variables, such as the piezometric level, different geotechnical units, and stresses.

1.2. Empirical Assessment of Rock Slopes and Virtual Reality Visualization

Empirical methods have been used to analyze the stability of underground mines and tunnels since the 1970s. However, it was not until 1985 that the first geomechanical index for slopes was developed by Romana [7,8]. However, neither the rock mass rating (RMR) water factor, nor the slope mass rating (SMR), has any reference or weighting for the effect of ice. Barton and Bar [9] published in 2015 the first works of a new geomechanical index for slopes based on the well-known Q-index: This new method is termed Q-slope and incorporates a correction factor for the effect of ice [9]. It is important to point out that the only work to date on the Q-slope index in icy or high mountain environments is that of Bar and Barton [6], and as the authors point out: "*the complex and time dependent mechanical processes involving ice wedging experienced in artic and alpine environments are currently near impossible to replicate in numerical simulations on a slope scale, the use of empirical or observational approaches remains practicable*". Bar and Barton analyzed 90 case studies involving rock slopes in arctic and alpine environments, and the results show a good approach and simulation of real situations with a rapid and effective visual and field methodology. These authors concluded that for future work regarding the Q-slope method, researchers and practitioners should contribute with case studies and more data [6]. It is worth highlighting that their work includes a figure [6] in which there are no references to slopes with inclinations under 50 degrees or Q-slope qualities below 0.2. The scope of this work is to increase the database and check the applicability of the method in other mountainous areas. Some of the case studies in this research are in the lower left corner of Bar and Barton's 2020 graph, and this is one of the main contributions of this research.

Manual data collection with compass orientations cannot always be carried out in inaccessible or dangerous areas. Remote techniques are a perfect complement for data collection at geomechanical stations. Remote methodologies such as digital photogrammetry and the Structure from Motion technique are very effective and easy to implement [10,11]. In this work, the manual acquisition of geotechnical parameters is complemented with remote techniques.

In addition to obtaining data remotely and analyzing slopes and discontinuities with point cloud programs, the results can be viewed using virtual reality techniques. During the pandemic, many engineering and rock mechanics lessons at the Universidad Politécnica de Madrid were delivered online with the help of virtual environments [12]. These virtual techniques are useful for teaching and showing the results of work to authorities and clients and also to enable other researchers to replicate results. We propose a new approach in which any researcher can virtually visit our data collection point (virtual study site) and corroborate or disagree. This is a new and important contribution to the research.

The significance of this work lies in the fact that it is a simple methodology for addressing serious problems on winter slopes, and although it is very effective, we believe that it still needs to be validated (the Q-slope was first proposed relatively recently in 2015 and is producing excellent results). The research validating the methodology has progressed from relatively simple mid-mountain slopes to much more complex slopes in high mountains.

2. Materials and Methods

2.1. Study Sites

These comments and references have been incorporated at the beginning of the "study site" section: The study of permafrost and the conditions of mountain slopes with ice has already been studied in the area of the Pyrenees and the Spanish high mountains but with a more geographical focus than a slope engineering one [13,14]. The contribution of the empirical analysis is novel, and that is why ski resorts have been chosen due to the obvious impact of winter on society.

Two differing study areas have been chosen within the Spanish high mountains (Figure 1). The first area is the winter alpine ski resort of Navacerrada in the Sierra de Guadarrama at an altitude of 1858 m.a.s.l. (located just 60 km from Madrid). And the second area is Llanos del Hospital-Benasque in the Pyrenees in the province of Huesca and near the French border. It is an area with a great tradition of alpine sports, Nordic skiing, and mountaineering. Figure 2 shows histograms of average monthly maximum and minimum temperatures for the two study locations.

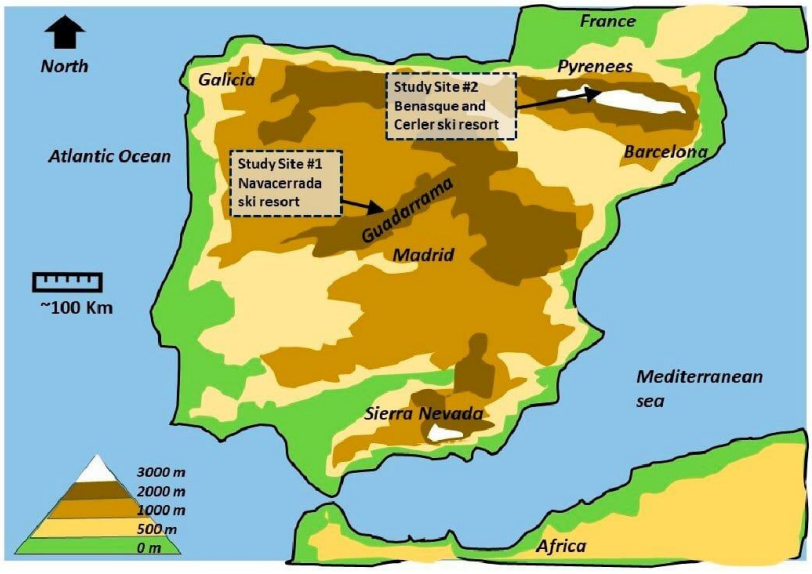


Figure 1. Study sites and relief in the Iberian Peninsula.

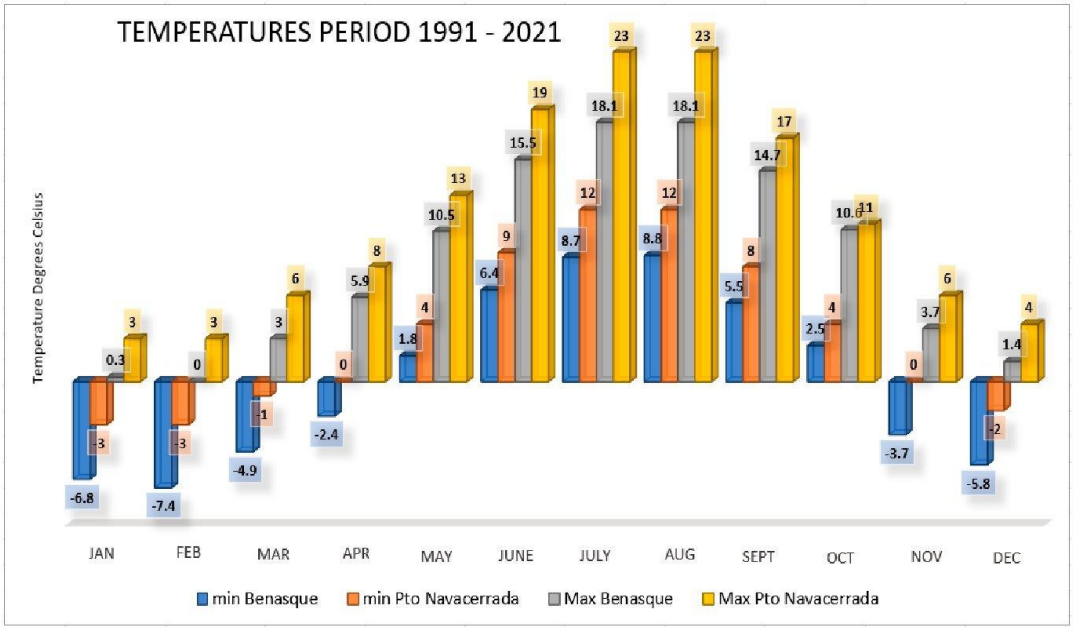


Figure 2. Histogram of Navacerrada and Benasque temperatures [15–17].

Study site 1: Navacerrada ski resort carpark (Guadarrama mountain range in Madrid).

The small ski resort at Puerto de Navacerrada is 60 km from the city of Madrid on the border with the province of Segovia. It is located at an altitude of 1858 m.a.s.l. and has its own railway station. It is popular among Madrid skiers and mountaineers. Despite its smallness, two Spanish Olympic ski champions were raised locally. Skiing began in Navacerrada in 1903, and a ski resort was built at the end of the 1940s. The first chairlift was installed in 1955. It reached its peak of popularity in the 1960s and 1970s.

Slopes 1, 2, 3, and 4 are located near the resort carpark, and the measurements were made on 20 January 2023 after a nighttime temperature of around −7 °C and several weeks of below-zero temperatures. The excavated slopes are made of jointed and weathered granite that suffers a freeze–thaw effect. There are abundant "blue" icefalls and frozen joints (Figure 3 and Table 1). The slopes show minor instabilities. The need to protect the carpark below has made it necessary to install wire mesh and cables with intensive bolting. Slope 5 is in the nearby Morcuera mountain pass. The rock is highly weathered gneiss and grade IV (almost converted into residual soil) in some areas. The slope angle is less steep than Navacerrada and contains no reinforcements.

Benasque is a town in the Aragonese Pyrenees embedded in a trough-shaped glacial valley. The area has a tradition of mountain sports: rock climbing; mountaineering; ice climbing; skiing; and recently, trail running and races. The town of Benasque is located at an altitude of 1140 m and is near the French border. In the direction of France is the Llanos del Hospital cross-country ski resort (altitude of 1758 m.a.s.l.) and the peak of Aneto (the highest in the Pyrenees at 3404 m.a.s.l. and partially covered with small glaciers). Near Benasque is the alpine ski resort of Cerler, which from 1500 m, reaches the Gallinero peak at 2630 m.a.s.l. It is important to note that access to Benasque is through a gorge in the Congosto with many tunnels and geotechnical construction difficulties, whose excavation in 1916 was a challenge for Spanish engineering.

Table 1. Brief description of the study sites and visits.

Slope	Location	Altitude Meters a.s.l	Lithology	Slope Heigh (m)	Slope Angle °	Field Work Date/h	Temperature °C		Slope Reinforcement (Mesh, Bolts…)	Ice Wedging–Ice Falls
							Minimum Night	During Measures		
1	Navacerrada carpark (Madrid)	1849	Granite	15 m	60–70°	01/20/2023 15:00	−7 °C	2 °C	yes	yes
2		1849	Granite	10 m	45°	01/20/2023 15:10	−7 °C	2 °C	yes	yes
3		1849	Granite	6 m	80°	01/20/2023 15:30	−7 °C	2 °C	yes	yes
4		1849	Granite	4–8 m	70–80°	01/20/2023 15:52	−7 °C	1 °C	yes	yes
5	Morcuera (Madrid)	1761	Gneiss	4–10 m	20–45°	01/20/2023 17:20	−7 °C	2 °C	No	Yes
6	Llanos del Hospital (Benasque)	1778	Slate	8 m	90–100°	01/29/2023 12:20	−12 °C	0 °C	No	Yes
7		1778	Slate	10 m	90°	01/29/2023 12:30	−12 °C	0 °C	No	Yes
8		1778.	Slate	12 m	90–100°	01/29/2023 12:45	−12 °C	0 °C	No	Yes
9		1619	Greywacke	10 m	90°	01/29/2023 16:00	−12 °C	0 °C	No	Yes
10		1619	Greywacke	10 m	90°	01/29/2023 16:15	−12 °C	0 °C	No	Yes
11		1464	Greywacke	6 m	90°	01/29/2023 17:00	−12 °C	0 °C	No	Yes
12		1658	Slate	8 m.	90°	01/29/2023 10:00	−7 °C	0 °C	No	Yes
13	Esera river bridge (Benasque)	1246	Slate	6 m.	90°	01/31/2023 11:00	−5 °C	11 °C	No	Yes
14		1246	Slate	8 m.	90°	01/31/2023 11:20	−5 °C	11 °C	No	Yes
15		1246	Slate	4 m.	50°	01/31/2023 11:35	−5 °C	11 °C	No	Yes
16	La Piedad hermitage (Navarri) A139 road	1005	Marls and sandstones	15 m.	90–100°	01/31/2023 12:30	−5 °C	6 °C	No	Yes
17		1005	Marls and sandstones	15 m.	70°	01/31/2023 12:35	−5 °C	6 °C	No	Yes
18		1005	Marls and sandstones	15 m.	90°	01/31/2023 12:40	−5 °C	6 °C	No	Yes

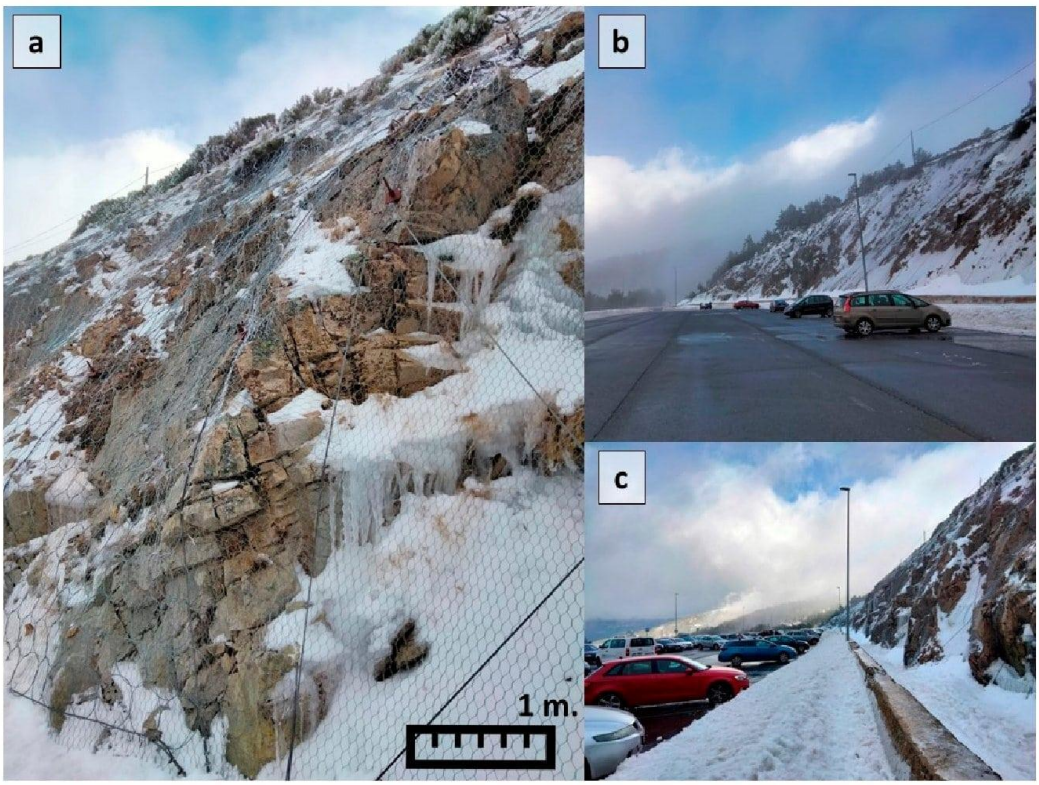


Figure 3. Slopes at study site Puerto de Navacerrada 1: (**a**) slope 1; (**b**) slope 2; (**c**) slope 4 pictures and data taken Altitude 1885 is m.a.s.l. Typical day temperatures are −3 °C, and nighttime temperatures −8 °C.

Slopes 6 to 12 are in the Llanos del Hospital valley near the French border. It is a mountain road along a valley that registers the lowest temperatures in the Spanish Pyrenees. These are slopes excavated in vertical slates and greywackes with instabilities. Significant block falls occur during excavations, road widening, and extensions. The slopes reveal many filtrations of frozen water and ice cascades in winter. Figure 4a,c shows the risk of toppling and icefalls on slopes 6, 7, and 8. Figure 4d shows some recent winter rockfalls at the end of the road. Figure 4e shows an ice-filled fissure. Slopes 13, 14, and 15 are located close to the previous slopes but at a lower altitude and next to a bridge over the Esera river in the direction of Benasque. These slopes are characterized by significant ice cascades above the slope that do not affect stability except in a specific area of seepage and wedges in the middle of the slope that have caused a block to fall. Finally, slopes 16, 17, and 18 are excavated in alternating competent sandstones and carbonaceous black soft marls, which degrade and leave dangerous overhanging strata. These slopes have significant water seepage and suffer ice-thawing effects with abundant ice falls. These slopes are located about 30 km south of Benasque, beyond the Congosto Gorges.

Figure 4. Study site 2: Llanos del Hospital (Benasque, Pyrenees) cross-country ski resort and road to the French border. Temperature during the field trip day (maximum) +4 °C, night −12 °C. (**a**) Toppling problems at slope 6; (**b**) wedge failure at slope 9; (**c**) toppling and ice falls at slope 8; (**d**) fallen blocks; (**e**) frozen joints and ice cracking.

2.2. Q-Slope Addressing Ice Wedging

The Q-slope is a recently developed rock mass classification that is specific to rock slopes [9,18]. Like the Q-system [19]—from which it is derived—*Q-slope* uses six parameters. *RQD*, *Jn*, *Jr*, *Ja* are the same as the Q-system, and a correcting factor (named the O-factor) is introduced that depends on the apparent stability of the slope. The Jw and SRF of the Q-system are renamed as the *Jwice*—which includes other aspects—and the *SRF* is obtained in three different ways, with the least favorable result retained.

$$Qslope = \frac{RQD}{Jn} \times \left(\frac{Jr}{Ja}\right)_o \times \frac{Jwice}{SRFslope} \quad (1)$$

where:

- *RQD* is the rock quality designation, which varies between 0 and 100, and if the value is less than 10, then the minimal value of 10 is used [9].
- *Jn* is the joint set number.
- *Jr* and *Ja* are the joint roughness numbers and the joint alteration numbers, respectively.
- The (*Jr*/*Ja*) factor considers the favorable or unfavorable orientation of the joints compared with the slope, and "O" is an adjustment factor referred to as the "O-factor".
- *SRF slope* is the stress reduction factor for the slope.

We refer the reader to the references [9,18,19] regarding parameters, rating tables, weighting, and a description of each of the aforementioned parameters—as well as the flowchart in Figure 5 where the traditional application method for Q-slope is shown. To apply the Q-index, an auxiliary graph that is divided into stable slopes, uncertain slope stability, and unstable slopes is used (see [9] and more recently, [20]). The graph was built on an extensive database that is in permanent evolution and increasing in size.

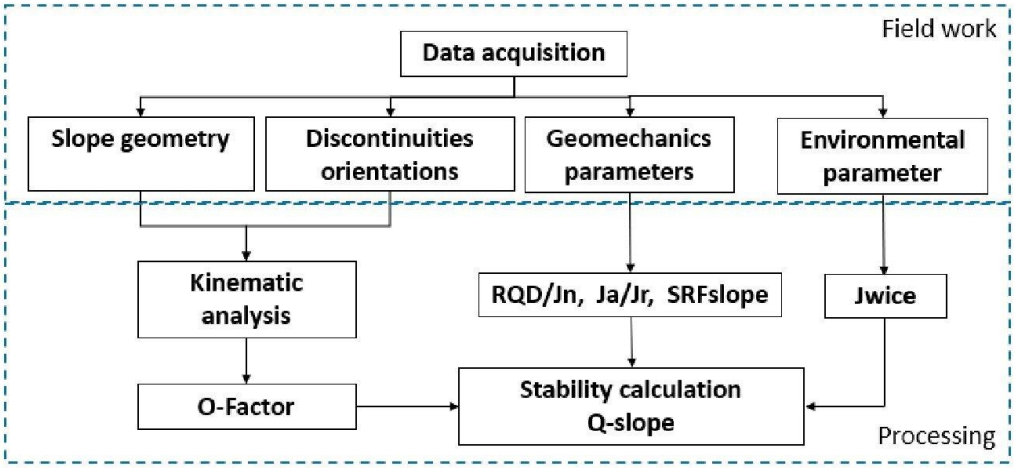


Figure 5. Conventional methodology for the application of the empirical Q-slope method.

Among the parameters that build the Q-slope, we highlighted and focused on Jwice, which is termed the "*environmental and geological condition number*" [6,9,19–21]. Q-slope is the only rock mass classification that considers the effect of ice on the strength and stability of rock masses.

2.3. Field Data Acquisition and Interpretation

(1) Structure from Motion photogrammetry [11] is used to build up a digital model of the slope and point cloud [22]. With this model, we can measure the joints virtually in places we have not been able to access with the compass [23,24]. We used a low-cost methodology with a standard digital camera and a portable four-target reference system.

Considering that the photographs influence the quality of our digital model, it is recommended that users taking photographs (stage 1, Figure 6) control the quality of the objective, the image sensor, focal aperture, sensor sensitivity, and shutter speed. For this control, the aperture should be set to f/8–f/9, and the shutter speed should be set to 1/60–1/125 or faster. To avoid image distortions and noise, it is best to use intermediate focal lengths (35–80 mm), reduced ISO sensitivity (100 or less), and if flash is activated, then care should be taken to avoid creating shadows.

At the field site, structural data were recorded, and at the same time, a scale reference was placed that oriented the photogrammetry with respect to magnetic north and local coordinates. From the photographs, the photogrammetric model was built, which is the basis of the 3D model or point cloud. The 3D model served to complete the structural data in inaccessible areas. The process of constructing 3D images from SfM photogrammetry is described below (see Figure 6).

The SfM technique for slope analysis (Figure 6) can be divided into three methodological stages: Stage 1 is field information gathering; Stage 2 is the generation of a dense point cloud; and Stage 3 is 3D model generation and structural data collection. To process the photographs, the technique uses collinearity equations that require many similar points in superimposed images that are acquired in a structured way at different levels and positions

with respect to the study object. The technique produces a dense cloud of points without orientation, which must be taken to an absolute coordinate system, which is achieved with control points that enable scaling and orienting the point clouds [25]. With the dense 3D point cloud, a high-resolution digital model was generated that provides structural data of slopes in inaccessible or high-risk areas [26].

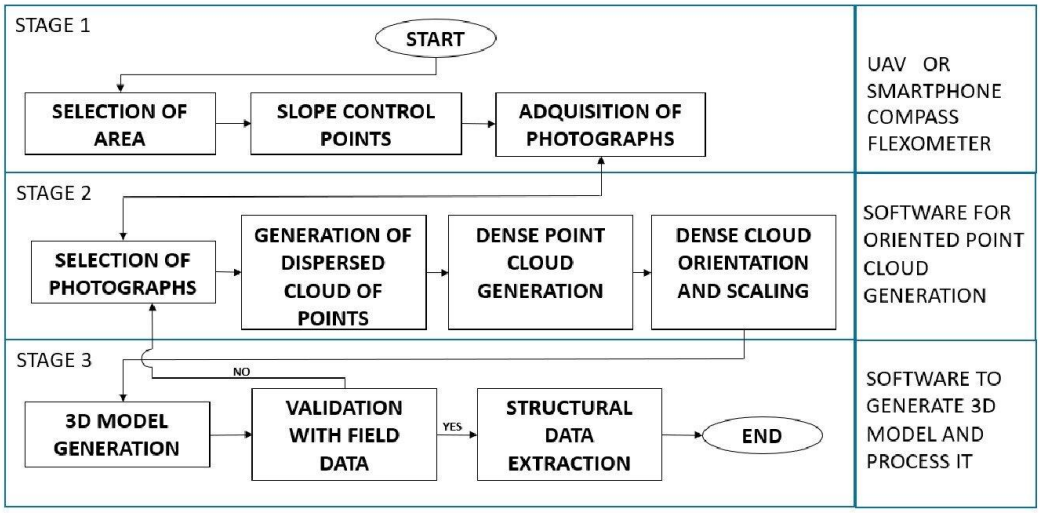


Figure 6. SfM technique for slopes that can be used for multiple applications in slope stability analysis [27–35].

Figure 7 shows the work process in field and office. This procedure is valid for practical engineering applications, as well as research and teaching. A small area of about 5 m was initially chosen on each slope or in each relevant area, which we term a geomechanical station. Using normalized templates, we gathered in situ data on matrix, joint, and rock mass parameters (such as the joint roughness coefficient, simple compression, joint spacing, and joint orientation). This template and data should be an ambitious gathering of data and not focus, as sometimes happens, only on RMR geomechanical classifications and Q. With the data from a field template, we then determined the following parameters: shear joint strengths; matrix strengths; slope geometries; and of course, the input parameters of geomechanical classifications—usually RMR and Q [36,37] if it is an underground work, and SMR (Roman) and Q-slope [9,38–40] if it is a slope. Collecting this data usually takes one hour. It is important to have templates ready so that we do not forget anything, and data collection must be simplified as much as possible if conditions in the field are adverse.

We scanned the slope at the same time that the geomechanical data was being gathered. This type of scan has two purposes: to collect data in inaccessible areas and to obtain a digital VR model for more detailed analysis and for sharing with clients or researchers. VR does not help with data collection in the field, but rather it is a tool for visualizing results. In the academic field, the metaverse facilitates virtual field trips for training.

In this case, we implemented two imaging or scanning methodologies:

(2) We used a camera (Insta360 ONE) to obtain a 360-degree view of the study area. Once the data were captured and processed, they were uploaded to a repository or website where they could be viewed using virtual reality with varying degrees of immersion and development. We have opted for scanned 3D scenarios or 360° images that can be easily viewed with VR goggles. However, these scenarios can also be viewed with less interactive capacity from any smartphone or laptop device: It is important that the scenarios are user-friendly and that the images load quickly. These visualizations in the metaverse

can have several objectives: They can enable researchers to access the place of study and replicate our research, clients see the work carried out, and virtual excursions or field trips can be generated for students to practice with real data and places. To aid this process, we provided a Q-slope data collection template. The photogrammetries were uploaded to the repository and are freely accessible as 3D models that can be zoomed and rotated and include pop-up menus with the geometric and geotechnical slope information. This information enables the entire study to be replicated. Some 360 images have been taken that are linked through a virtual reality scenario viewable using VR goggles.

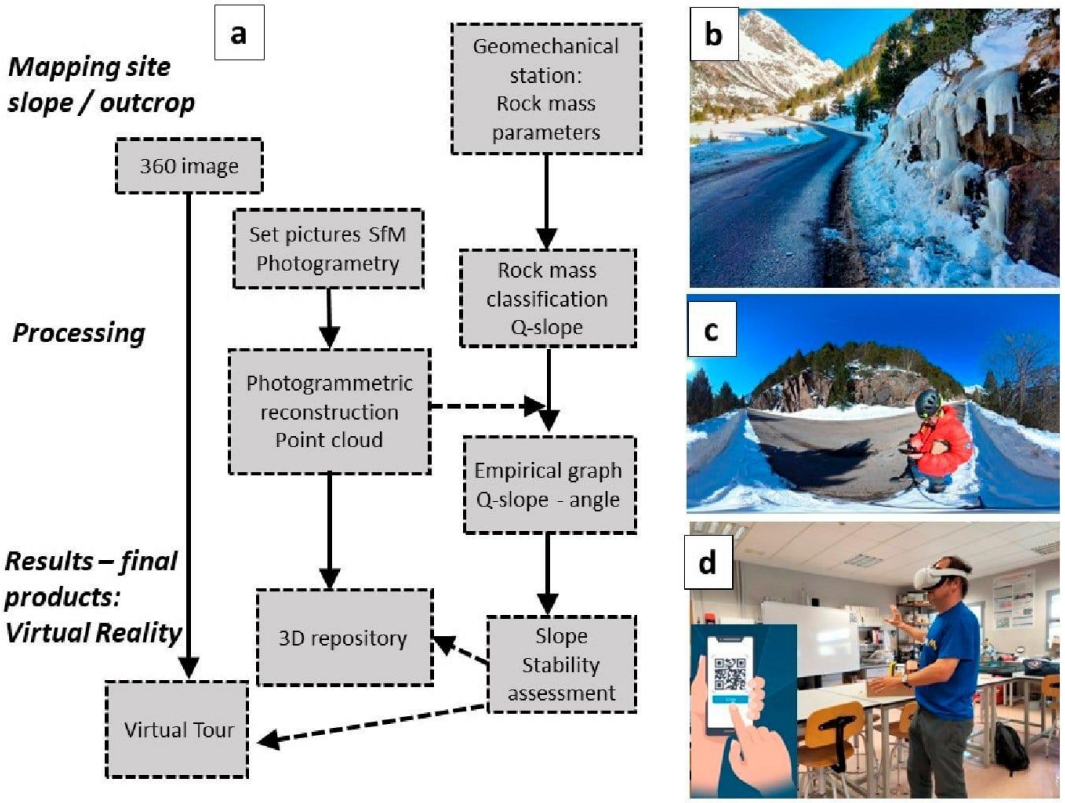


Figure 7. Flowchart of the field and processing progress to obtain the geomechanical parameters (and stability assessment), as well as the VR and 3D results; (**a**) shows research progression from field data acquisition to results. (**b**) shows some icefalls where the field campaign is developed. (**c**) is the 360° spheric view seen when operating the camera through an app. (**d**) shows the virtual reality platform.

In this research, we used a fast and low-cost methodology, classic tools such as the compass, and simple remote techniques. For the photogrammetry, we used medium–low range digital camera that produced adequate results. The 360° camera is good quality but not expensive. Figure 8 shows the template used for Q-slope data gathering. Virtual reality is in this case a mere visualization system. The most complex part was the data collection and the scanning of the slopes. These scanners are used to determine the stability conditions of the slopes. What happens is that we have used commercial 3D model repositories to visualize the results, and these repositories include a VR visualization mode.

Table 2. Calculation of the average parameters to identify the Q-slope of the slopes studied: U = unstable–failed; support needed for global stability; Q uncertain–quasi-stable (minor bock and slabs detachments and failures, open cracks, minor reinforcements for unraveling of rocks); S = stable (* wedges apply set A and (set B)) Jwice × 1.3 when reinforcements applied (bolts, etc.).

Study Site	*Slope*	**Lithology**	*Q-Slope Calculation Factors*										*Stability*	
			RQD	*Jn*	*Jr*	*Ja*	*O-Factor*	*Jwice*	*SRF Slope*	*Q-Slope Ice*	*β (°)*	*Height (m)*	**Visual Perception (*)**	**Q-Slope Graph**
Puerto Navacerrada Guadarrama	1	Granite	55	9	1.5	4	0.5	0.3 × 1.3	5	**0.09**	**60–70**	15	Q	U
	2		10	15	1.5	4	0.5	0.3 × 1.3	8	**0.006**	**45**	10	Q	U
	3		40–70	12	1.5	4	1	0.9 × 1.3	5	**0.3–0.5**	**80**	6	Q	U
	4		10–50	12	1.5	4	1	0.9 × 1.3	5	**0.07–0.36**	**70–80**	4	Q	U
	5	Gneiss	20	9	1.5	3	1	0.5	15	**0.037**	**30**	8	S	Q
Benasque–Pyrenees	6	Slates and greywackes	80	12	1	1	1	0.3	5	**0.4**	**90–100**	8	Q	U
	7		70	12	1	2	1	0.9	5	**0.52**	**90**	10	S	U
	8		100	9	1	2	1	0.9	5	**1**	**90–100**	12	S	U
	9		100	15	1(1) *	1(1)	0.5 × 0.9	0.3	2.5	**0.36**	**90**	10	U	U
	10		100	9	1	1	0.5	0.3	2.5	**0.67**	**90**	10	U	U
	11		90	12	1.5	3	0.75	0.3	2.5	**0.338**	**90**	6	S	U
	12		80	12	1.5	3	1	0.9	2.5	**1.2**	**90**	8	S	U
	13	slates	70	9	3	2	1	0.9	1	**10.5**	**90**	6	S	Q
	14		80	9	3	2	0.75	0.3	2.5	**1.2**	**90**	8	Q	U
	15		80	4	3	2	0.75	0.9	1	**20.25**	**50**	4	S	S
	16	marls	10–50	9	1	4	1	0.3	5	**0.017**	**90–100**	15	Q	U
	17		10–50	4	1	4	1	0.9	2.5	**0.225**	**70**	15	S	U
	18		10–50	4	1	4	1	0.3	5	**0.038**	**90**	15	Q	U

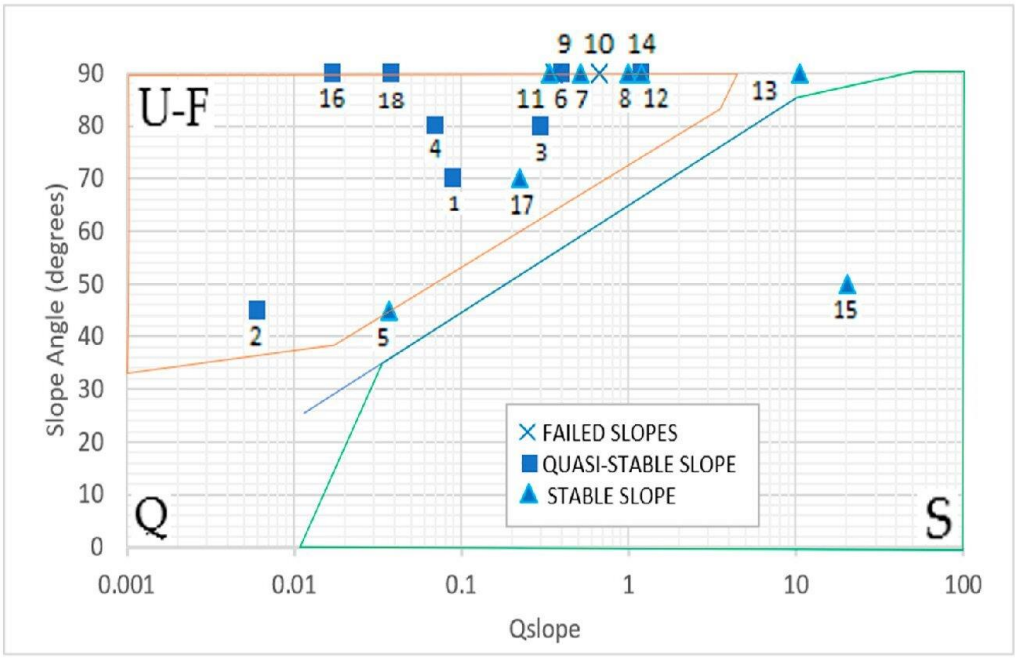


Figure 9. Q-slope stability assessment chart in ice wedging conditions. The line represents the Barton–Bar stability equation for slopes: U = unstable–failed zone; Q = quasi-stable–uncertain zone; S = stable zone.

Almost all the slopes are found in competent rocks with greater or lesser degrees of fracturing. The RQD values vary between 10 and 100, the best being those of the Benasque greywackes. The index for the number of Jn joint sets varies between 4 and 15. The roughness indices Jr and the alteration Ja are generally quite favorable, with Jr from 1 to 3 and Ja from 1 to 4 (see Table 2). The O-factor varies from 0.5 to 1. The Jwice ice effect correction was applied to all slopes. For the Navacerrada ski resort, we multiplied Jwice by 1.3 because it is an undrained but reinforced slope. The final columns in Table 2 correspond to the evaluation of slope stability both visually and by applying the results in Figure 8.

The slopes were scanned when the geomechanical data were collected. Scanners using the Structure from Motion (SfM) photogrammetric technique were uploaded to the Sketchfab repository. Below these lines are the links showing the results of each scan with pop-up menus that report the properties of the massif and some geometric data of the slopes. The 360° images were uploaded to the virtual and augmented reality platform, where indications, clues, and pop-up menus with geotechnical data were also posted. Using these virtual tours, students or researchers can replicate the results of this research from the field data collection stage. Table 3 indicates the links to these VR and 3D repository results.

Table 3. Links to virtual reality and 3D image repository from the current research.

Web Link or/and QR Code	Type of Platform	Number of Images–Scenes	Sites Covered	Virtual Data Gathering–Pop-Ups Menus
https://edu.cospaces.io/GYJ-RVV	Tour–virtual reality field trip	4	Navacerrada and Benasque	**yes**
https://sketchfab.com/3d-models/slope-9-benasque-cfa3fe8a2d534b9ebdc6fe093d8901df	Repository 3D image	1	Benasque	**Not yet**
https://sketchfab.com/3d-models/slope-6-and-7-benasque-d779f38842864224b3a4d56ed43f7324	Repository 3D image	1	Benasque	**Not yet**

4. Discussion

For field data collection, the empirical techniques and geomechanical classifications satisfactorily complement remote techniques. Using the Q-slope geomechanical classification, we can collect data in accessible and non-hazardous areas. Photogrammetric scans enable us to reach inaccessible points by adding information to the geomechanical station.

Table 2 and Figure 9 show the results of the stability analysis. It is interesting to see that the Q-slope index is conservative and prudent regarding stability: All slopes seen as highly unstable or fallen appear as "unstable" according to the Q-slope graph (Figure 9): namely, slopes 9 and 10. The slopes that are seen as having minor or quasi-stable instabilities appear in the Q-slope graph in the "unstable" zones, namely, slopes 1–4, 6, 14, 16, and 18. But it is striking that visually stable slopes, such as slopes 7, 8, 11–13, and 17, appear as unstable. This is because the Q-slope angle stability graph [9,20] indicates any 90° slope with Q-slope qualities below 4 as unstable and Q-slope qualities greater than 4 as "transitional".

We consider that slopes with good Q-slope geomechanical qualities and moderate heights can be perfectly vertically stable. Part of the graph could be modified as in the case indicated in Jordá 2017 [18]. Visually stable slopes 5 and 15 appear as stable in Figure 9 given the angle of the Q-slope. In the present work, we provide new data for the Barton and Bar Q-slope criterion [6]. Figure 9 shows many slopes with a few instabilities positioned in the part of the graph that corresponds to "unstable–failed" (namely, slopes 16, 18, 4, 1, and 17). Slope 5 is on the boundary line. These new data "collaborate" in fixing the limits or boundaries between the stable and unstable slopes. Slope 2 has an inclination of 45° and is stable, but it is located in the unstable zone. It is important to notice that the lower left area of the graph has very little data, and the limit line in this sector should be reviewed or analyzed more carefully. We also recommend evaluating the boundary between unstable and transitional for vertical slopes (90°) with Q-slope qualities greater than 1.

We believe that the methodology we propose, although it has limitations, is extremely effective and fills many gaps in the type of studies carried out on slope stability. The main benefit is that the field data are readily available in a user-friendly repository, and anyone can replicate the study or assess its rigor. The Q-slope methodology in winter has only one reference, so we believe that our work contributes more references to the database; again, the original authors of the criterion can judge if we have taken the data correctly and incorporated it or not to your line of work. Regarding limitations and future lines of work, it is necessary to unify databases with a lot of information in easy-to-view 3D environments. The repositories and environments that we use can become saturated, so a possible line of work would be the use of BIM (Building Information Modeling)-type technologies.

We therefore believe that the empirical Q-slope methodology is generally conservative and can also be applied to icy rock slopes in winter. Remote techniques, and especially the SfM technique used here, serve for gathering structural and geotechnical data in areas that are difficult to access and enable us to infer parameters of the Q-index, such as the joint set number and SRF. Once the slope has been scanned using this technique, or a 360° photo has been taken, we can upload it to a digital repository where anyone can reinterpret our calculations and perform quality control. This repository can be considered a metaverse since we see a partially immersive reality. In the academic field, these models are visible with virtual reality goggles.

5. Conclusions

The Q-slope is currently the only geomechanical analysis method that evaluates the action of ice on rocky slope stability. This research shows the importance of new data, which enables improving the method and demonstrating that it is conservative in its stability classification of rock slopes. It is necessary to continue feeding the Q-slope winter database to correctly delimit the stable–unstable boundary line.

New digital remote techniques enable technicians in charge of field investigations to carry out their work quickly and with less risk. New methods of presenting field information, such as virtual reality, enable a greater number of users to use the data obtained in an evaluation and replicate research efficiently in controlled environments. With this premise, we can conclude that the use of the metaverse enables a significant advance in the process of opening technical and scientific information.

If we analyze the results obtained from a bibliometric analysis on 8 August 2023 of the SCOPUS scientific article database on the "metaverse" search criteria for a period of 28 years counting from 1995, we see that it is not until 2008 that publications on the subject begin to increase—with a takeoff in 2021 with 53 scientific publications. The peak is reached in 2022 with 1135 publications. So far, in 2023, there have been 1166 publications. With these results, we can conclude that any type of publication that discusses this topic is current, novel, and of importance for the development of new technologies worldwide.

Author Contributions: Conceptualization, L.J.B.; methodology, L.J.B.; software, L.J.B.; validation, L.J.B. and C.P.B.B.; formal analysis, L.J.B. and C.P.B.B.; investigation, L.J.B. and C.P.B.B.; writing—original draft preparation, L.J.B. and C.P.B.B.; writing—review and editing, L.J.B. and C.P.B.B.; supervision, L.J.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Tables 2 and 3 of this article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. AtlasBig.com. Available online: https://www.atlasbig.com/en-us/countries-average-elevation (accessed on 25 January 2022).
2. Escarpe, L.A. *Pirineos Guía de Los 3000 m*, 1st ed.; Sua Edizioak: Bilbo, Spanish, 2015.
3. Martínez, M.T. *Sierra Nevada: Una Gran Historia*, 1st ed.; Editorial Universidad de Granada: Granada, Spanish, 1997.
4. Tiempo.com. Available online: https://www.tiempo.com/ram/38719/aniversario-de-un-record-frio-en-espana/#:~:text=El17dediciembrede,Espa~naenunlugarhabitado (accessed on 25 January 2022).
5. Infonieves.es. Available online: https://www.infonieve.es/estaciones-esqui/pais/espana/ (accessed on 25 January 2022).
6. Bar, N.; Barton, N. Q-Slope Addressing Ice Wedging and Freeze-Thaw Effects in Arctic and Alpine Environments. In Proceedings of the ISRM International Symposium-EUROCK 2020, Trondheim, Norway, 12–14 October 2020.
7. Romana. New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. In Proceedings of the International Symposium on Role of Rock Mechanics, Zacatecas, Mexico, 2–4 September 1985; pp. 49–53. Available online: https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=253061 (accessed on 25 January 2022).
8. Romana, M.; Tomás, R.; Serón, J.B. Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: Thirty years review. In Proceedings of the 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, Montreal, Canada, 10–13 May 2015; Volume 2015, pp. 1–10.
9. Barton, N.; Bar, N. Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. In Proceedings of the ISRM Regional Symposium, EUROCK 2015, Salzburg, Austria, 7–10 October 2015; pp. 157–162.
10. Bordehore, L.J.; Riquelme, A.; Cano, M.; Tomás, R. Comparing manual and remote sensing field discontinuity collection used in kinematic stability assessment of failed rock slopes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2017**, *97*, 24–32. [CrossRef]
11. Delgado-Reivan, X.; Paredes-Miranda, C.; Loaiza, S.; Echeverria, M.D.P.V.; Mulas, M.; Jordá-Bordehore, L. Stability Analysis of Rocky Slopes on the Cuenca–Girón–Pasaje Road, Combining Limit Equilibrium Methods, Kinematics, Empirical Methods, and Photogrammetry. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 862. [CrossRef]
12. García-Vela, M.T.; Borja-Bernal, C.P.; Jordá-Bordehore, L.; Medinaceli-Torrez, R.; Loaiza, S.; Falquez, D.A. Teaching rock mechanics using Virtual Reality: Laboratory practices and field trips during the confinement of the Coronavirus COVID-19 in Ecuador, Bolivia, and Spain. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Turin, Italy, 20–25 September 2021; Volume 833. [CrossRef]
13. Serrano, E.; Pisabarro, A.; Rico, I. Mapping the potential distribution of frozen ground in tucarroya (monte perdido massif, the pyrenees). *Cuad. Investig. Geográfica Geogr. Res. Lett.* **2020**, *46*, 395–411. [CrossRef]
14. Remondo, J.; Soto, J.; González-Díez, A.; de Terán, J.R.D.; Cendrero, A. Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas in northern Spain. *Geomorphology* **2005**, *66*, 69–84. [CrossRef]
15. Available online: https://www.climasyviajes.com/clima/espa%C3%B1a/puerto-navacerrada (accessed on 16 March 2023).
16. Available online: https://es.climate-data.org/europe/espana/aragon/benasque-729631/#temperature-graph (accessed on 16 March 2023).
17. Available online: https://es.weatherspark.com/y/35440/Clima-promedio-en-Navacerrada-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o-graph (accessed on 10 April 2023).
18. Jordá-Bordehore, L. Application of Q slope to Assess the Stability of Rock Slopes in Madrid Province, Spain. *Rock Mech. Rock Eng.* **2017**, *50*, 1947–1957. [CrossRef]
19. Barton, J.; Lien; Lunde, R. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mech.* **1974**, *6*, 189–236. [CrossRef]
20. Bar, N.; Barton, N. The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mech. Rock Eng.* **2017**, *50*, 3307–3322. [CrossRef]
21. Bar, N.; Barton, N.R. Empirical slope design for hard and soft rocks using Q-slope. In Proceedings of the 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium 2016, Houston, TX, USA, 26–29 June 2016; Volume 2, pp. 1301–1308.
22. Chen, J.; Zhu, H.; Li, X. Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud. *Comput. Geosci.* **2016**, *95*, 18–31. [CrossRef]
23. Nagendran, S.K.; Ismail, M.A.M.; Tung, W.Y. Photogrammetry approach on geological plane extraction using cloudcompare FACET plugin and scanline survey. *Bull. Geol. Soc. Malays.* **2019**, *68*, 151–158. [CrossRef]
24. Tung, W.Y.; Nagendran, S.K.; Ismail, M.A.M. 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in CloudCompare. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2018; Volume 169. [CrossRef]
25. Tomás, R.; Riquelme, A.; Cano, M.; Abellán, A. Structure from Motion (SfM): Una Técnica Fotogramétrica de Bajo Coste Para la Caracterización y Monitoreo de Macizos Rocosos. *10° Simp. Nac. Ing. Geotécnica A Coruña España* **2016**, *1*, 209–216. Available online: https://www.researchgate.net/publication/309611177_Structure_from_Motion_SfM_una_tecnica_fotogrametrica_de_bajo_coste_para_la_caracterizacion_y_monitoreo_de_macizos_rocosos (accessed on 14 August 2023).
26. Riquelme, A.J.; Tomás, R.; Abellán, A. Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2016**, *84*, 165–176. [CrossRef]
27. Robiati, C.; Eyre, M.; Vanneschi, C.; Francioni, M.; Venn, A.; Coggan, J. Application of remote sensing data for evaluation of rockfall potential within a quarry slope. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **2019**, *8*, 367. [CrossRef]
28. Shao, Y.; Ji, Y.; Fujii, H.; Nagatani, K.; Yamashita, A.; Asama, H. Estimation of scale and slope information for structure from motion-based 3D map. In Proceedings of the SII 2017–2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Taipei, Taiwan, 11–14 December 2017; Volume 2018, pp. 208–213. [CrossRef]

29. Gómez-Gutiérrez, A.; Schnabel, S.; Conoscenti, C.; Caraballo-Arias, N.A.; Ferro, V.; Di Stefano, C.; Sanjose, J.J.; Angileri, S.E.; De Matías, J.; Berenguer-Sempere, F. Production of 3D models for different morphologies and scales using structure from motion techniques and terrestrial pictures | Elaboración de modelos 3D de diferentes morfologías y escalas utilizando técnicas Structure-from-Motion y fotografías Terrestre. *Cuaternario Geomorfol.* **2016**, *30*, 23–35. [CrossRef]
30. Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* **2012**, *179*, 300–314. [CrossRef]
31. Karantanellis, E.; Marinos, V.; Vassilakis, E. 3D hazard analysis and object-based characterization of landslide motion mechanism using uav imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch.* **2019**, *42*, 425–430. [CrossRef]
32. Wei, Z.-Y.; Ramon, A.; He, H.-L.; Gao, W. Accuracy analysis of terrain point cloud acquired by 'structure from motion' using aerial photos. *Dizhen Dizhi* **2015**, *37*, 636–648. [CrossRef]
33. García-Luna, R.; Senent, S.; Jurado-Piña, R.; Jimenez, R. Characterization of underground rock masses employing structure from motion: Application to a real case. In Proceedings of the Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art-Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress, Naples, Italy, 3–9 May 2019; pp. 826–834. [CrossRef]
34. Obanawa, H.; Hayakawa, Y.S.; Gomez, C. 3D modelling of inaccessible areas using uav-based aerial photography and structure from motion. *Chikei/Trans. Jpn. Geomorphol. Union* **2014**, *35*, 283–294.
35. Tomás, R.; Riquelme, A.; Cano, M.; Pastor, J.L.; Pagán, J.I.; Asensio, J.L.; Ruffo, M. Evaluation of the stability of rocky slopes using 3D point clouds obtained from an unmanned aerial vehicle | Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. *Rev. Teledetec.* **2020**, *2020*, 1–15. [CrossRef]
36. Bieniawski, Z.T. *Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends*; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 1993.
37. Barton, N.; Bieniawski, Z.T. RMR and Q-Setting Records straight. *Tunnels Tunn. Int.* **2008**, 26–29. Available online: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-40749094891&partnerID=40&md5=f1e100f52a75d14309204bc8539c5e01 (accessed on 14 August 2023).
38. Romana, M. Practice of SMR classification for slope appraisal. In Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, 10–15 July 1988; Volume 2. [CrossRef]
39. Romana, M. SMR classification. In Proceedings of the 7th ISRM Congress, Aachen, Germany, 16–20 September 1991; pp. 955–960.
40. Bar, N.; Barton, N.R.; Ryan, C.A. Application of the Q-slope method to highly weathered and saprolitic rocks in Far North Queensland. *Rock Mech. Rock Eng. Past Future* **2016**, *1*, 585–590. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.