

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Evaluación geotécnica para analizar la estabilidad de taludes en
una operación a tajo abierto**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Victor Manuel Montes Valderrama

 [0009-0005-1650-3395](https://orcid.org/0009-0005-1650-3395)

Asesor

MSc. Carlos Alberto Rojas Leon

 [0009-0004-0770-4104](https://orcid.org/0009-0004-0770-4104)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Montes Valderrama [1]
Referencia/Reference	[1] V. Montes Valderrama, " <i>Evaluación geotécnica para analizar la estabilidad de taludes en una operación a tajo abierto</i> " [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Montes, 2025)
Referencia/Reference	Montes, V. (2025). <i>Evaluación geotécnica para analizar la estabilidad de taludes en una operación a tajo abierto</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A la memoria de mi abuelo, cuya sabiduría y cariño siguen guiándome en cada desafío. Este trabajo está dedicado a su legado. A mi hijo, Santiago Jared, por ser mi mayor inspiración, mi motor diario y la razón más profunda para seguir adelante.

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios por darme fuerza.

A mi familia, especialmente a mis abuelos, por su apoyo incondicional en todo momento.

A mi hijo Santiago Jared, por ser mi motivación más grande.

Y a mis amigos, por animarme cuando más lo necesité.

¡Gracias a todos por hacer esto posible!.

Resumen

La minería a tajo abierto, aunque técnica y económicamente viable, presenta desafíos en la estabilidad de los taludes, cuya falla puede provocar graves impactos económicos, sociales y ambientales. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la estabilidad de los taludes de una operación minera mediante una investigación geotécnica integral, que incluyó caracterización del macizo rocoso, análisis de propiedades geomecánicas y modelamiento numérico.

La metodología combinó inspecciones de campo, instalación de seis estaciones geomecánicas y ensayos geofísicos (240 m de refracción sísmica y un ensayo MASW), lo que permitió evaluar la estabilidad a nivel de bancos y global. En laboratorio se realizaron ensayos de compresión simple, carga puntual, propiedades índices, compresión triaxial y corte directo para determinar parámetros de resistencia y deformabilidad.

La zonificación geomecánica definió dos áreas principales: Zona 1, con areniscas oxidadas y alteradas de baja calidad (RMR 32–34, RQD 20–30, dureza R1–R2), y Zona 2, con areniscas oxidadas y alteradas calidad regular (RMR 43–44, RQD 35–40, dureza R3), ambas influyentes en el diseño de taludes. Aunque litológicamente ambas zonas corresponden a las mismas areniscas oxidadas con alteración argílica, la diferencia en dureza se explica por un distinto grado de meteorización, fracturamiento y grado de cementación. La Zona 1 presenta mayor intemperismo, oxidación y fracturación, lo que reduce su cohesión y resistencia mecánica, mientras que la Zona 2 conserva una estructura más intacta, menor alteración y mejor cementación, generando una mayor dureza relativa. Este diseño estableció alturas de bancos simples entre 2,0 y 4,0 m y triples de 30 m, bermas mínimas de 4,0 y 11,0 m, y un ángulo confiable de 59°.

Los análisis mostraron que fallas tipo cuña y planar presentan factores de seguridad superiores a los mínimos exigidos, confirmando su estabilidad. El modelamiento numérico corroboró que los factores globales superan los valores normativos, concluyendo que los

taludes son seguros y no requieren sostenimiento adicional. Se recomienda mantener monitoreo geomecánico continuo para garantizar la seguridad a lo largo de la operación.

Palabras clave — Estabilidad de taludes, caracterización geomecánica, modelamiento numérico, RMR, análisis de bancos, factores de seguridad, refracción sísmica.

Abstract

Open-pit mining, although technically and economically viable, presents challenges in slope stability, where failure can cause severe economic, social, and environmental impacts. This study aimed to evaluate the stability of slopes in a mining operation through a comprehensive geotechnical investigation, including rock mass characterization, geomechanical property analysis, and numerical modeling.

The methodology combined field inspections, installation of six geomechanical stations, and geophysical tests (240 m of seismic refraction and one MASW test), enabling the evaluation of stability at both bench and overall scales. Laboratory tests included unconfined compressive strength, point load, index properties, triaxial compression, and direct shear, to determine strength and deformability parameters.

The geomechanical zoning defined two main areas: Zone 1, consisting of oxidized and altered sandstones of low quality (RMR 32–34, RQD 20–30, hardness R1–R2), and Zone 2, consisting of oxidized and altered sandstones regular quality (RMR 43–44, RQD 35–40, hardness R3), both influencing slope design. Although both zones are lithologically composed of the same oxidized sandstones with argillic alteration, the difference in hardness is explained by varying degrees of weathering, fracturing, and cementation. Zone 1 exhibits greater weathering, oxidation, and fracturing, which reduces its cohesion and mechanical strength, while Zone 2 retains a more intact structure, less alteration, and better cementation, resulting in greater relative hardness. The final design established single bench heights between 2.0 and 4.0 m and triple benches of 30 m, minimum berm widths of 4.0 and 11.0 m, and a reliable bench face angle of 59°.

The analyses showed that wedge and planar failures have safety factors above the required minimums, confirming their stability. Numerical modeling verified that global safety factors exceed regulatory values, concluding that the slopes are stable and do not require additional support. Continuous geomechanical monitoring is recommended to ensure safety throughout the mining operation.

Keywords — Slope stability, geomechanical characterization, numerical modeling, RMR, bench analysis, safety factors, seismic refraction.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vii
Introducción	xv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	2
1.3 Objetivo	3
1.4 Hipótesis	3
1.5 Variables	4
1.6 Antecedentes investigativos	6
1.6.1 Antecedentes internacionales	6
1.6.2 Antecedentes nacionales	7
1.6.3 Antecedentes locales	8
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	10
2.1 Marco teórico	10
2.1.1 Exploración de campo	10
2.1.2 Ensayos de laboratorio	11
2.1.3 Caracterización geomecánica de los macizos rocosos	12
2.1.4 Análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos	14
2.1.5 Modelamiento numérico de los taludes del tajo	17
2.2 Marco conceptual	18
2.2.1 Macizo rocoso	18
2.2.2 Talud	18
2.2.3 Factor de seguridad (FS)	18
2.2.4 Clasificación geomecánica	19
2.2.5 Discontinuidad	19

2.2.6	Zonificación geotécnica.....	19
2.2.7	Análisis cinemático.....	19
2.2.8	Modelamiento numérico	19
2.2.9	Condiciones hidrogeológicas.....	19
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		20
3.1	Unidad de estudio	20
3.1.1	Ubicación y accesibilidad	20
3.1.2	Geología regional.....	20
3.1.3	Geología local	23
3.2	Investigaciones geotécnicas.....	28
3.2.1	Exploración de campo.....	28
3.2.2	Ensayos de laboratorio.....	37
3.3	Caracterización geomecánica de los macizos rocosos.....	42
3.3.1	Valoración del macizo rocoso (sistema RMR)	42
3.3.2	Zonificación geomecánica.....	43
3.3.3	Caracterización geomecánica de las discontinuidades.....	44
3.4	Análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos	45
3.4.1	Diseño de los taludes del tajo.....	45
3.4.2	Factores de seguridad mínimos admisibles.....	48
3.4.3	Condiciones de agua subterránea.....	48
3.4.4	Coeficiente sísmico utilizado	48
3.4.5	Propiedades de los materiales	60
3.4.6	Análisis cinemático del macizo rocoso	61
3.4.7	Análisis de estabilidad a nivel de bancos	62
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		65
4.1	Análisis de estabilidad global de los taludes.....	65
4.1.1	Consideraciones geotécnicas generales	65
4.1.2	Condiciones de análisis.....	68

4.1.3	Software empleado para el análisis de estabilidad global.....	69
4.1.4	Resultados obtenidos.....	69
4.2	Modelamiento numérico de los taludes del tajo.....	70
4.2.1	Condiciones de análisis.....	70
4.2.2	Sección de análisis	72
4.2.3	Propiedades de los materiales	72
4.2.4	Resultados del análisis.....	73
	Conclusiones	75
	Recomendaciones	77
	Referencias bibliográficas.....	78
	Anexos	81

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	5
Tabla 2 : Resumen de las estaciones geomecánicas.....	30
Tabla 3 : Líneas de refracción sísmica ejecutadas.....	31
Tabla 4 : Ubicación de ensayos MASW	31
Tabla 5 : Resumen de las estaciones geomecánicas.....	32
Tabla 6 : Resultados de ensayos de refracción sísmica.....	34
Tabla 7 : Resultados de ensayos de refracción sísmica.....	36
Tabla 8 : Parametros dinámicos de los materiales	37
Tabla 9 : Resultados de ensayos de compresión simple.....	38
Tabla 10: Resultados de ensayos de carga puntual.....	39
Tabla 11: Resultados de ensayos de carga puntual (DCR, 2015)	39
Tabla 12: Resultado de los ensayos de propiedades índice de rocas	40
Tabla 13: Resultado de los ensayos de propiedades índice de rocas (DCR, 2015)	40
Tabla 14: Resultado de los ensayos de compresión triaxial	41
Tabla 15: Resultado de los ensayos de compresión triaxial (DCR, 2015)	41
Tabla 16: Resultado de los ensayos de corte directo	41
Tabla 17: Resultado de los ensayos de propiedades elásticas	42
Tabla 18: Rangos de valoración según el índice RMR.....	43
Tabla 19: Resumen de valoración RMR.....	43
Tabla 20: Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas.....	53
Tabla 21: Resumen de análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos	63
Tabla 22: Parámetros de los materiales a usar en el análisis de estabilidad global	68
Tabla 23: Resultados del análisis de estabilidad global	69
Tabla 24: Parámetros deformacionables.....	72

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Ubicación del proyecto.....	21
Figura 2 : Geología regional del proyecto	22
Figura 3 : Geología local del proyecto.....	25
Figura 4 : Columna estratigráfica regional y local del proyecto	28
Figura 5 : Componentes fundamentales empleados en los ensayos de refracción Sísmica y MASW.....	32
Figura 6 : Registro Típico, Shot Central en el ensayo de refracción sísmica.....	33
Figura 7 : Registro típico obtenido del ensayo MASW	34
Figura 8 : Curva domocronica.....	35
Figura 9 : Perfil de velocidades de ondas P	35
Figura 10: Curvas de dispersión MASW	36
Figura 11: Variación de velocidades de ondas S	37
Figura 12: Verificación del ancho mínimo de la berma de seguridad	46
Figura 13: Configuración geométrica de los taludes del tajo–banco triple(Sección B-B) .	47
Figura 14: Fuentes sismogénicas superficiales.....	50
Figura 15: Fuentes sismogénicas intermedias y profundas.....	51
Figura 16: Distribución de Isoaceleraciones para 10% de Excedencia en 50 años	55
Figura 17: Distribución de Isoaceleraciones para 10% de Excedencia en 100 años	56
Figura 18: Mapa de distribución de máximas intensidades sísmicas	58
Figura 19: Análisis de estabilidad estatico de la falla planar (familia S1).....	64
Figura 20: Análisis de estabilidad pseudo-estático de la falla planar (familia S1)	64
Figura 21: Sección de análisis de estabilidad A-A.....	65
Figura 22: Sección de análisis de estabilidad B-B (izquierda)	66
Figura 23: Sección de análisis de estabilidad B-B (derecha).....	66
Figura 24: Sección de análisis de estabilidad C-C	67
Figura 25: Propiedades de resistencia y deformación – arenisca alterada/oxidada	68

Figura 26: Sección de análisis numérico.....	72
Figura 27: Contorno de máximas deformaciones por esfuerzos de corte.....	73
Figura 28: Contorno de desplazamientos totales y vectores de desplazamientos.....	74

Introducción

La estabilidad de taludes en operaciones mineras a tajo abierto constituye un aspecto crítico para garantizar la seguridad operacional, proteger la integridad del personal, evitar pérdidas económicas y minimizar impactos ambientales. La complejidad geológica, la presencia de discontinuidades, la meteorización, las condiciones hidrogeológicas y la configuración geométrica del tajo son factores que, de no evaluarse de forma adecuada y actualizada, pueden comprometer la sostenibilidad técnica y económica de la explotación. En este contexto, la presente investigación desarrolla un estudio geotécnico integral para analizar la estabilidad de los taludes de una operación a tajo abierto, combinando caracterización de campo, ensayos de laboratorio y modelamiento numérico.

El trabajo está organizado en cuatro capítulos que permiten abordar la problemática de manera secuencial y estructurada.

Capítulo I: Presenta la parte introductoria del estudio, incluyendo la descripción del problema de investigación, los objetivos generales y específicos, la hipótesis formulada y la definición de variables. Asimismo, se incorpora un análisis de antecedentes referenciales, diferenciando los aportes internacionales, nacionales y locales que sirven de sustento técnico y contextual para la investigación.

Capítulo II: Desarrolla el marco teórico y conceptual que fundamenta el trabajo. Se exponen los principios y metodologías asociadas a la exploración de campo, los ensayos de laboratorio y la caracterización geomecánica del macizo rocoso. Se incluyen los fundamentos técnicos para el análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos y global, así como los criterios y procedimientos para el modelamiento numérico de taludes en minería a cielo abierto. El marco conceptual define los términos y parámetros clave empleados en todo el desarrollo del estudio.

Capítulo III: Describe el desarrollo de la investigación, comenzando por la caracterización de la unidad de estudio, su ubicación y accesibilidad, y el contexto

geológico regional y local. Se detalla la metodología aplicada en la exploración de campo y en los ensayos de laboratorio para obtener parámetros geotécnicos representativos. Posteriormente, se presenta la valoración del macizo rocoso mediante el sistema RMR, la zonificación geomecánica, la caracterización de discontinuidades y el análisis de estabilidad a nivel de bancos, incorporando factores de diseño, condiciones hidrogeológicas, propiedades de los materiales y análisis cinemáticos.

Capítulo IV: Expone el análisis y discusión de resultados, presentando el estudio de estabilidad global de los taludes bajo distintos escenarios y su verificación mediante modelamiento numérico. Se interpretan los resultados obtenidos, evaluando factores de seguridad y comparándolos con los mínimos admisibles.

Finalmente, se consolidan las conclusiones, que sintetizan los hallazgos técnicos más relevantes, y las recomendaciones, orientadas a garantizar la estabilidad de los taludes a lo largo de la vida útil de la operación mediante monitoreo geotécnico continuo y ajustes de diseño según el avance de la explotación.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

La minería a tajo abierto es una de las principales formas de explotación de yacimientos minerales en el mundo. Este método consiste en la remoción progresiva de grandes volúmenes de material desde la superficie, mediante la excavación de bancos y la conformación de taludes que delimitan el avance del tajo. Su aplicación es especialmente adecuada en depósitos con amplia extensión lateral, baja ley o condiciones geológicas que permiten la remoción económica del material estéril.

Este tipo de explotación presenta múltiples ventajas frente a la minería subterránea, entre las cuales destacan una mayor capacidad de producción, facilidad para el control de operaciones, mejores condiciones de ventilación y seguridad, así como la posibilidad de utilizar maquinaria de gran escala. Sin embargo, también requiere de una adecuada planificación en el diseño del tajo, el manejo de los desmontes, el control del drenaje superficial y subterráneo, y la gestión de la estabilidad de los taludes, factores que determinan en conjunto la eficiencia técnica y económica del proyecto.

La estabilidad de taludes en operaciones a cielo abierto representa un aspecto esencial dentro de la ingeniería minera, ya que influye directamente en la seguridad de las operaciones, la continuidad de la producción y los costos asociados al movimiento de material. La configuración geométrica del tajo —que incluye parámetros como altura de banco, ángulo de talud, ancho de berma y ángulo global— depende en gran medida de las características geotécnicas del macizo rocoso, la presencia de estructuras geológicas como fallas o diaclasas, el régimen hidrogeológico y las condiciones operativas del proyecto.

El estudio geotécnico aplicado a la minería tiene como propósito caracterizar el comportamiento del macizo rocoso ante las condiciones de excavación y carga, identificando los mecanismos potenciales de falla que podrían comprometer la estabilidad del tajo. Para ello, se integran datos provenientes de estudios geológicos, ensayos de

laboratorio y de campo, análisis estructurales y modelamientos numéricos, los cuales permiten definir parámetros representativos de resistencia, cohesión, fricción y deformabilidad del terreno.

En las etapas de diseño y planificación minera, la evaluación geotécnica es una herramienta fundamental para determinar los límites económicos y físicos del tajo, optimizando la relación desmonte/mineral (SR) y garantizando la seguridad operativa. Asimismo, estos estudios proporcionan información clave para establecer programas de monitoreo geotécnico, drenaje y control de aguas subterráneas, que contribuyen al manejo preventivo de la estabilidad en todas las fases de la operación.

En términos generales, el análisis geotécnico no solo cumple una función técnica, sino también estratégica, al integrarse con la geología, la ingeniería de minas y la gestión ambiental. De esta manera, se convierte en un elemento indispensable dentro de la planificación de proyectos mineros sostenibles, asegurando que las operaciones se desarrollen bajo criterios de seguridad, eficiencia y responsabilidad ambiental.

1.2 Descripción del problema de investigación

La minería a tajo abierto es una de las metodologías más utilizadas para la explotación de yacimientos de minerales debido a su viabilidad técnica y económica. Sin embargo, esta modalidad implica la construcción y mantenimiento de taludes de gran altura y extensión, cuya estabilidad es determinante para garantizar la seguridad de las operaciones, la integridad de los trabajadores y la sostenibilidad económica del proyecto. Una falla en un talud no solo puede ocasionar pérdidas millonarias por paralización de actividades, sino también consecuencias graves en términos de daños materiales, afectación ambiental y accidentes laborales.

La estabilidad de un talud está directamente relacionada con múltiples factores, entre los que destacan: la resistencia del macizo rocoso y del material de cobertura, la presencia de discontinuidades (fracturas, fallas, diaclasas), la meteorización, las condiciones hidrogeológicas, la geometría de diseño (ángulo y altura de talud, ancho de bermas) y las cargas dinámicas generadas por las actividades mineras o eventos sísmicos.

Una caracterización geotécnica insuficiente o no actualizada puede conducir a diseños que no respondan de manera adecuada a estas condiciones, incrementando la probabilidad de fallas.

En muchos casos, los estudios iniciales de geotecnia realizados durante la etapa de factibilidad se mantienen como referencia durante gran parte de la vida útil de la mina, sin considerar que las condiciones del macizo rocoso pueden variar con la profundidad, el avance de la explotación y la alteración inducida por la intemperización y las voladuras. Esto genera un escenario de incertidumbre respecto a la verdadera capacidad de los taludes para mantener su estabilidad en el tiempo.

Ante esta situación, se hace imprescindible realizar una evaluación geotécnica integral y actualizada, que no solo determine las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, sino que también incorpore modelamientos numéricos y análisis de factores de seguridad bajo diferentes condiciones operativas y ambientales. Este enfoque permitirá identificar zonas críticas, optimizar el diseño de taludes y establecer medidas preventivas que reduzcan el riesgo de inestabilidad, garantizando así la continuidad operacional y minimizando impactos económicos, sociales y ambientales.

Por lo anterior expuesto se formula la siguiente interrogante:

¿En qué medida una deficiente evaluación del macizo rocoso impacta en la estabilidad de los taludes en una operación minera a tajo abierto?

1.3 Objetivo

Evaluar la estabilidad de los taludes de la operación minera a tajo abierto mediante un estudio geotécnico integral que incluya caracterización del macizo rocoso, análisis de propiedades geomecánicas y modelamiento numérico.

1.4 Hipótesis

Una evaluación geotécnica detallada que contemple la caracterización del macizo rocoso, el análisis de parámetros de resistencia y el modelado numérico, permitirá determinar la estabilidad de los taludes de la operación minera a tajo abierto.

1.5 Variables

- Variable Independiente (V.I.): Evaluación geotécnica del macizo rocoso.
 - Calidad de la Caracterización Geomecánica: RMR, GSI, Q-System.
 - Propiedades del Macizo Rocosos: Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS), Cohesión (c), Ángulo de Fricción Interna (ϕ).
- Variable dependiente (V.D.): Estabilidad de Taludes en la Operación Minera a Tajo Abierto.
 - Condiciones de Estabilidad: Factor de Seguridad (FS) estático y pseudo-estático, Probabilidad de Falla (Pf).
 - Modos de Falla: Tipo de falla (plana, cuña, vuelco, circular).
 - Geometría del Talud: Altura, Ángulo de Cara, Ancho de Berma.

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	MÉTODOS
¿En qué medida una deficiente evaluación del macizo rocoso impacta en la estabilidad de los taludes en una operación minera a tajo abierto?	Evaluar la estabilidad de los taludes de la operación minera a tajo abierto mediante un estudio geotécnico integral que incluya caracterización del macizo rocoso, análisis de propiedades geomecánicas y modelamiento numérico.	Una evaluación geotécnica detallada que contemple la caracterización del macizo rocoso, el análisis de parámetros de resistencia y el modelado numérico, permitirá determinar la estabilidad de los taludes de la operación minera a tajo abierto.	Variable Independiente (Causa): Evaluación Geotécnica del Macizo Rocos.	- Calidad de la Caracterización Geomecánica: RMR, GSI, Q-System.	Técnicas de Recolección de Datos:
				- Propiedades del Macizo Rocos: Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS), Cohesión (c), Ángulo de Fricción Interna (ϕ).	- Mapeo geológico y geotécnico.
			Variable Dependiente (Efecto): Estabilidad de Taludes en una Operación Minera a Tajo Abierto.	- Condiciones de Estabilidad: Factor de Seguridad (FS) estático y pseudo-estático, Probabilidad de Falla (Pf).	- Ensayos de laboratorio (propiedades físicas y mecánicas).
				- Modos de Falla: Tipo de falla (plana, cuña, vuelco, circular). - Geometría del Talud: Altura, Ángulo de Cara, Ancho de Berma.	- Modelamiento numérico 2D/3D (e.g., Phase2, FLAC). - Revisión bibliográfica y de informes geotécnicos.

Nota: Fuente elaboración propia.

1.6 Antecedentes investigativos

1.6.1 Antecedentes internacionales

Ricchio-Hitchcock, E. & Chatterjee, S. (2025). Evaluating Geomechanical Uncertainty and Slope Reliability Analysis in Open Pit Mine Planning and Optimization. Este estudio tuvo como objetivo incorporar la incertidumbre geomecánica (principalmente mediante la variable RQD) en la planificación y optimización de taludes de minas a tajo abierto mediante análisis de confiabilidad, usándose simulaciones de Monte Carlo dentro del método de equilibrio límite. Los resultados muestran que un ángulo de talud de hasta 48° ofrece 100 % de confiabilidad (riesgo de falla cero) y produce un flujo de caja proyectado de 2 684 millones USD. Ángulos más empinados (hasta 56°) incrementan considerablemente el flujo económico (hasta 2 935 millones USD), pero elevan la probabilidad de falla al 23 %, con confiabilidad de 77 %, ilustrando claramente el trade-off entre seguridad y rentabilidad.

Pedemonte, I. (2018). Evaluation of Open Pit Slope Deformation with the Novel Numerical Modeling Software Slope Model. La tesis se propuso validar un nuevo software de modelación numérica (Slope Model, SM) para el análisis de estabilidad de taludes en una mina a tajo abierto en Chile, comparando sus resultados con los obtenidos mediante el software validado 3DEC. Se concluyó que SM logra representar correctamente los desplazamientos del macizo rocoso, aunque reporta factores de seguridad ligeramente menores que 3DEC, lo que coincide con su capacidad de simular la generación y propagación de nuevas fracturas y fracturación del macizo, resultando en una resistencia más realista del mismo.

Huang, Y. et al (2024). Stability Evaluation of Open-Pit Coal Mine Slopes Under Rainfall Infiltration Effects: A Case Study (Shengli Open-Pit Coal Mine, Inner Mongolia, China). Este trabajo estudió la estabilidad de taludes en la mina de carbón Shengli (China) bajo condiciones de infiltración de lluvia. Usando perfiles geológicos de alta precisión obtenidos por perforación, se evaluó el acoplamiento fluido-sólido, infiltración de lluvia, intercalaciones débiles y características tingeodiferenciales de las capas. Bajo condiciones

naturales los taludes cumplen requisitos de estabilidad, pero con fluctuaciones del nivel freático y saturación superficial pueden activarse deslizamientos a lo largo de capas débiles. Se recomienda control de agua subterránea (bombeo) y se cuantifica un ángulo de excavación seguro, útil como guía de diseño y operación segura.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Terán, M. (2020). Evaluación de la estabilidad física de los taludes de un tajo abierto en función a la alteración hidrotermal del macizo rocoso. Esta tesis analiza cómo distintos tipos de alteración hidrotermal (potásica, propilítica, filítica, skarn) afectan las propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta y del macizo rocoso en un tajo abierto ubicado en el sur del Perú y asociado a un depósito tipo pórfido de cobre-molibdeno. El objetivo general fue evaluar la estabilidad física de los taludes considerando esta alteración, para lo cual se realizó una nueva caracterización geotécnica, análisis de sensibilidad según tipo de alteración, diseño de un modelo geotécnico actualizado y análisis de estabilidad interrampa y global mediante métodos de equilibrio límite (Hoek-Brown) y elementos finitos. Como resultado, se definieron ángulos interrampa y globales actualizados según los distintos tipos de alteración, mejorando los criterios de diseño y permitiendo una zonificación geotécnica más precisa orientada a garantizar estabilidad, recuperación de mineral y rentabilidad financiera.

Peña, L. (2014). Estabilidad de taludes en tajo. Este trabajo documenta una evaluación geotécnica detallada de la estabilidad de taludes de un tajo minero en Perú, para lo cual se llevó a cabo un programa de investigaciones que incluyó mapeo geológico-geotécnico, mapeo estructural y dos campañas de perforación con muestreo del macizo rocoso. Las muestras fueron enviadas al laboratorio geotécnico de ANDDES y al laboratorio de Mecánica de Rocas de la UNI en Lima, permitiendo obtener propiedades del terreno que respaldaron el análisis de factores de seguridad y la formulación de recomendaciones para la estabilidad del talud evaluado.

Gutiérrez, G. (2022). Propuesta de evaluación de estabilidad y optimización de parámetros de diseño geotécnico de taludes en tajo abierto. El estudio presenta una

metodología teórico-práctica estructurada para evaluar la estabilidad de taludes en tajo abierto y optimizar parámetros de diseño geotécnico. Propone integrar una base de datos geotécnicos consistente del macizo rocoso, modelamiento teórico y la experiencia empírica, en una secuencia que incluye procesamiento de datos, correlación con unidades geológicas, modelado estructural y diseño de taludes. El enfoque busca proporcionar una herramienta metodológica robusta que permita ajustar parámetros de diseño (como ángulos y bermas) en función de condiciones reales del terreno, mejorando la seguridad y eficiencia operativa.

Pérez, H. y Portal, E. (2023). Evaluación geomecánica y geotécnica, para el diseño de estabilidad física de taludes del tajo noreste de una mina en Junín, 2022. La tesis tiene como propósito principal determinar un diseño de estabilidad física para los taludes del sector noreste de un tajo abierto en la región de Junín, mediante una evaluación geomecánica y geotécnica del terreno. Aunque el documento completo está embargado hasta 2074, la descripción indica que se busca fundamentar técnicas de diseño basadas en análisis técnicos actualizados del macizo rocoso, en vistas a garantizar condiciones seguras y eficientes en la explotación del tajo

1.6.3 Antecedentes locales

Medina, M. (2014). Estudio geomecánico de estabilidad de taludes del tajo Chapi Sulfuros. Este estudio geomecánico se centra en evaluar la estabilidad de los taludes del tajo en Chapi Sulfuros, operado por Minera Pampa de Cobre S.A., subsidiaria del Grupo Milpo, con la finalidad de identificar condiciones de diseño que aseguren seguridad operativa y continuidad productiva. Para ello, se realizó un detallado levantamiento geológico-geotécnico, incluyendo caracterización del macizo rocoso, análisis del drenaje, condiciones climáticas, estructuras geológicas y zonación mineral, que sustentaron cálculos de estabilidad mediante métodos de equilibrio límite y análisis estructural. Los resultados permitieron delimitar zonas más susceptibles a inestabilidad, determinar geometrías de taludes adecuadas y establecer recomendaciones de ingeniería para el diseño y reforzamiento, con miras a optimizar parámetros como ángulos, bermas y manejo

de agua, garantizando tanto la seguridad como la eficiencia en el desarrollo del tajo. Se concluyó que el conocimiento detallado del entorno geomecánico es clave para prevenir fallas y mantener la operatividad en la mina.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Exploración de campo*

La exploración de campo es esencial en geotecnia, especialmente en minas a tajo abierto, pues permite obtener datos in situ acerca del comportamiento del macizo rocoso y su respuesta ante las condiciones operativas. Esta fase comprende la instrumentación geomecánica (estaciones geomecánicas) y los ensayos geofísicos, que suministran información indispensable sobre propiedades del terreno, estructuras internas y condiciones dinámicas que afectan la estabilidad de taludes.

2.1.1.1 Estaciones geomecánicas. Las estaciones geomecánicas consisten en puntos estratégicamente ubicados en la superficie o pared del talud, donde se registran datos fundamentales como desplazamientos, deformaciones, tensiones, presión de poro y otros indicadores geomecánicos durante la operación minera. Este monitoreo permite evaluar la evolución de la estabilidad y detectar posibles fallas o zonas críticas a tiempo. Szwedzicki (1993) destaca que la instrumentación geotécnica en minas a cielo abierto y subterráneas es crucial para monitorear desplazamientos, flujo de aguas y condiciones ambientales, garantizando así una base técnica confiable para decisiones de diseño y control durante la explotación

2.1.1.2 Ensayos geofísicos. Los ensayos geofísicos en exploración geotécnica consisten en técnicas no invasivas que permiten inferir las propiedades del subsuelo—como densidad, resistividad, velocidad de ondas sísmicas y contraste eléctrico—para caracterizar la distribución de discontinuidades, la saturación del terreno y la presencia de cuerpos mineralizados o zonas frágiles. Estos métodos complementan la información obtenida con sondeos y estudios directos y aumentan la eficiencia y cobertura de la evaluación del terreno. Se utiliza habitualmente la sismoelectricidad inducida (IP), electromagnetismo (EM), resistividad, gravedad y sísmica superficial.

2.1.2 Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio son fundamentales para determinar con precisión las propiedades mecánicas y elásticas de las rocas. Estos datos son esenciales para caracterizar el material, calibrar modelos numéricos y diseñar taludes seguros y eficientes.

2.1.2.1 Compresión simple. El ensayo de compresión simple (UCS) mide la resistencia de una muestra intacta sin confinamiento lateral, y sirve como base para clasificaciones de resistencia y modelación de ruptura. Además, investigaciones recientes consideran la tasa de carga y su efecto en la resistencia última, particularmente en condiciones profundas o de alta carga. Señalan que, a mayor tasa de carga, suelen incrementarse tanto la resistencia como la rigidez del material (Gao et al., 2025)

2.1.2.2 Carga puntual. Aunque no se encontraron referencias muy recientes específicas al ensayo de carga puntual, este sigue siendo un método válido para estimar rápidamente la resistencia de roca cuando se dispone de muestras no normalizadas, como menciona Wang et al. (2023), quienes agruparon parámetros derivados de ensayos diversos para predecir propiedades triaxiales mediante aprendizaje automático

2.1.2.3 Propiedades índice de rocas. Recientes análisis revisan cómo los índices elásticos (como módulo de Young y coeficiente de Poisson) pueden derivarse tanto estática como dinámicamente mediante pruebas de laboratorio o registros geofísicos, subrayando la importancia de combinarlas para modelaciones más realistas (Mahdi y Alrazzaq, 2023)

2.1.2.4 Compresión triaxial. El ensayo triaxial continúa siendo la piedra angular para obtener parámetros de resistencia, deformabilidad y criterios de falla. Jiang et al. (2016) reportaron que el módulo de Young y el coeficiente de Poisson del mármol de Jinping siguen distribuciones log-normales, y proporcionaron estimaciones estadísticas útiles para confiabilidad en ingeniería geológica

. Además, Gao et al. (2025) analizaron cómo diferentes velocidades de carga-descarga en ensayos triaxiales verdaderos afectan modos de falla y energía de deformación, importante para condiciones profundas reales

. Otro estudio reciente muestra que los métodos de medición local (strain gauges adheridos al espécimen) ofrecen valores de módulo elástico hasta 45 % más altos en comparación con mediciones globales, lo cual es esencial para evitar sesgos experimentales

2.1.2.5 Corte directo. El ensayo de corte directo consiste en aplicar una fuerza de cizallamiento a una probeta contenida en una caja dividida horizontalmente, mientras se mantiene una carga normal constante. Es especialmente útil para determinar la resistencia al corte de discontinuidades y planos de debilidad. Patton (1966) demostró que la rugosidad y el grado de alteración superficial afectan significativamente la resistencia obtenida.

2.1.2.6 Propiedades elásticas. La caracterización de propiedades elásticas está avanzando significativamente tanto mediante métodos estáticos como dinámicos. Investigaciones actuales emplean ensayos triaxiales a alta presión/temperatura combinados con mediciones ultrasónicas en tiempo real (Harbord et al., 2022)

También, estudios como Saleh Mahdi y Alrazzaq (2023) destacan la integración de datos estáticos y logs sísmicos para estimar módulos elásticos en zonas donde no hay muestras físicas disponibles.

2.1.3 Caracterización geomecánica de los macizos rocosos

La caracterización geomecánica es el proceso mediante el cual se determinan las propiedades físicas, mecánicas y estructurales del macizo rocoso para evaluar su comportamiento ante excavaciones y cargas. Este análisis combina observaciones de campo, ensayos de laboratorio y métodos empíricos de clasificación geotécnica. Su correcta aplicación es fundamental para el diseño seguro de taludes en minas a tajo abierto y otras obras geotécnicas. La caracterización geomecánica incluye la valoración global del macizo, la zonificación geomecánica y la evaluación detallada de sus discontinuidades.

2.1.3.1 Valoración del macizo rocoso (Sistema RMR). El sistema RMR (Rock Mass Rating), desarrollado por Bieniawski (1973, actualizado en 1989), es uno de los métodos más empleados para clasificar macizos rocosos. Evalúa parámetros como

resistencia a la compresión simple de la roca intacta, RQD (Rock Quality Designation), espaciado de discontinuidades, estado de las discontinuidades, condiciones de agua subterránea y ajuste por orientación. La puntuación obtenida clasifica el macizo en categorías que orientan el diseño de excavaciones y sostenimiento. Estudios recientes han revisado y adaptado el RMR para contextos mineros a cielo abierto, incorporando ajustes por meteorización y anisotropía estructural (Singh y Goel, 2022).

2.1.3.2 Zonificación geomecánica. La zonificación geomecánica consiste en dividir el área de estudio en unidades homogéneas en cuanto a propiedades geomecánicas, considerando litología, estructura, alteración y estado de fracturamiento. Este procedimiento permite generar mapas y modelos tridimensionales que facilitan el diseño de taludes con criterios diferenciados según cada zona. Según Hoek y Marinos (2020), la zonificación es más efectiva cuando se combina información de mapeo geológico, datos geofísicos y resultados de ensayos mecánicos, integrados en un modelo geotécnico continuo.

2.1.3.3 Caracterización geomecánica de las discontinuidades. Las discontinuidades —fracturas, diaclasas, fallas, planos de estratificación— controlan en gran medida la resistencia y estabilidad del macizo rocoso. Su caracterización incluye mediciones de campo y clasificación de atributos físicos y mecánicos, que posteriormente alimentan sistemas como RMR, SMR (Slope Mass Rating) o GSI (Geological Strength Index).

2.1.3.3.1 Grado de alteración de las discontinuidades. El grado de alteración describe la modificación mineralógica y estructural de las superficies de discontinuidad, generalmente causada por procesos hidrotermales o meteorización. Un alto grado de alteración reduce la resistencia al corte e incrementa la deformabilidad, tal como señalan estudios de Marinos y Hoek (2019).

2.1.3.3.2 Espesor y tipo de relleno. El espesor y naturaleza del material de relleno en las discontinuidades son determinantes en su resistencia. Rellenos arcillosos o

con minerales expansivos, incluso en espesores milimétricos, pueden disminuir significativamente la cohesión y el ángulo de fricción (Palmström y Stille, 2015).

2.1.3.3.3 Circulación de agua y grado de saturación del relleno. La presencia y circulación de agua reducen la resistencia efectiva al corte e incrementan la presión de poros, pudiendo activar fallas. Investigaciones recientes destacan la importancia de integrar mediciones hidrogeológicas en la caracterización estructural para mejorar predicciones de estabilidad (Tschuchnigg et al., 2021).

2.1.3.3.4 Orientación de las discontinuidades. La orientación relativa de las discontinuidades respecto a la excavación determina modos de falla como deslizamientos planares, cuñas o vuelcos. El ajuste por orientación en sistemas como RMR y SMR permite estimar su influencia directa en la estabilidad de taludes (Singh & Goel, 2022).

2.1.4 Análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos

El análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos se centra en evaluar la seguridad de las unidades más pequeñas que conforman la geometría del tajo abierto. Un banco es la franja horizontal resultante de la excavación de un determinado espesor de roca o suelo, y su estabilidad influye directamente en la seguridad operativa y en la eficiencia del diseño global del talud. Este análisis permite optimizar parámetros como el ángulo de cara, la altura del banco y el ancho de la berma de seguridad, considerando condiciones geotécnicas, hidrogeológicas y sísmicas (Hoek & Bray, 2014).

2.1.4.1 Diseño de los taludes del tajo. El diseño de taludes a nivel de banco combina criterios empíricos, análisis numéricos y evaluación estructural. La geometría de cada banco debe equilibrar la máxima recuperación de mineral con la estabilidad requerida, asegurando bermas efectivas y un ángulo de cara compatible con las condiciones geomecánicas y estructurales. La metodología propuesta por Read y Stacey (2009) recomienda basar el diseño en datos de campo, clasificación geomecánica y análisis cinemáticos y de equilibrio límite.

2.1.4.1.1 Estimación del ancho mínimo de la berma de seguridad. El ancho mínimo de la berma de seguridad debe permitir la detención de caídas de rocas y ofrecer

un espacio seguro para la circulación de equipos. Su cálculo se basa en la altura del banco, el ángulo de cara, el tamaño potencial de bloques inestables y las recomendaciones de seguridad de normativas como las de la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 2015). Bermas insuficientes aumentan el riesgo de accidentes y reducen la funcionalidad del tajo.

2.1.4.1.2 Verificación del ángulo de la cara de los bancos. El ángulo de cara del banco influye en la probabilidad de inestabilidad superficial y caída de rocas. Ángulos demasiado pronunciados pueden maximizar el mineral expuesto pero comprometer la seguridad. La verificación se realiza comparando la inclinación proyectada con la resistencia al corte de la roca y las discontinuidades, usando análisis cinemáticos y criterios como el de Hoek-Brown (Hoek & Marinos, 2020).

2.1.4.2 Factores de seguridad mínimos admisibles. El factor de seguridad (FS) es la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras. Para bancos, se recomiendan valores mínimos entre 1.2 y 1.5 en condiciones estáticas, y mayores cuando se incluyen cargas sísmicas o condiciones hidrodinámicas adversas (Read & Stacey, 2009).

2.1.4.3 Condiciones de agua subterránea. El agua subterránea reduce la resistencia efectiva y puede inducir presiones de poros, facilitando la ocurrencia de fallas. La caracterización hidrogeológica y el drenaje preventivo son fundamentales para garantizar la estabilidad. Estudios recientes destacan la necesidad de integrar modelaciones de flujo acopladas al análisis de estabilidad (Tschuchnigg et al., 2021).

2.1.4.4 Coeficiente sísmico. En zonas sísmicamente activas, el análisis de estabilidad debe incluir un coeficiente pseudo-estático que represente la aceleración horizontal esperada. Este valor se toma de códigos de diseño locales o de análisis probabilísticos de peligrosidad sísmica. Su aplicación suele reducir el FS, por lo que se adoptan medidas adicionales de seguridad (Nian et al., 2020).

2.1.4.5 Propiedades de los materiales. El análisis requiere parámetros mecánicos de la roca intacta y del macizo: cohesión, ángulo de fricción, resistencia a

compresión simple y módulos elásticos. Estos valores se obtienen de ensayos de laboratorio y correlaciones con clasificaciones geomecánicas (ISRM, 2015).

2.1.4.6 Análisis cinemático del macizo rocoso. El análisis cinemático determina la posibilidad de fallas estructurales según la orientación de discontinuidades y la geometría del talud, usando herramientas como stereonets. Identifica modos de falla típicos:

2.1.4.6.1 Falla de tipo planar. La falla tipo planar se produce a favor de una superficie pre - existente, que puede ser una estratificación, una junta tectónica, una falla geológica, etc. La condición básica es la presencia de discontinuidades buzando a favor del talud, con la misma dirección que el talud y un buzamiento mayor que el ángulo de fricción de las discontinuidades. En taludes excavados paralelos a la estratificación, pueden tener lugar roturas planas por deslizamiento de los estratos.

2.1.4.6.2 Falla tipo cuña. Corresponde al deslizamiento de un bloque en forma de cuña, formado por dos planos de discontinuidad, a favor de la línea de su intersección. Para que se produzca este tipo de rotura, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud, y se deben cumplir iguales condiciones cinemáticas que para la rotura plana.

La obtención del factor de seguridad es más compleja que en el caso de rotura planar debido a que el cálculo debe hacerse en tres dimensiones, entrando en la caracterización geométrica del problema, lo cual conlleva un número mucho mayor de variables angulares.

2.1.4.6.3 Falla por volteo. Se producen en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o sub-paralela al mismo. En general, los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí. Este tipo de rotura implica un movimiento de rotación de los bloques y la estabilidad no está únicamente condicionada por su resistencia al corte.

2.1.4.7 Análisis de estabilidad a nivel de bancos. Se realiza mediante métodos de equilibrio límite, análisis numéricos (elementos finitos o discretos) y

validaciones empíricas. Este análisis debe ser específico para cada banco, considerando heterogeneidad geológica, orientación estructural, presencia de agua y efectos sísmicos. La integración de datos geomecánicos y cinemáticos permite ajustar parámetros de diseño y definir medidas de control como pernos, mallas o drenajes.

2.1.5 Modelamiento numérico de los taludes del tajo

El modelamiento numérico es una herramienta fundamental en ingeniería geotécnica para evaluar la estabilidad de taludes en minas a tajo abierto, permitiendo simular el comportamiento mecánico del macizo rocoso bajo diversas condiciones de carga, geometría y parámetros geotécnicos. Su aplicación facilita la comprensión de mecanismos de falla complejos y la optimización de diseños, reduciendo riesgos operativos y costos asociados a sobreexcavaciones o fallas no previstas (Hoek & Marinos, 2020).

En el análisis de taludes, los métodos numéricos permiten superar las limitaciones de los enfoques puramente empíricos o de equilibrio límite, ya que pueden incorporar no linealidades en el comportamiento del material, anisotropías estructurales, acoplamiento hidro-mecánico y condiciones transitorias como cargas sísmicas o infiltraciones de agua. Según Read & Stacey (2009), los modelos numéricos se utilizan tanto para validar diseños preliminares como para evaluar escenarios de operación y cierre de mina.

Existen diversos enfoques numéricos empleados en el modelamiento de taludes:

- **Método de Elementos Finitos (FEM):**

Resuelve ecuaciones de equilibrio en un dominio discretizado, permitiendo simular deformaciones y tensiones en 2D o 3D. Programas como Phase2 o PLAXIS se usan ampliamente para analizar deformabilidad y seguridad de taludes en roca y suelo (Zienkiewicz et al., 2014).

- **Método de Diferencias Finitas (FDM):**

Representa el dominio como una malla de nodos y actualiza los valores de desplazamiento, velocidad y tensión en pasos de tiempo. Software como FLAC3D es útil para problemas de deformación progresiva y análisis dinámicos (Itasca, 2019).

- **Método de Elementos Discretos (DEM):**

Modela el macizo como un conjunto de bloques o partículas que interactúan mediante leyes de contacto. Es especialmente útil para taludes controlados por discontinuidades y para estudiar colapsos localizados o caída de rocas (Cundall y Strack, 1979).

- **Métodos híbridos FEM/DEM:**

Combinan la capacidad de simular deformaciones continuas y la fracturación progresiva, como en 3DEC o UDEC, permitiendo analizar la transición entre respuesta continua y discontinua.

La elección del método y software depende de la complejidad geológica, el tipo de material, la escala de análisis, la disponibilidad de datos y los objetivos del estudio. Además, la calibración del modelo mediante retroanálisis (back analysis) de casos reales es esencial para garantizar resultados confiables (Alejano et al., 2014).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Macizo rocoso

Conjunto de rocas unidas en un volumen geológico que presenta continuidad, pero que está atravesado por discontinuidades (fracturas, diaclasas, fallas) que afectan sus propiedades mecánicas y su comportamiento frente a excavaciones y cargas.

2.2.2 Talud

Superficie inclinada resultante de una excavación a cielo abierto, diseñada para permitir el acceso al mineral. Su geometría está determinada por la estabilidad requerida, la recuperación económica y las condiciones geotécnicas del sitio.

2.2.3 Factor de seguridad (FS)

Relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras en un talud. Un FS mayor que 1 indica estabilidad teórica, aunque en minería se adoptan valores mínimos admisibles según normativa y nivel de riesgo tolerado.

2.2.4 Clasificación geomecánica

Sistema de evaluación empírica del macizo rocoso que integra parámetros medidos en campo y laboratorio para categorizar su calidad. Entre los más usados en minería están el RMR, GSI y SMR, aplicados para estimar estabilidad y diseñar taludes.

2.2.5 Discontinuidad

Plano de debilidad natural en el macizo rocoso (falla, diaclasa, plano de estratificación) que condiciona la resistencia y la deformabilidad. Sus características (espaciado, orientación, rugosidad, relleno) influyen en los modos de falla.

2.2.6 Zonificación geotécnica

Proceso de subdividir el tajo y su entorno en unidades homogéneas según litología, estructura, alteración y propiedades mecánicas, para asignar parámetros de diseño diferenciados a cada zona.

2.2.7 Análisis cinemático

Técnica que, mediante diagramas estereográficos, determina la probabilidad de que la orientación de las discontinuidades permita fallas planares, en cuña o por volteo, considerando la geometría del talud.

2.2.8 Modelamiento numérico

Simulación matemática del comportamiento del talud y el macizo mediante métodos como elementos finitos, diferencias finitas o elementos discretos, incorporando propiedades del material, cargas y condiciones de borde.

2.2.9 Condiciones hidrogeológicas

Estado del agua subterránea en el macizo, incluyendo su nivel freático, presión de poros y circulación a través de discontinuidades, que puede influir en la reducción de resistencia y en la activación de fallas.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Unidad de estudio

3.1.1 Ubicación y accesibilidad

Unidad Minera se encuentra ubicada políticamente en el distrito de La Capilla, provincia de Sánchez Cerro, departamento de Moquegua, en la región sur del Perú, aproximadamente 55 km al Sureste de la ciudad de Arequipa.

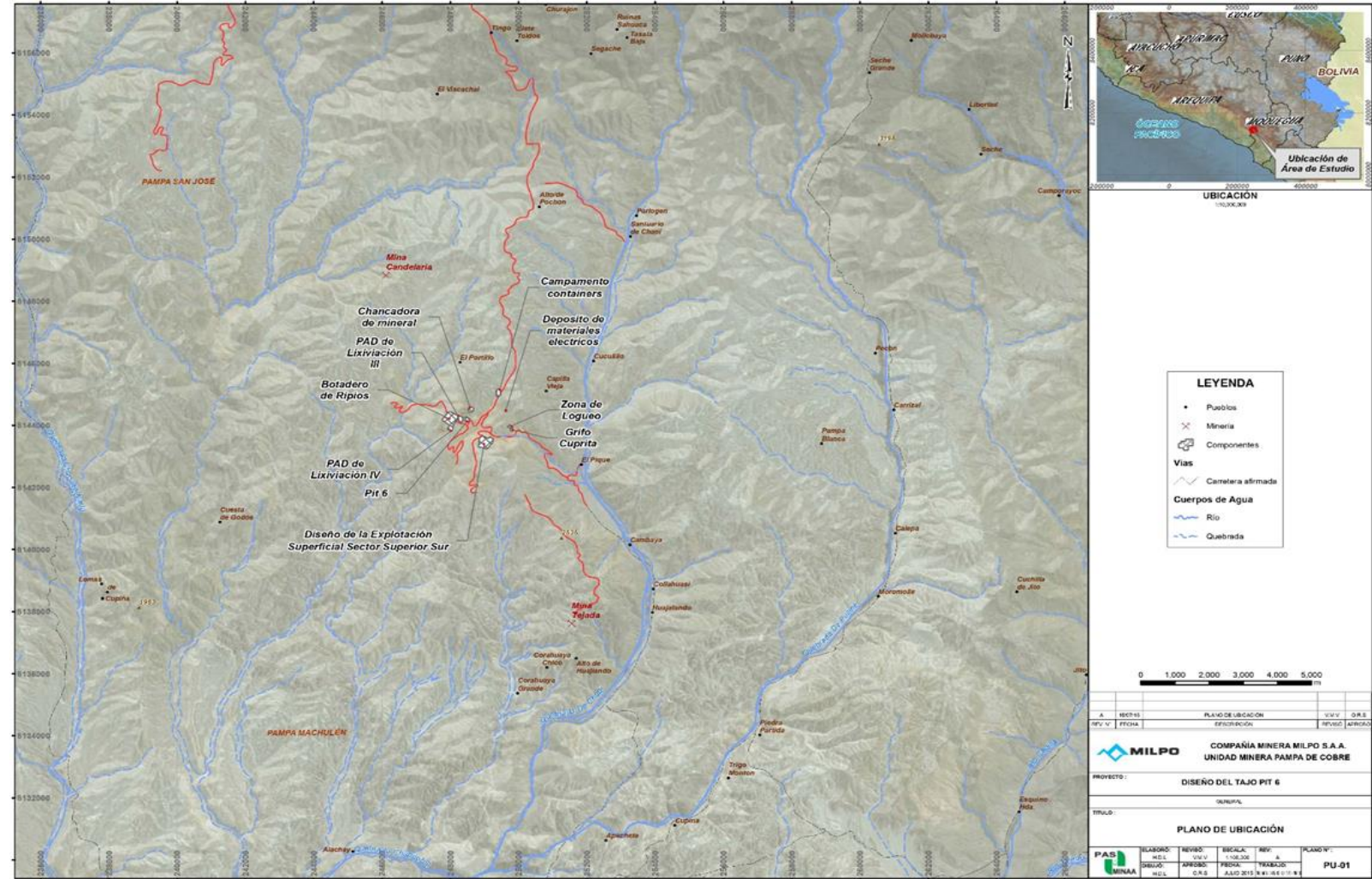
Es accesible desde la ciudad de Arequipa por la carretera que va al Santuario de la Virgen de Chapi, pasando por Yarabamba, hasta los 30 Km. asfaltado y los restantes 25 km afirmada hasta el centro minero. En la Figura 1 se presenta el plano de ubicación del proyecto, donde se identifica la posición de la Unidad Minera y las rutas de acceso desde la ciudad de Arequipa.

3.1.2 Geología regional

El análisis de la geología regional del área de estudio se basó en el Boletín N° 29 (Geología de los cuadrángulos de Puquina, Omate, Huaitire, Mazo Cruz y Pizacoma) y el Boletín N° 23 (Estudio de Riesgos Geológicos del Perú – Franja N°1) del INGEMMET. La región comprende dos unidades morfológicas principales, la Cordillera Occidental y el Altiplano, con orientación NO–SE. Las unidades litológicas presentes abarcan desde el Jurásico al Cuaternario, destacando: andesitas del Volcánico Chocolate (Jurásico Inferior), lutitas y areniscas del Miembro Cachíos (Jurásico Superior, Grupo Yura), areniscas cuarzosas, cuarcitas y lutitas del Miembro Labra, y calizas grises del Miembro Gramadal (Cretáceo Inferior). El marco estructural está dominado por la falla regional Chapi, acompañada de fallas locales, plegamientos y sobreescurrecimientos generados en diferentes eventos orogénicos. En la Figura 2 se muestra el plano de la geología regional del proyecto, donde se identifican las principales unidades litológicas y estructuras tectónicas de la zona.

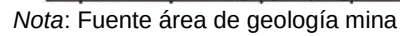
Figura 1

Ubicación del proyecto



Nota: Fuente área de geología mina.

Geología regional del proyecto



3.1.3 Geología local

El distrito presenta afloramientos de rocas sedimentarias, volcánicas y rocas subvolcánicas porfíricas.

3.1.3.1 Geomorfología. La zona de estudio se sitúa en el sur del Perú, a 60 km al SE de Arequipa, con acceso por trocha y ruta afirmada. El relieve es variado: se observan superficies planas, pendientes suaves, ondulaciones, y zonas agrestes con cerros escarpados y quebradas de corte transversal en “V”. En sectores altos predominan planicies interrumpidas por conos volcánicos y cadenas de cerros.

A nivel regional, el área se ubica en el sector oeste de la Cordillera Occidental, comprendiendo dos unidades principales: el Flanco Andino Occidental y las Colinas Disectadas.

Flanco Andino Occidental: Entre 1 800 y 3 100 m s. n. m., sobre rocas sedimentarias, volcánicas y parte del batolito de La Caldera. Presenta un cambio de pendiente marcado desde las planicies costeras, con cumbres redondeadas y numerosas quebradas profundas (hasta 200 m).

Colinas Disectadas: Relieve ondulado con pendientes moderadas, cortado por quebradas cuyo patrón de drenaje depende de la naturaleza de las rocas, ya sean sedimentarias o volcánicas.

3.1.3.1.1 Geomorfología local. Se diferencian seis unidades:

- **Unidad cerros:** Cimas redondeadas a 2 600–2 800 m s. n. m., con pendientes moderadas a agrestes y estabilidad regular.
- **Unidad de lomas:** Elevaciones bajas de pendiente suave, extendidas en gran parte del área.
- **Laderas de gran pendiente:** Faldas con gradientes de hasta 50 %, presencia de rocas escarpadas y taludes subverticales.

- **Laderas de poca pendiente:** Pendientes de 25–50 %, con escarpes y taludes localizados.
- **Depósitos aluviales:** Acumulaciones pequeñas de gravas y materiales heterogéneos poco consolidados.
- **Depósitos coluviales:** Material homogéneo de gravas angulosas a subangulosas, producto de alteración in situ y gravedad, ubicados al pie de laderas.

En la Figura 3 se muestra la configuración geológica local del proyecto, evidenciando la distribución de las unidades litológicas y las formas de relieve que caracterizan la zona, incluyendo cerros, laderas, depósitos coluviales y aluviales.

3.1.3.2 Estratigrafía. El área se encuentra en una franja transversal a los Andes, con secuencias sedimentarias marinas intercaladas con rocas volcánicas, batolitos y cuerpos plutónicos, desde el Jurásico al Cuaternario.

- **Jurásico Inferior – Formación Chocolate:** Andesitas porfiríticas gris-rojizas con horizontes calcáreos, brechas, derrames y tobas.
- **Jurásico Medio – Formación Socosani:** Calizas grises, no presentes en el área de estudio.
- **Jurásico Superior a Cretáceo Inferior – Grupo Yura:** En discordancia con la Formación Chocolate, incluye:
 - Formación Labra: Areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas con limolitas y lutitas, además de hornfels y areniscas verdosas sílico-calcáreas, aflorando en Cuprita.
 - Formación Gramadal: Calizas gris-beige con margas delgadas, restringidas al SE de Cuprita y Quebrada Campanayoc.
 - Formación Hualhuani: Areniscas cuarzosas con “ripples”, ampliamente distribuidas.
- **Cretáceo Inferior – Formación Murco:** Lutitas y cuarcitas con transición a calizas, ausentes en la zona del proyecto.

- **Cuaternario:** Depósitos eólicos y coluviales que cubren irregularmente la superficie.
- **Rocas intrusivas:** Stocks, diques y sills de variada composición (granodiorítica, monzonítica, cuarzomonzonítica, cuarzodiorítica, andesítica y dacítico-andesítica) que cortan la Formación Chocolate y el Grupo Yura, asociados a mineralización hidrotermal y generando relieves topográficos negativos.

3.1.3.2.1 Estratigrafía local. El área de estudio presenta las siguientes unidades:

- **Volcánicos Chocolate (Jurásico Inferior)**

Lavas andesíticas gris-violáceas a gris-verdosas, textura porfirítica con plagioclasas, intercaladas con horizontes calcáreos. Afloran al sur, con metamorfismo de contacto en Milagritos y contacto fallado con el Grupo Yura en Tajo América.

- **Grupo Yura (Jurásico Superior – Cretácico Inferior)**

En el área se observan tres formaciones:

- **Formación Labra:** Areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas con limolitas y lutitas, intercaladas con hornfels y capas posiblemente de origen ígneo (sill diorítico). Afloran ampliamente en Cuprita–América.
- **Formación Gramadal:** Calizas gris-beige con margas delgadas; afloran en el SE de Cuprita y Qda. Campanayoc.
- **Formación Hualhuani:** Areniscas cuarzosas con ripples, fuertemente fracturadas y mineralización de óxidos de cobre en planos de estratificación y fractura; presentes en sectores como Pit 6 y pads de lixiviación.

- **Rocas intrusivas (Cretácico Superior – Terciario)**

Intrusiones ígneas diversas:

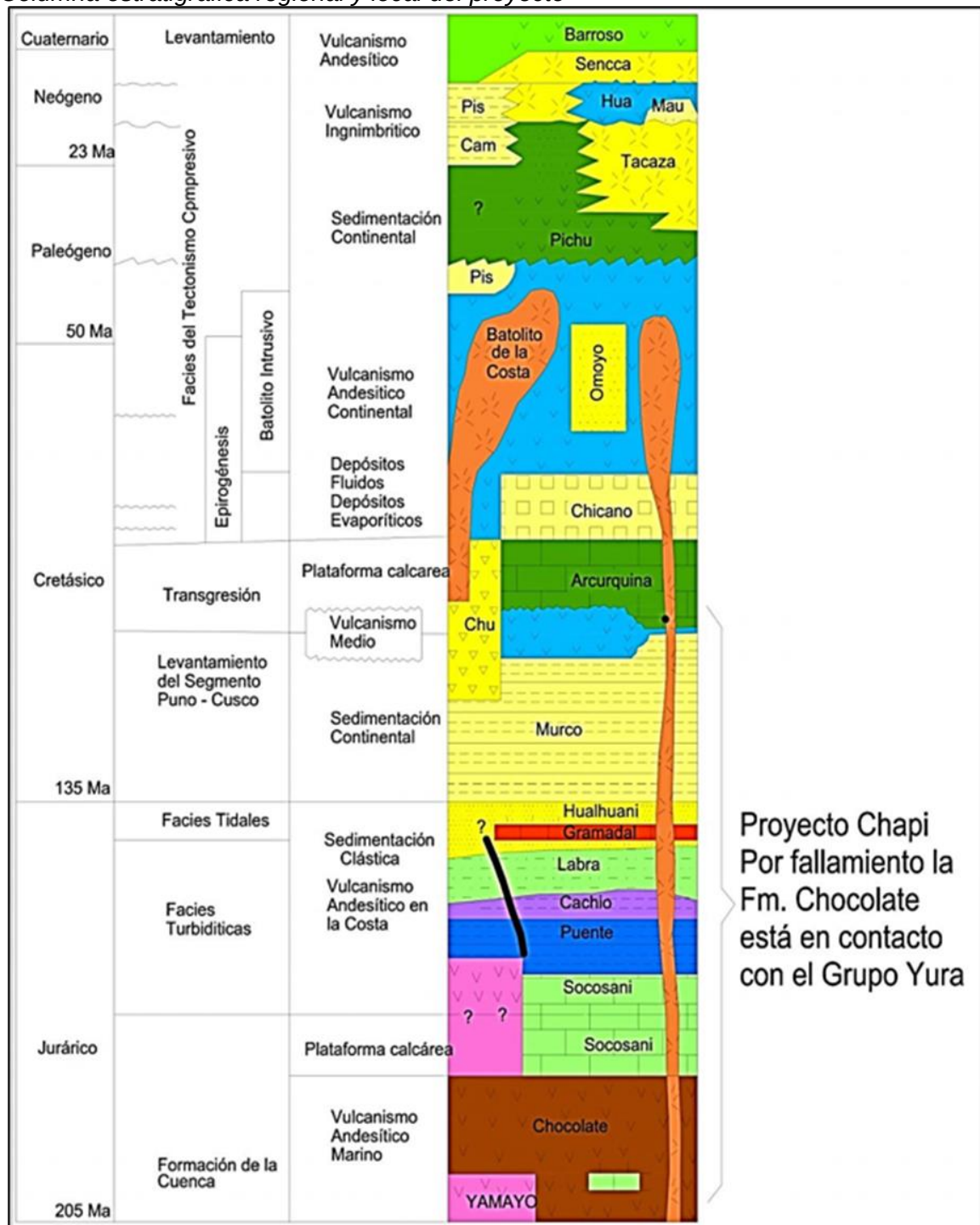
- **Granodiorita (Cretácico Superior):** Stocks que intruyen a la Fm. Hualhuani y Volcánicos Chocolate; textura fanerítica media.

- **Monzonitas (Cretácico Superior):** Stocks en el NW de la Falla Chapi, intruidos por pórfido cuarzo monzonítico; color gris rosáceo.
- **Pórfido cuarzo monzonítico (Terciario Inferior):** Stocks tabulares a lo largo de la Falla Chapi, ligados a mineralización.
- **Pórfido cuarzo diorítico (Terciario Inferior):** Stocks asociados a fallas Chapi y Atahualpa 3.
- **Diques andesíticos porfiríticos (Terciario Superior):** Andesitas subvolcánicas con magnetita y alteración propilítica; afloran en Cuprita y a lo largo de la Falla Chapi.
- **Diques dacíticos-andesíticos (Terciario Superior):** Apófisis ácidas a lo largo de la Falla América, con alteración cuarzo-sericita.

Estos intrusivos y diques subvolcánicos cortan al Grupo Yura y la Fm. Chocolate, formando relieves topográficos negativos, frecuentemente cubiertos por material eólico y coluvial. En la Figura 4 se muestra la columna estratigráfica regional y local del proyecto.

Figura 4

Columna estratigráfica regional y local del proyecto



Nota: Fuente área de geología mina

3.2 Investigaciones geotécnicas

3.2.1 Exploración de campo

Con la finalidad de caracterizar los macizos rocosos que conforman los taludes del tajo, se ejecutaron estaciones geomecánicas, se tomó muestras representativas para

ejecutar un programa de ensayos de laboratorio de mecánica de rocas y adicionalmente se realizaron ensayos geofísicos (refracción sísmica y MASW).

En el Anexo 1, se presenta el Plano de Ubicación de Investigaciones Geotécnicas, donde se presenta la ubicación de las estaciones geomecánicas, de las líneas sísmicas y de los ensayos MASW ejecutados.

En los siguientes ítems se presenta con más detalle una descripción de las actividades ejecutadas durante la investigación geotécnica.

3.2.1.1 Estaciones geomecánicas. Se establecieron 6 estaciones geomecánicas (utilizando el mapeo de celdas) distribuidas convenientemente en área del tajo, registrando para cada discontinuidad la dirección de buzamiento, buzamiento, espaciamiento, persistencia, separación, rugosidad, meteorización y presencia de agua. Se tomó muestras representativas de roca, las cuales fueron identificadas y embaladas para ser remitidas al laboratorio.

El número de estaciones geomecánicas (seis en total) se determinó considerando los criterios de homogeneidad litológica, continuidad estructural y estabilidad geotécnica del macizo rocoso dentro del área de estudio. En este contexto, la representatividad del muestreo no depende exclusivamente de la cantidad de puntos, sino de la distribución estratégica de estos frente a las zonas de interés geomecánico.

- **Cobertura espacial (variabilidad lateral):**

Las seis estaciones fueron ubicadas en sectores representativos del tajo, abarcando las principales unidades geológicas y variaciones estructurales observadas —fracturas, diaclasas y zonas de falla—. De esta manera, el muestreo captura la heterogeneidad lateral del macizo, asegurando que cada tipo de roca o dominio estructural esté representado.

- **Cobertura vertical:**

La distribución de los puntos también considera la variación vertical, con estaciones en diferentes niveles o bancos del tajo, permitiendo analizar la evolución de las condiciones geomecánicas en profundidad. Dado que los parámetros geotécnicos

tienden a estabilizarse en formaciones litológicamente consistentes, un número de 6 estaciones es suficiente para definir tendencias verticales sin redundancia de información.

▪ **Variabilidad geotécnica y estadística:**

Según las recomendaciones de ISRM (1981) y Hoek & Brown (1997), en formaciones con baja a media variabilidad geomecánica, entre 5 y 10 puntos de medición bien distribuidos son suficientes para caracterizar el macizo con un nivel de confianza aceptable. La aplicación de índices como RQD, RMR y GSI en las seis estaciones permite estimar de forma confiable los parámetros resistentes del macizo y su clasificación global.

▪ **Representatividad funcional del diseño minero:**

El muestreo se efectuó en zonas críticas para la estabilidad de taludes y rampas de acceso, donde la calidad del macizo influye directamente en el diseño geotécnico. Por tanto, los seis puntos no sólo reflejan condiciones geológicas, sino las condiciones operativas más relevantes para la ingeniería del tajo.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en área del tajo.

Tabla 2

Resumen de las estaciones geomecánicas

ESTACIÓN GEOMECÁNICA	COORDENADAS UTM (PSAD 56)		LITOLOGÍA
	ESTE	NORTE	
E-1	248 556	8 144 143	Arenisca oxidada con alteración argílica
E-2	248 527	8 144 137	Arenisca oxidada con alteración argílica
E-3	248 522	8 144 213	Arenisca oxidada con alteración argílica
E-4	248 487	8 144 204	Arenisca oxidada con alteración argílica
E-5	248 486	8 144 161	Arenisca oxidada con alteración argílica
E-6	248 505	8 144 268	Arenisca oxidada con alteración argílica

Nota: Fuente elaboración propia.

En el Anexo 2: Registros de Mapeo Geomecánico, se presentan los registros de las mediciones obtenidas en cada una de las estaciones geomecánicas por el método de celdas.

3.2.1.2 Ensayos geofísicos. En el presente trabajo de investigación se realizó una línea de refracción sísmica de 210 m y un ensayo MASW, tal como se aprecia en el Anexo 1, se presenta el Plano de Ubicación de Investigaciones Geotécnicas, la fuente de energía utilizada para generar las ondas sísmicas fue una comba de 25 libras, con la cual, para las longitudes de líneas utilizadas, se lograron obtener registros de ondas con la adecuada nitidez.

Los sectores donde se ha efectuado los ensayos geofísicos se presentan en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3

Líneas de refracción sísmica ejecutadas

SECTOR	LÍNEA SÍSMICA	LONGITUD TOTAL (M)
Zona del Tajo Pit 6	Línea LS – 01	72.00
	Línea LS – 02	78.00
	Línea LS – 03	76.80

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 4

Ubicación de ensayos MASW

SECTOR	SONDAJE	COORDENADA
Zona del Tajo Pit 6	MASW-1	E: 248572
		N: 8144159

Nota: Fuente elaboración propia.

3.2.1.2.1 Equipo e instrumentos a utilizar. Se empleó un sistema de prospección geofísica de la marca Geometrics, compuesto por un sismógrafo GEODE de 24 canales con convertidores A/D de 16 bits y alta velocidad de muestreo, conectado a una computadora portátil para almacenar y procesar datos.

El registro de vibraciones se realizó con 24 geófonos uniaxiales de 4.5 Hz, conectados mediante cables de geófonos, cables de disparo (trigger) y cables de datos. El equipo incluye además accesorios y herramientas complementarias.

El equipo utilizado para realizar el trabajo de refracción sísmica GEODE, es un sismógrafo que posee un sistema de adquisición de datos que es almacenada y procesada por una computadora (Figura 5).

Figura 5

Componentes fundamentales empleados en los ensayos de refracción Sísmica y MASW



Nota: Fuente área de geología mina

Tabla 5

Resumen de las estaciones geomecánicas

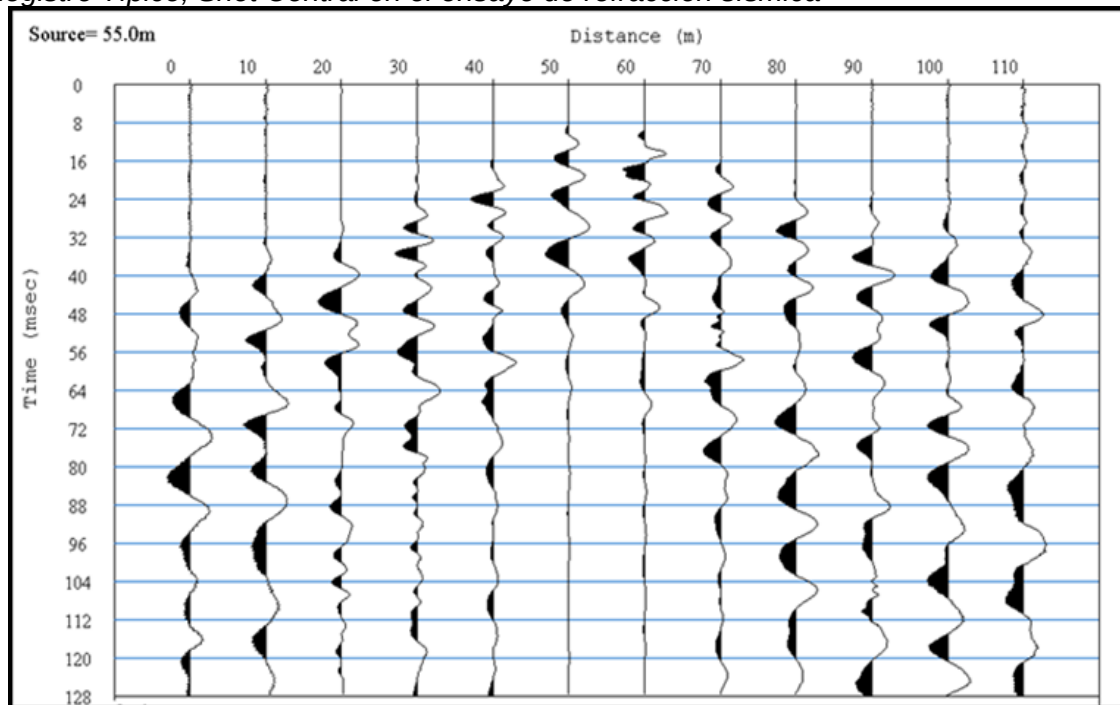
CARACTERÍSTICAS	VALOR NOMINAL
Modelo	GEODE
Nº de Canales	24
Resistencia de Salida	> 600 ohmios
Rango de Frecuencia	10 - 400 Hz
Filtro de Frecuencias	10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz.
Ganancia	63x(36 dB) 2%
Tiempo de Registro	64, 128, 256, 512, 1024
Tiempo de Retardo de Registro	0-999 ms.
Tiempo de Pre arranque	90% duración general
Sistema de Mando	Computadora IBM AT-80386sx
Tensión de Alimentación	12 V
Potencia de Consumo	48 W

Nota: Fuente elaboración propia

3.2.1.2.2 Procesamiento de la información e interpretación. A partir de los registros de las ondas sísmicas obtenidas en cada una de las líneas de refracción sísmica realizadas, similares al registro mostrado en la Figura 6, se determinaron las curvas tiempo distancia o dromocrónicas, las cuales representan las primeras llegadas de las ondas directas o refractadas a cada uno de los geófonos ubicados a distancias determinadas. Con esta información se realizó la interpretación de los perfiles sísmicos del área investigada.

Figura 6

Registro Típico, Shot Central en el ensayo de refracción sísmica

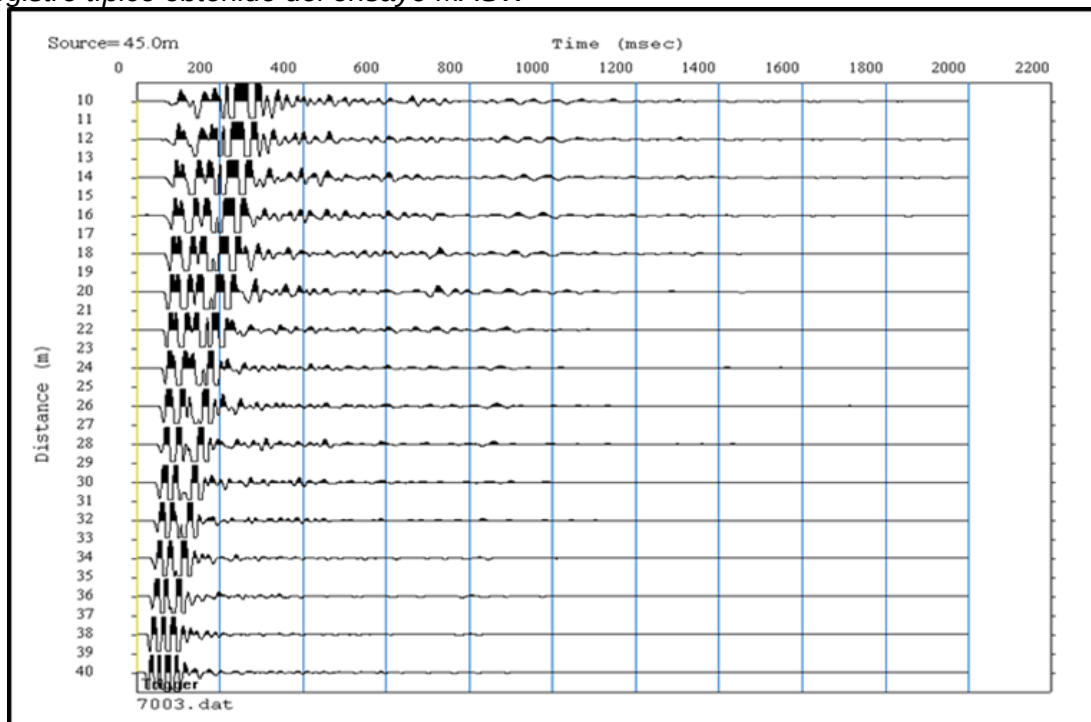


Nota: Fuente elaboración propia

De la misma manera, a partir de los registros de las ondas sísmicas obtenidas en cada uno de los ensayos MASW realizados, similares al registro mostrado en la Figura 7, se determinaron las curvas de dispersión, las cuales representan la velocidad de fase predominante de la onda Rayleigh para cada frecuencia. Con esta información se realizó la interpretación de los perfiles unidimensionales de ondas de corte del área investigada.

Figura 7

Registro típico obtenido del ensayo MASW



Nota: Fuente elaboración propia

3.2.1.2.3 Descripción de los perfiles sísmicos de ondas P. La interpretación de las líneas de refracción sísmica es resumida en la Tabla 6, mientras que en la Figura 8, se presentan las curvas dromocrónicas obtenidas del procesamiento de los registros de llegada, las cuales han sido procesadas con el módulo Plotrefa del programa Seisimager.

Finalmente en la Figura 9, se presentan los perfiles de velocidades de ondas P (V_p), generados mediante el procesamiento de las curvas dromocrónicas y ajustados de acuerdo con la topografía del terreno, lo que permite visualizar la distribución vertical de las velocidades sísmicas y la diferenciación de los materiales subyacentes.

Tabla 6

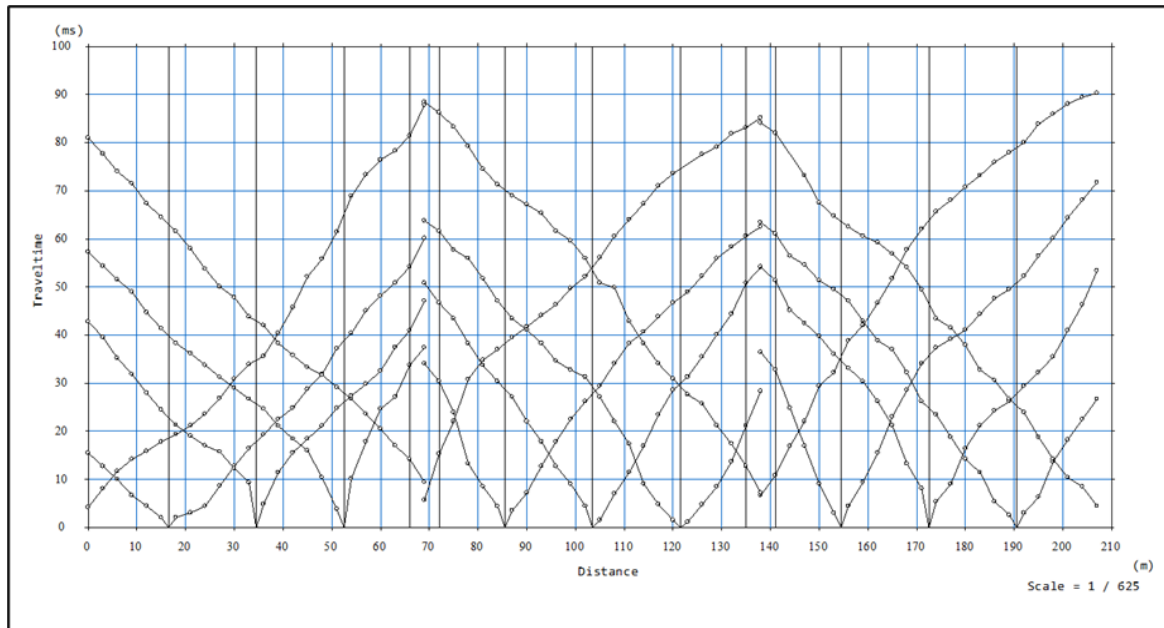
Resultados de ensayos de refracción sísmica

LÍNEA SÍSMICA	UBICACIÓN	ESTRATO	VP (m/s)	PROFUNDIDAD PROMEDIO (m)	TIPO DE MATERIAL
LS-PIT.06-01	Pit 6	1	200 -1000	0.00 a 5.00	Suelo
		2	1000 - 2000	5.00 a 30.00	Roca muy fracturada

Nota: Fuente elaboración propia

Figura 8

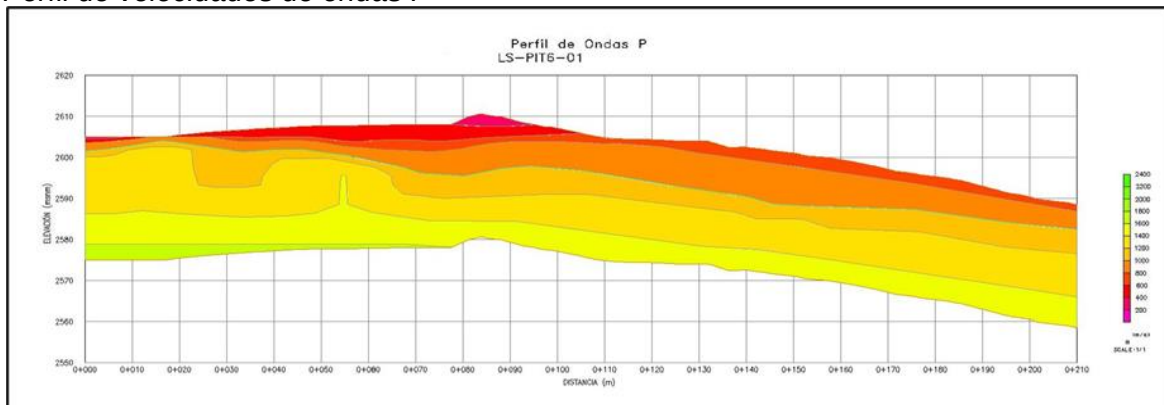
Curva domocronica



Nota: Fuente elaboración propia

Figura 9

Perfil de velocidades de ondas P



Nota: Fuente elaboración propia

3.2.1.2.4 Descripción de los perfiles sísmicos de ondas S. Con fines de comprobación y verificación de los resultados y una mejor estimación del espesor de los estratos a mayor profundidad que los ofrecidos por el ensayo de refracción sísmica, se ha ubicado un ensayo de ondas superficiales MASW en cada uno de los alineamientos de las tres líneas de refracción sísmica mencionadas anteriormente. Además, estos ensayos permiten obtener velocidades de ondas Vs y correlacionarlas con los parámetros dinámicos de suelos y rocas. La Tabla 7 resumen los perfiles unidimensionales inferidos mediante el ensayo MASW.

Los ensayos de ondas superficiales permitieron estudiar las velocidades de ondas S en el rango de profundidades de 40 m, en función de la calidad de la señal.

Tabla 7

Resultados de ensayos de refracción sísmica

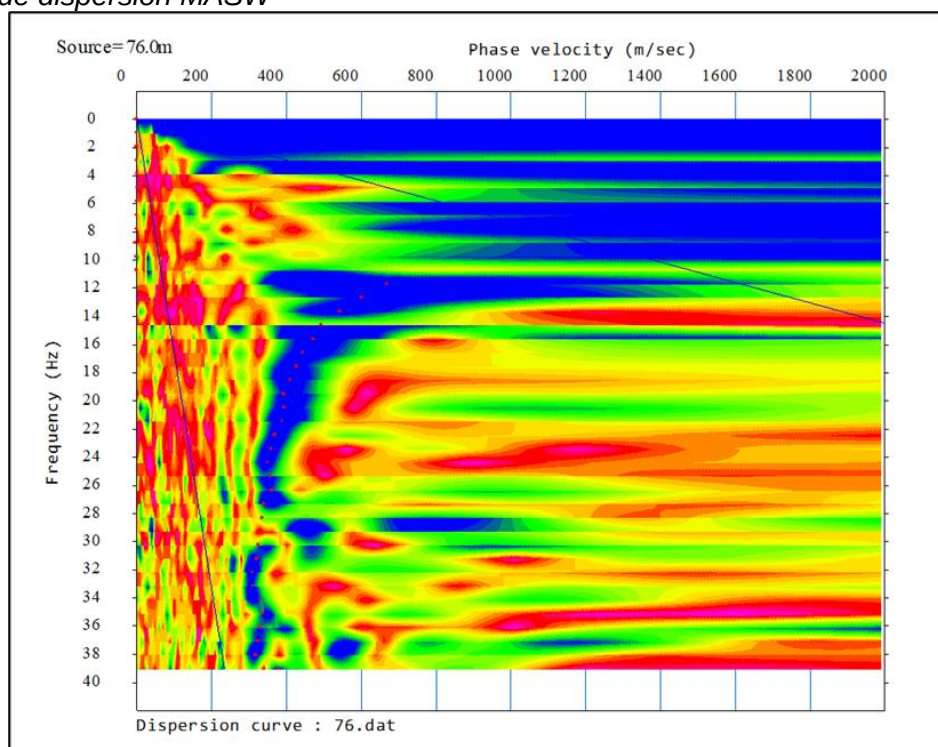
LÍNEA SÍSMICA	ESTRATOS	VS (m/s)	PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN
LM - 02	01	200-360	0 m a 8 m	Suelo rígido / roca descompuesta
	02	360-750	8 m a 40 m	Roca muy fracturada

Nota: Fuente elaboración propia

En la Figura 10, se presentan las curvas de dispersión obtenidas con el módulo SW del programa Seisimager, cuyo principio se basa en determinar las velocidades más reales en profundidad y que éstas se presentan constantes para cada capa, presentándose variabilidad cuando alcanza un estrato de diferente velocidad. En la Figura 11, se presentan los resultados de la variación de las velocidades de ondas de corte (Vs) con la profundidad, derivados del análisis de los ensayos MASW, los cuales permiten identificar los cambios en las propiedades dinámicas del subsuelo y la delimitación de las capas geotécnicas.

Figura 10

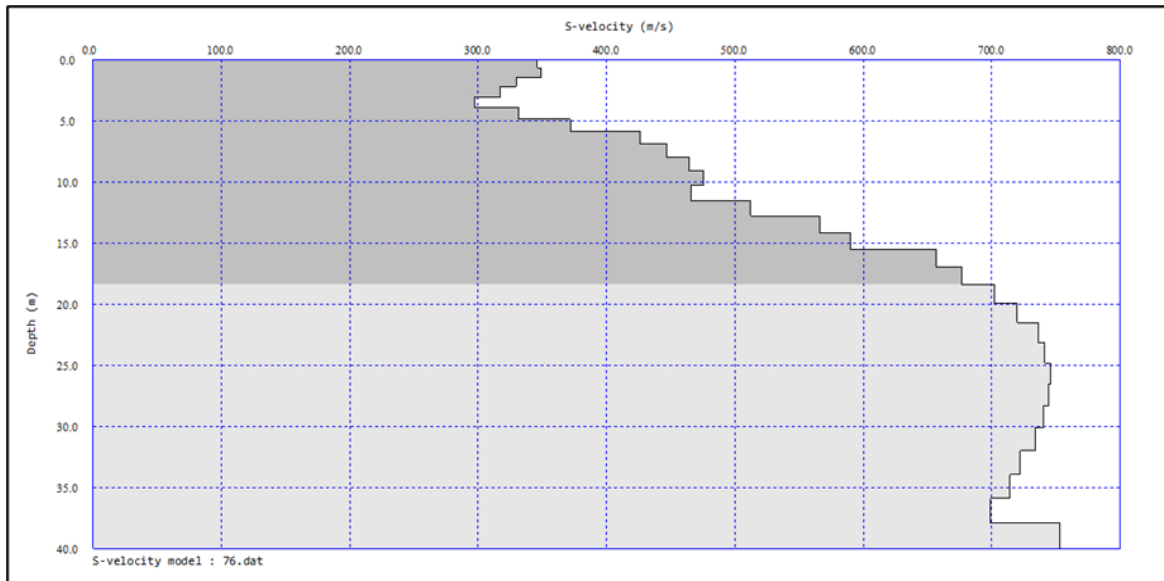
Curvas de dispersión MASW



Nota: Fuente elaboración propia

Figura 11

Variación de velocidades de ondas S



Nota: Fuente elaboración propia

3.2.1.2.5 Parámetros dinámicos del terreno. Con los valores de velocidades V_p y V_s obtenidos de los ensayos geofísicos, mediante correlaciones empíricas, es posible calcular el Coeficiente de Poisson, el Módulo de Elasticidad Máximo, el Módulo de Corte Máximo y el Módulo Volumétrico K_d de los suelos y rocas que constituyen la cimentación de las estructuras.

En la Tabla 8, se presenta el resumen de los parámetros dinámicos del suelo de cimentación considerando las relaciones mostradas anteriormente.

Tabla 8

Parámetros dinámicos de los materiales

Sector	Profundidad (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Coeficiente de Poisson	Densidad (KN/m^3)	Módulo de Corte G (KPa)	Módulo de Young para Pequeñas Deformaciones (KPa)	Módulo Bulk K (KPa)
Zona del Tajo	0.00 - 8.00	650.00	330	0.33	18.00	1.96E+06	5.20E+06	4.99E+06
	5.00 - 40.00	1400.00	800	0.26	21.00	1.34E+07	3.38E+07	2.32E+07

Nota: Fuente elaboración propia

3.2.2 Ensayos de laboratorio

Comprende la ejecución de un programa de ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los macizos rocosos característicos encontrados

en el área de estudio, estos ensayos se han realizado siguiendo los procedimientos indicados en las normas peruanas y las normas americanas, tal como las normas ASTM.

Con las muestras representativas extraídas, se determinaron las características físicas y mecánicas de los macizos rocosos que conforman los taludes del tajo mediante los ensayos estándar de laboratorio. Los ensayos de laboratorio se realizaron en el Laboratorio Geotécnico de la Empresa ROMAIA, Universidad Nacional Mayor de San Marcos y ensayos de Espectrometría en la UNI, de acuerdo a la siguiente relación:

▪ Propiedades físicas	ASTM C-97-02
▪ Carga puntual	ASTM D-5731-02
▪ Compresión simple	ASTM D-3148
▪ Ensayo corte directo	ASTM D-5607-95
▪ Ensayo de propiedades elásticas	ASTM D-5084

En los siguientes ítems se presenta la descripción de los resultados de los ensayos de laboratorio ejecutados:

3.2.2.1 Compresión simple. Con la finalidad de determinar los parámetros físico - mecánicos de los macizos rocosos, se realizó el ensayo de compresión simple para conocer la resistencia a la compresión de la roca intacta. El ensayo se realizó en muestras obtenidas de los sitios donde se realizó las estaciones geomecánicas. En la Tabla 9 se presenta un resumen de los resultados de este ensayo.

Tabla 9

Resultados de ensayos de compresión simple

MUESTRA	LITOLÓGIA	DUREZA	COMPRESIÓN SIMPLE (MPA)
M-1	Arenisca con alteración argílica	R2	10.60
M-2	Arenisca oxidada	R4	79.00

Nota: Fuente elaboración propia

3.2.2.2 Carga puntual. Con la finalidad de determinar los parámetros físico - mecánicos de los macizos rocosos, se realizó el ensayo de carga puntual para conocer la resistencia a la compresión simple de la roca intacta. El ensayo de carga puntual se realizó en muestras obtenidas de los sitios donde se realizó las estaciones geomecánicas.

Este ensayo se basa en la norma ASTM D-5731 y consiste en comprimir la muestra de roca entre dos puntos situados en generatrices opuestas, generando así la deformación y rotura de la roca. Como resultado de este ensayo se obtiene el índice de carga puntual corregido I50 con el cual se obtiene la resistencia a la compresión de la roca intacta

En la Tabla 10, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

Tabla 10

Resultados de ensayos de carga puntual

MUESTRA	LITOLOGÍA	DUREZA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)		
			MÁXIMO	MÍNIMO	PROMEDIO
M-1	Arenisca con alteración argílica	R2	14.00	7.00	11.00 (n = 10; σ = 3.30 MPa)
M-2	Arenisca oxidada	R4	98.80	79.60	84.50 (n = 10; σ = 8.60 MPa)

Nota: Fuente elaboración propia

Adicionalmente, en la Tabla 11 se presentan los resultados de los ensayos de carga puntual reportados por DCR (2015), ejecutados en rocas que conforman los tajos adyacentes a la zona del proyecto, los cuales servirán como referencia para definir de mejor manera las propiedades de los materiales que conforman los taludes del tajo.

Tabla 11

Resultados de ensayos de carga puntual (DCR, 2015)

MUESTRA	LITOLOGÍA	Índice de Carga Puntual I_s (MPa)	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)
CO2	Pizarra silicificada	6.9	162
CO3	Arenisca mineralizada silicificada	4.9	117
CO5	Arenisca mineralizada	1.3	31
CO6	Arenisca mineralizada silicificada	5.0	86
CO6	Arenisca mineralizada	0.7	16
CO9	Pizarra silicificada	4.4	102
CO9	Cuarcita	5.2	116
CO9	Arenisca mineralizada	0.8	17
C10	Arenisca mineralizada silicificada	4.0	89
C11	Pizarra mineralizada	3.1	65
C13	Arenisca	0.4	10
C14	Pizarra	0.4	9
C15	Arenisca mineralizada silicificada	4.8	94
C16	Pizarra	0.4	8
C17	Pizarra silicificada	6.4	126
C19	Arenisca oxidada	0.5	11

Nota: Fuente elaboración propia

Los certificados de los ensayos de carga puntual se presentan en el Anexo 3: Ensayos de Laboratorio de Carga Puntual.

3.2.2.3 Propiedades índice de rocas. Con las muestras de roca obtenidas de las estaciones geomecánicas, se ejecutaron ensayos para determinar las propiedades índices de la roca, tales como: gravedad específica, absorción (ASTM C-9783) y densidad (ASTM D-2937). En la Tabla 12 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de estos ensayos.

Tabla 12

Resultado de los ensayos de propiedades índice de rocas

MUESTRA	LITOLOGÍA	GRAVEDAD ESPECÍFICA (GS)	ABSORCIÓN (%)	DENSIDAD (KN/M3)
M-1	Arenisca con alteración argílica	2.43	4.33	24.70
M-2	Arenisca oxidada	2.51	2.11	24.39

Nota: Fuente elaboración propia

Adicionalmente, en la Tabla 13 se presentan los resultados de los ensayos de propiedades físicas reportados por DCR (2015), ejecutados en los tajos adyacentes a la zona del proyecto, los cuales servirán como referencia para definir las propiedades de los materiales.

Tabla 13

Resultado de los ensayos de propiedades índice de rocas (DCR, 2015)

LITOLOGÍA	GRAVEDAD ESPECÍFICA (GS)	ABSORCIÓN (%)	DENSIDAD (KN/M3)
Arenisca mineralizada y silicificada	2.84	1.79	27.83
Pizarra silicificada	2.73	1.24	26.78
Cuarcita	2.69	0.56	26.38

Nota: Fuente elaboración propia

3.2.2.4 Compresión triaxial. Se realizaron ensayos de compresión triaxial según la norma ASTM D-2664, preparándose tres especímenes para cada ensayo, en la Tabla 14 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

Tabla 14*Resultado de los ensayos de compresión triaxial*

MUESTRA	LITOLOGÍA	mi	COHESIÓN (MPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (°)
M-2	Arenisca oxidada	16.52	16.32	50.28
M-2(2)	Caliza	6.86	18.59	37.51

Nota: Fuente elaboración propia

Adicionalmente, en la Tabla 15 se presentan los resultados de los ensayos triaxiales reportados por DCR (2015), ejecutados en los tajos adyacentes a la zona del proyecto, los cuales servirán como referencia para definir las propiedades de los materiales.

Tabla 15*Resultado de los ensayos de compresión triaxial (DCR, 2015)*

LITOLOGÍA	mi	COHESIÓN (MPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (°)
Arenisca mineralizada silicificada	16.40	10.50	49.50
Pizarra silicificada	17.10	13.40	48.80
Cuarcita	20.40	16.50	51.90

Nota: Fuente elaboración propia

3.2.2.5 Corte directo. Con la finalidad de determinar los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades se realizaron ensayos de corte directo sobre las discontinuidades con caras paralelas a la dirección de corte, según la norma ASTM D-5607. En la Tabla 16 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

Tabla 16*Resultado de los ensayos de corte directo*

MUESTRA	LITOLOGÍA	COHESIÓN (MPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN RESIDUAL (°)
PIT 06 (M1)	Arenisca con alteración argílica	0.083	27.65
PIT 06 A (M2)	Arenisca oxidada	0.111	27.64

Nota: Fuente elaboración propia

3.2.2.6 Propiedades elásticas. Con la finalidad de determinar el módulo de deformación y el coeficiente de Poisson del macizo rocoso se ejecutó el ensayo de constantes elásticas. En la Tabla 17 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

Tabla 17

Resultado de los ensayos de propiedades elásticas

MUESTRA	E (GPa)	μ
Arenisca Oxidada	0.34	0.18

Nota: Fuente elaboración propia

3.3 Caracterización geomecánica de los macizos rocosos

Para caracterizar un macizo rocoso donde se está realizando cortes y/o se proyectará una excavación, es necesario conocer los parámetros de resistencia de la roca intacta y de las discontinuidades, así como la estructura del macizo rocoso (fracturamiento, número de familias, espaciamiento y las características básicas de las discontinuidades).

3.3.1 Valoración del macizo rocoso (sistema RMR)

Este sistema de clasificación fue desarrollado por el profesor Bieniawski en el Consejo Sudafricano para la investigación Científica e Industrial (CSIR) en 1973, fue actualizado en los años de 1979 y 1989. Esta clasificación tiene en cuenta seis parámetros básicos, cada uno de los cuales está subdividido en rangos de aplicaciones con sus puntuaciones respectivas, estos parámetros son:

- Resistencia de la roca intacta
- Fracturamiento (RQD)
- Espaciamiento de discontinuidades
- Estado de las discontinuidades
- Condición de agua subterránea
- Orientación relativa de las discontinuidades

El sistema de clasificación RMR, ha sido complementado con factores de reducción que dependen de la interrelación de los elementos de orientación de las discontinuidades con la obra de ingeniería, así como de los métodos de excavación. Así mismo, aplicando el sistema RMR, se estimará la calidad del macizo rocoso con fines de evaluación de estabilidad de taludes.

En la Tabla 18 se presentan los rangos de valoración del macizo rocoso según su clasificación RMR.

Tabla 18

Rangos de valoración según el índice RMR

ÍNDICE RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0
Clase	I	II	III	IV	V
Descripción de Roca	Muy Buena	Buena	Regular	Mala	Muy Mala

Nota: Fuente elaboración propia

En la Tabla 19 se presenta un resumen de la valoración del macizo rocoso de acuerdo al índice RMR determinado para cada estación geomecánica establecida en el área del tajo.

Tabla 19

Resumen de valoración RMR

ESTACIÓN GEOMECÁNICA	LITOLOGÍA	RMR	CLASIFICACIÓN
E-1	Arenisca oxidada con alteración argílica	32	MALA IVA
E-2	Arenisca oxidada con alteración argílica	32	MALA IVA
E-3	Arenisca oxidada con alteración argílica	34	MALA IVA
E-4	Arenisca oxidada con alteración argílica	43	REGULAR IIIB
E-5	Arenisca oxidada con alteración argílica	44	REGULAR IIIB
E-6	Arenisca oxidada con alteración argílica	34	MALA IVA

Nota: Fuente elaboración propia

En el Anexo 2, se presentan los registros de valoración del macizo rocoso de acuerdo con la clasificación RMR.

3.3.2 Zonificación geomecánica

Considerando la litología, calidad geomecánica y fracturamiento de los macizos rocosos que conforman los taludes del tajo, se han definido dos zonas geomecánicas. Estas zonas son definidas a continuación:

3.3.2.1 Zona 1. Esta zona está conformada por areniscas oxidadas y alteradas de mala calidad geomecánica (IV A), con índices RMR que varían entre 32 y 34 y bastante fracturadas con RQD entre 20 y 30. La dureza de la roca en este sector varía entre R1 y R2. Esta zona se encuentra conformando el fondo del tajo.

3.3.2.2 Zona 2. Esta zona está conformada por areniscas oxidadas y alteradas de regular calidad geomecánica (III B), con índices RMR que varían entre 43 y 44 y moderadamente fracturadas con RQD entre 35 y 40. La dureza de la roca en este sector es R3. Esta zona se encuentra conformando los taludes de la zona baja en el sector oeste del tajo. En esta zona se pueden formar cuñas y bloques de roca, los cuales son estables.

3.3.3 Caracterización geomecánica de las discontinuidades

El aspecto principal que condiciona el comportamiento mecánico de una discontinuidad es su resistencia al corte. La resistencia a la tracción perpendicular a las paredes de una discontinuidad se considera nula. Los factores que intervienen en la respuesta de una discontinuidad frente a un esfuerzo de corte son los siguientes:

3.3.3.1 Grado de alteración de las discontinuidades. En la evaluación del macizo rocoso, se ha estimado el grado de alteración de las discontinuidades, lo cual se ha registrado en las estaciones geomecánicas establecidas.

En general, el macizo rocoso que conforma los taludes del tajo, se encuentra moderadamente intemperizado a muy intemperizado.

3.3.3.2 Espesor y tipo de relleno. El espesor y tipo de relleno que se han identificado en las discontinuidades se ha evaluado y registrado en las estaciones geomecánicas realizadas.

En general, las discontinuidades del macizo rocoso que conforman los taludes del tajo presentan relleno de óxido y arcilla y tienen una abertura que varía entre 1 y 5 mm.

3.3.3.3 Circulación de agua y grado de saturación del relleno. Durante la evaluación geomecánica no se ha identificado la presencia o afloramiento de agua en los taludes, por lo que en las estaciones geomecánicas establecidas para el tajo se ha considerado la condición completamente seca.

3.3.3.4 Orientación de las discontinuidades. Durante la evaluación geomecánica se ha medido la orientación de las discontinuidades (dirección de buzamiento y buzamiento) y se ha registrado su condición respecto a la orientación del talud de corte.

En la zona del tajo, las discontinuidades principales presentan una condición entre favorable y regular respecto a la orientación del talud de corte. La caracterización geomecánica de las discontinuidades ha servido para estimar los índices RMR presentados anteriormente y para determinar los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades. En el Anexo 4: Caracterización Geomecánica, se presenta la orientación de las principales familias de discontinuidades en cada estación geomecánica, así como el diagrama de concentración de polos y el diagrama de rosas.

3.4 Análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos

Para analizar la estabilidad de un talud hay que tener en cuenta las características del macizo rocoso donde se proyecta la excavación. Si se trata de un macizo rocoso con gran resistencia en conjunto pero diaclasado o con fallas, son las discontinuidades las que van a gobernar el tipo de rotura. Si, por el contrario, la resistencia del macizo rocoso es baja, la rotura viene condicionada por la resistencia al corte de éste. Además, existen otros factores que pueden condicionar la rotura, como la presencia de agua, los efectos vibratorios provocados por voladuras, los sismos, etc.

Para evaluar la estabilidad de taludes se ha seguido la siguiente metodología:

- Ejecución de una campaña de investigación geológica y geotécnica.
- Investigación de las características resistentes de la roca intacta y de las discontinuidades, mediante ensayos de campo y de laboratorio.
- Determinación de los criterios de rotura más adecuados para explicar los comportamientos observados en los macizos rocosos.
- Análisis cinemático de roturas.
- Análisis de la estabilidad de los taludes utilizando modelos de equilibrio límite.

En esta sección se desarrollará la definición de los criterios de cálculo y el análisis cinemático de las roturas.

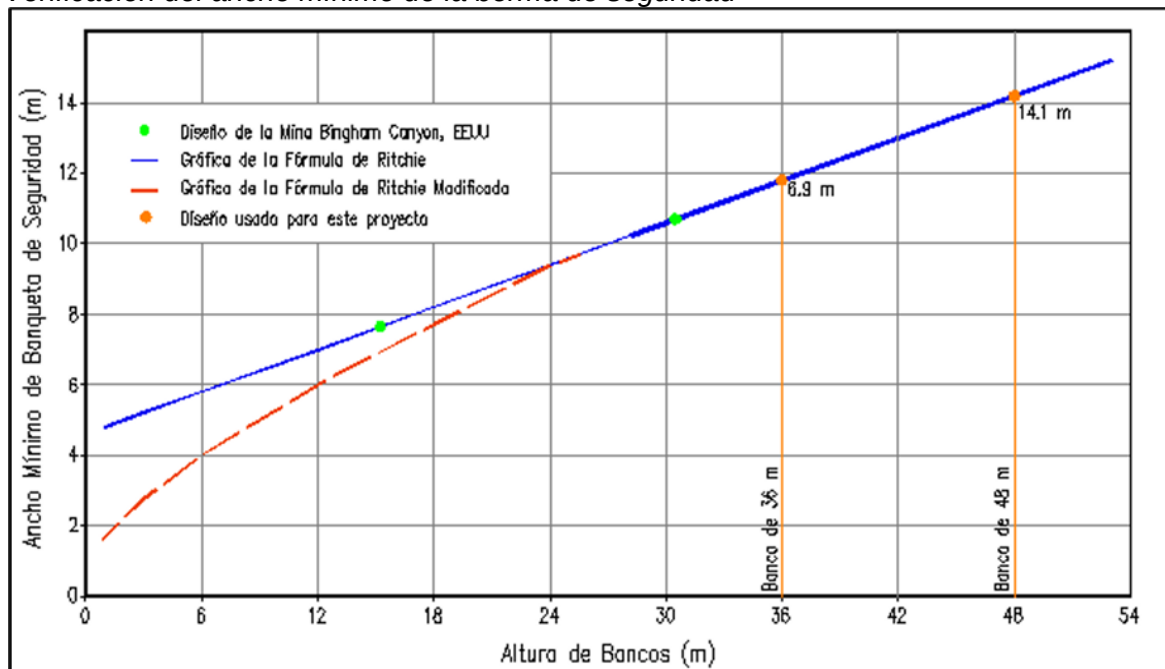
3.4.1 Diseño de los taludes del tajo

3.4.1.1 Estimación del ancho mínimo de la berma de seguridad. El diseño de una berma de seguridad consiste principalmente en mantener seguros al personal y a la

maquinaria de la caída de rocas que podría producirse cuando estos trabajan cerca a la cara de los bancos. Ritchie (1960) propuso una fórmula para calcular el ancho mínimo de una berma de seguridad en función de su altura, sin embargo esta fórmula es considerada muy conservadora para bermas de bancos de menos de 30 m de altura. Crouse (2008) ha propuesto una curva modificada, que sigue la fórmula de Ritchie para bermas de bancos de más de 30 m de altura, pero que considera anchos mínimos menores para bermas de bancos de menos de 30 m de altura, en la Figura 12 se presenta esta curva, la cual es usada para la estimación de los anchos mínimos de la berma de seguridad.

Figura 12

Verificación del ancho mínimo de la berma de seguridad



Nota: Fuente Crouse, 2008

Se ha respetado la altura de los bancos típicos considerados en el desarrollo del tajo en estudio; de esta manera, la altura de los bancos simples varía entre 2.0 m y 4.0 m y de los bancos triples es de 30 m.

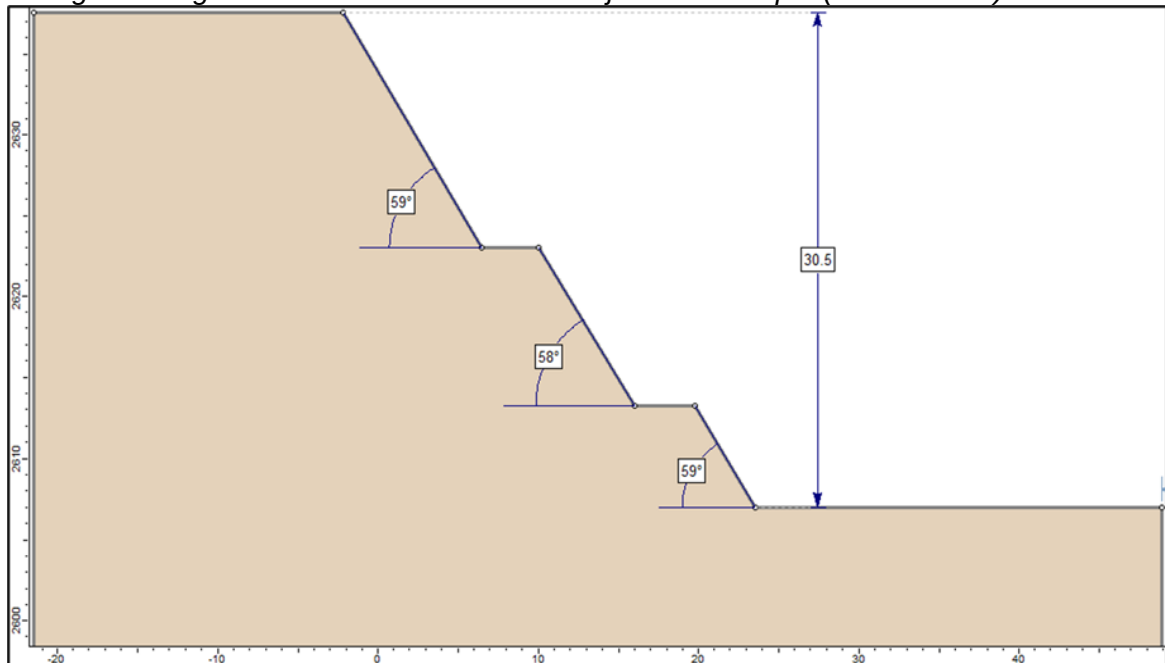
Con estos valores se calculó el ancho mínimo de la berma de seguridad, resultando 4.0 m y 11.0 m para los bancos simples y triples respectivamente.

Los valores de la berma de seguridad considerados en la configuración geométrica de los taludes del tajo son mayores que los valores obtenidos de la aplicación de la fórmula de Ritchie modificada, por lo que el diseño propuesto se considera adecuado.

En la Figura 13 se presenta la configuración geométrica considerada en la sección de análisis B-B, donde se observa que para altura de banco triple de 35.4 m la berma de seguridad es de 16.0 m, lo cual cumple con las especificaciones de Ritchie.

Figura 13

Configuración geométrica de los taludes del tajo – banco triple (Sección B-B)



Nota: Fuente elaboración propia

3.4.1.2 Verificación del ángulo de la cara de los bancos. Es práctica común que, dependiendo del equipo usado y del tipo de roca de minado, el ángulo de la cara del banco excavado sea de 65° a 70°. No se debe usar el ángulo de la cara del banco excavado para el diseño de la berma de seguridad, debido a que siempre hay pérdida de cresta debido a las roturas planas y cuñas que deslizan a través de las discontinuidades, lo que ocasiona que el ángulo de banco excavado disminuya.

El ángulo de cara del banco que debe ser usado en el diseño de la berma de seguridad es el ángulo que produce un ancho mínimo de la berma de seguridad aceptable para la confiabilidad deseada después de la excavación convencional.

Usualmente, para estimar el ángulo de la cara del banco, se asume un valor fijo de pérdida de cresta a partir de un ángulo inicial de 70°, correspondiente al valor representativo, tal que el 80% de los valores de espaciamiento de discontinuidades mapeados en campo sea menor que este valor.

Sin embargo, debido a que el macizo rocoso que conforma los taludes del tajo se encuentra bastante fracturado (con índices RQD muy bajos que varían entre 20 y 35), se ha estimado para el diseño de bancos genéricos un ángulo confiable de banco promedio de 59°. Como se verá en el capítulo de análisis de estabilidad y global, para esta configuración de los taludes, estos son estables para condiciones estáticas y pseudo – estáticas.

3.4.2 Factores de seguridad mínimos admisibles

Para el análisis de estabilidad de taludes, el Ministerio de Energía y Minas (MEM), recomienda los siguientes factores de seguridad mínimos admisibles:

- Condición estática (sin considerar la acción del sismo), FS = 1.5.
- Condición pseudo - estática (considerando la acción del sismo), FS = 1.1.

3.4.3 Condiciones de agua subterránea

En la etapa de evaluación de campo no se identificó la presencia de napa freática, tampoco zonas parcialmente saturadas, esto se debe a que en la zona de estudio las lluvias son mínimas y no hay riesgo de inundación, por lo que, para el análisis de estabilidad se ha considerado condición seca.

3.4.4 Coeficiente sísmico utilizado

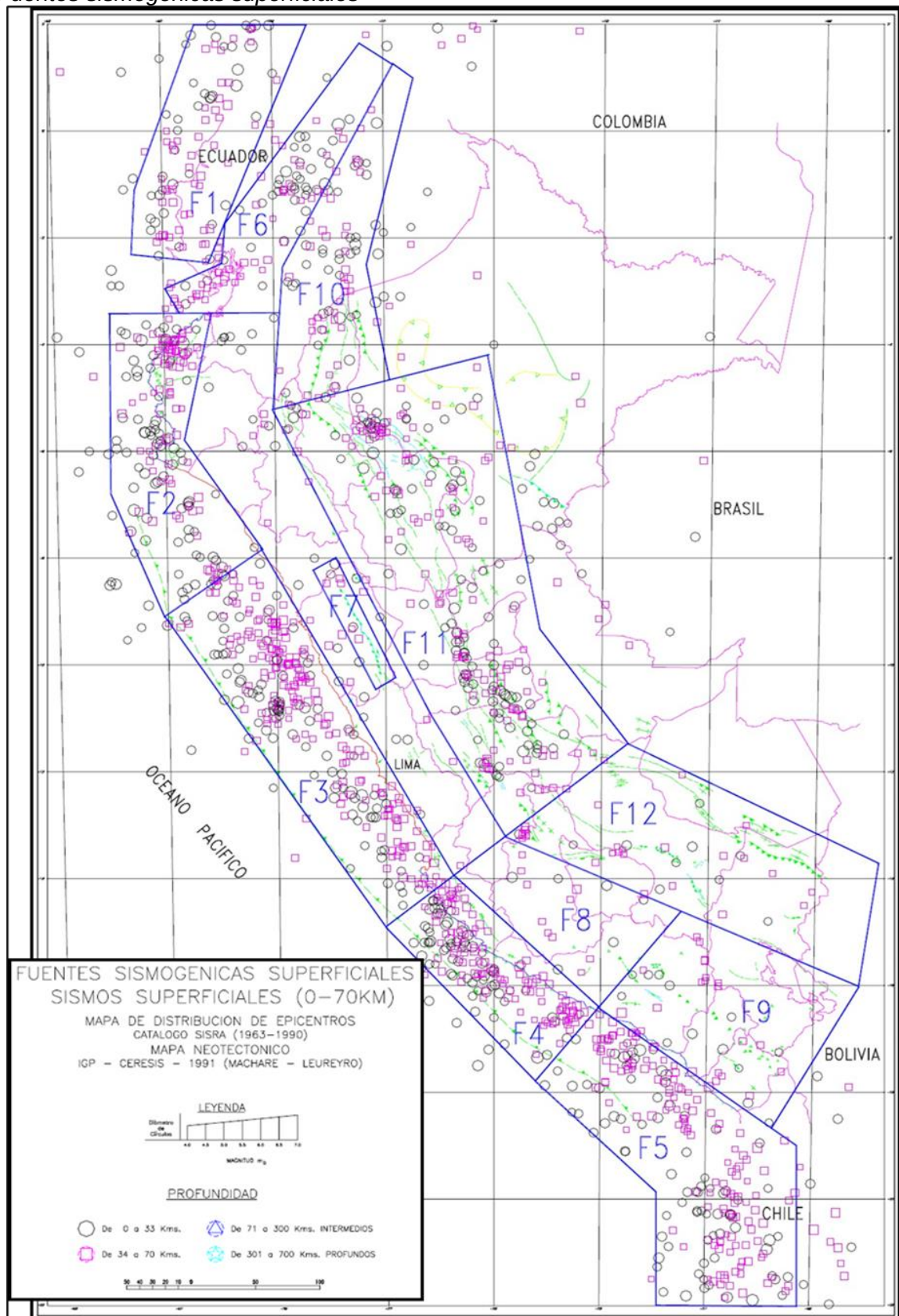
3.4.4.1 Determinación de las fuentes sismogénicas. La distribución espacial de la actividad sísmica y las características neotectónicas en el Perú, han permitido definir 20 fuentes sismogénicas con características sismotectónicas particulares. Se presentan estas fuentes como áreas, ya que no existen suficientes datos como para modelar las fallas como fuentes lineales.

El hecho que la actividad sísmica en el Perú es el resultado de la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca y el proceso de reajuste tectónico del Aparato Andino,

nos permite agrupar a las fuentes en: Fuentes de Subducción y Fuentes Continentales. Las Fuentes de Subducción modelan la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca. Las Fuentes 1, 2, 3, 4 y 5 están ubicadas a lo largo de la costa y representan la sismicidad superficial en la zona de Benioff (0-70 Km). Las Fuentes 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 representan la sismicidad intermedia (71 a 300 Km). La Fuente 20 representa la sismicidad profunda en la superficie de Benioff (500 a 700 Km). Las Fuentes Continentales 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 están relacionadas con la actividad sísmica superficial andina. Las fuentes ubicadas en la zona Norte, frontera con el Ecuador y en el Sur, frontera con Chile, fueron definidas considerando las fuentes propuestas por Bonilla y Ruiz (1992) y Aiquel (1990), respectivamente. En la Figura 14 se muestra la ubicación de las Fuentes Continentales y Fuentes de Subducción Superficiales (0- 70 Km), formando 2 fajas longitudinales a los Andes. En la Figura 15 están ubicadas las Fuentes de Subducción Intermedias (71-300 Km) y Profundas (500-700 Km).

Figura 14

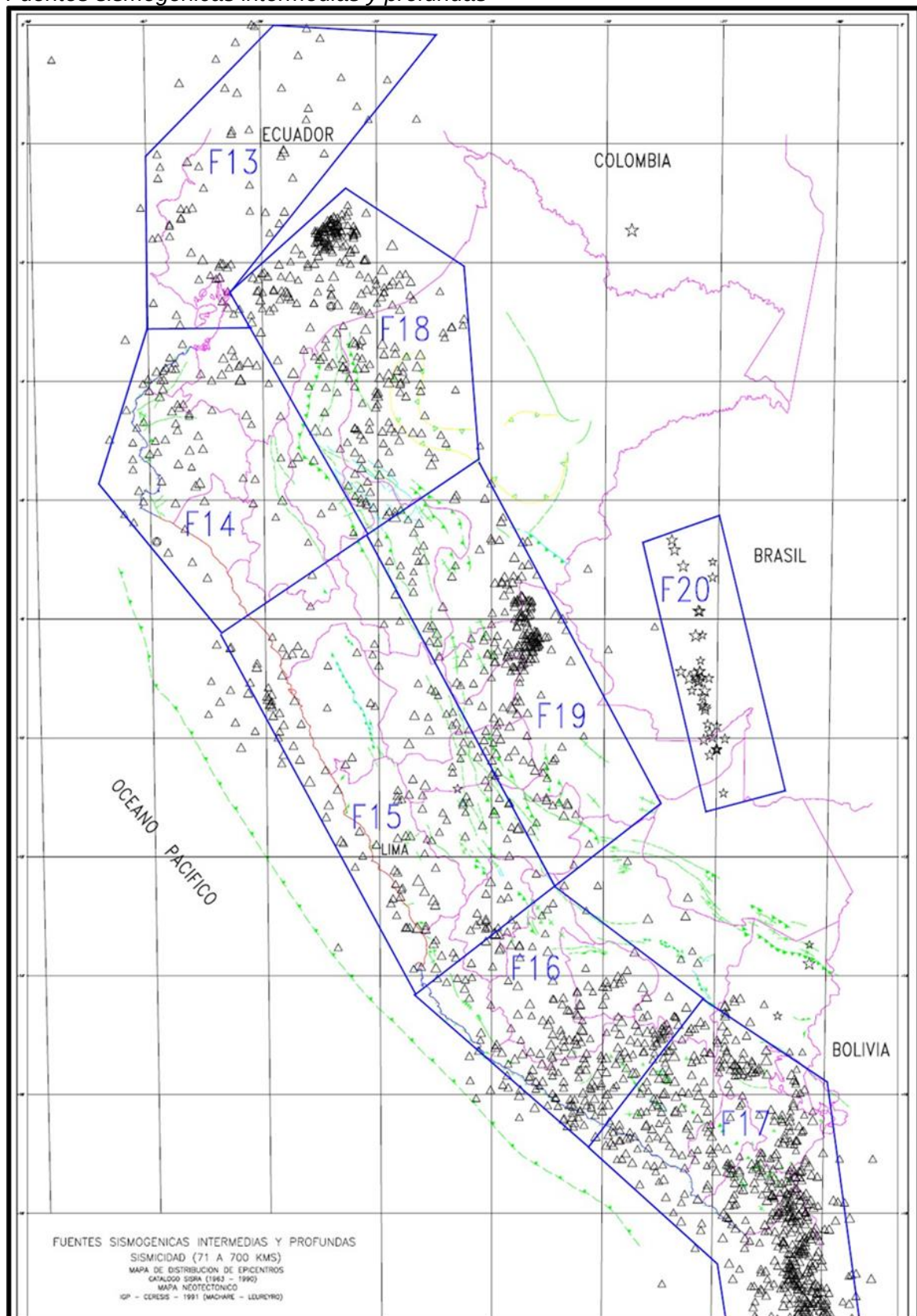
Fuentes sismogénicas superficiales



Nota: Fuente: IGP.

Figura 15

Fuentes sismogénicas intermedias y profundas



Nota: Fuente: IGP.

3.4.4.2 Determinación de los parámetros sismológicos. Cada una de las fuentes sismogénicas tiene características propias definidas por sus parámetros sismológicos: magnitud mínima de homogeneidad (M_{min}), pendiente de la distribución Gutenberg- Richter (b), tasa media anual de actividad sísmica (μ) y magnitud máxima (M_{max}). Las escalas de magnitud más utilizadas son m_b y M_s . Dependiendo de la escala utilizada, los sismos muestran valores asintóticos a partir de una cierta magnitud (Idriss, 1985). Para evitar este problema de saturación de la magnitud se utilizará la magnitud M definida como $\max \{m_b, M_s\}$.

Para determinar la sismicidad de cada zona sismogénica se utiliza la expresión de Gutenberg y Richter:

$$\text{Log}N = a - bM$$

Donde:

N = Número acumulativo de sismos de magnitud M o mayor por unidad de tiempo.

a, b = Parámetros que dependen de la sismicidad de la zona.

La expresión anterior se puede escribir como:

$$N = 10^a e^{-\beta M}$$

Donde:

$$\beta = b \ln 10$$

Para determinar los valores de a y b se utilizó el método de la máxima verosimilitud que ajusta la recta al valor medio de los datos sobre la magnitud mínima de homogeneidad, incluida la máxima magnitud observada, normalizando el aporte que hacen los sismos de diferentes magnitudes. Esto hace que el valor de b refleje de mejor forma las características de la región (Bonilla y Ruiz, 1992).

La tasa μ es la tasa media anual de ocurrencia de eventos mayores o iguales que la magnitud mínima de homogeneidad. Para determinar la tasa μ se utiliza una variación del diagrama de Gutenberg y Richter, que consiste en dibujar un número acumulativo de eventos mayores a una determinada magnitud versus el tiempo. De estos gráficos se puede determinar la magnitud mínima de homogeneidad (M_{min}) y la tasa μ . La magnitud

mínima de homogeneidad corresponderá al gráfico cuyo diagrama acumulativo versus tiempo muestre un comportamiento lineal y monótonicamente creciente, mostrando que a partir de esa magnitud el catálogo es homogéneo y completo. La tasa μ es la pendiente de la curva acumulativa de eventos mayores o iguales a M_{min} versus el tiempo. M_{max} es la magnitud máxima probable que puede ser liberada como energía sísmica (McGuire, 1976). Para determinar esta magnitud se utiliza el criterio de que el más grande evento que ha ocurrido en la fuente en el pasado, es el máximo sismo que se espera en el futuro.

En la Tabla 20 se presentan los parámetros sismológicos de las veinte fuentes sismogénicas. Para determinar las profundidades representativas de los hipocentros en las zonas sismogénicas se realizó un análisis estadístico de cálculo de frecuencias de sismos versus profundidad.

Tabla 20

Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas

FUENTE	Mmin	Mmax	TASA	BETA	PROF (Km)
F1	4.8	8.1	1.49	2.51	50
F2	4.8	7.9	3.28	2.60	40
F3	4.8	8.0	6.43	3.14	30, 60
F4	4.8	8.2	3.79	3.24	40, 60
F5	4.8	8.2	3.95	2.82	60
F6	4.9	7.4	0.44	2.67	50
F7	4.9	7.4	0.17	3.57	40
F8	4.9	7.0	0.93	2.42	65
F9	4.9	7.5	0.88	3.00	30
F10	4.9	7.3	0.71	2.57	50
F11	4.9	7.1	3.60	3.55	40, 60
F12	4.9	7.1	0.75	4.55	50
F13	4.9	6.9	0.18	2.52	50
F14	4.9	6.5	0.86	4.75	100
F15	4.9	7.2	1.64	2.69	100
F16	4.9	7.2	3.09	3.76	115
F17	4.9	7.5	12.82	3.69	90, 125, 160
F18	4.9	7.5	2.43	2.29	110, 180
F19	4.9	7.0	2.87	3.33	120, 160
F20	4.9	7.5	0.75	1.69	610

Nota: Fuente: IGP.

Peligro sísmico definido por la probabilidad que la intensidad I sea igual o mayor que una intensidad dada, será: $P(I \geq i)$ y está dada por:

$$P(I \geq i) = \int \int P\left[\frac{I}{s, r}\right] f_s(s) F_R(r) ds dr$$

Esta es la expresión que resume la teoría desarrollada por Cornell en 1968, para analizar el peligro sísmico. La evaluación de esta integral es efectuada por el programa de cómputo RISK desarrollado por McGuire (1976) en el cálculo del peligro sísmico.

3.4.4.3 Nivel de confianza. En el estudio de peligro sísmico, el nivel de excedencia ($RISK_t$) y probabilidad extrema se definen como la probabilidad que, en un tiempo determinado (tiempo de vida útil) ocurra un sismo de intensidad igual o mayor a una intensidad dada. El nivel de excedencia se expresa de la manera siguiente:

$$RISK = 1 - e^{-\frac{t}{Ry(a)}}$$

Dónde:

t = Tiempo de vida útil

$Ry(a)$ = Periodo de retorno promedio en años de un sismo de intensidad $> a$. El nivel de confianza se expresa como:

$$\text{Nivel de confianza} = 1 - RISK_t$$

Los movimientos de diseño que el ingeniero debe seleccionar están asociados a un nivel de excedencia suficientemente pequeño durante la vida útil de la edificación, la selección de dichos movimientos sísmicos depende del tipo de obra.

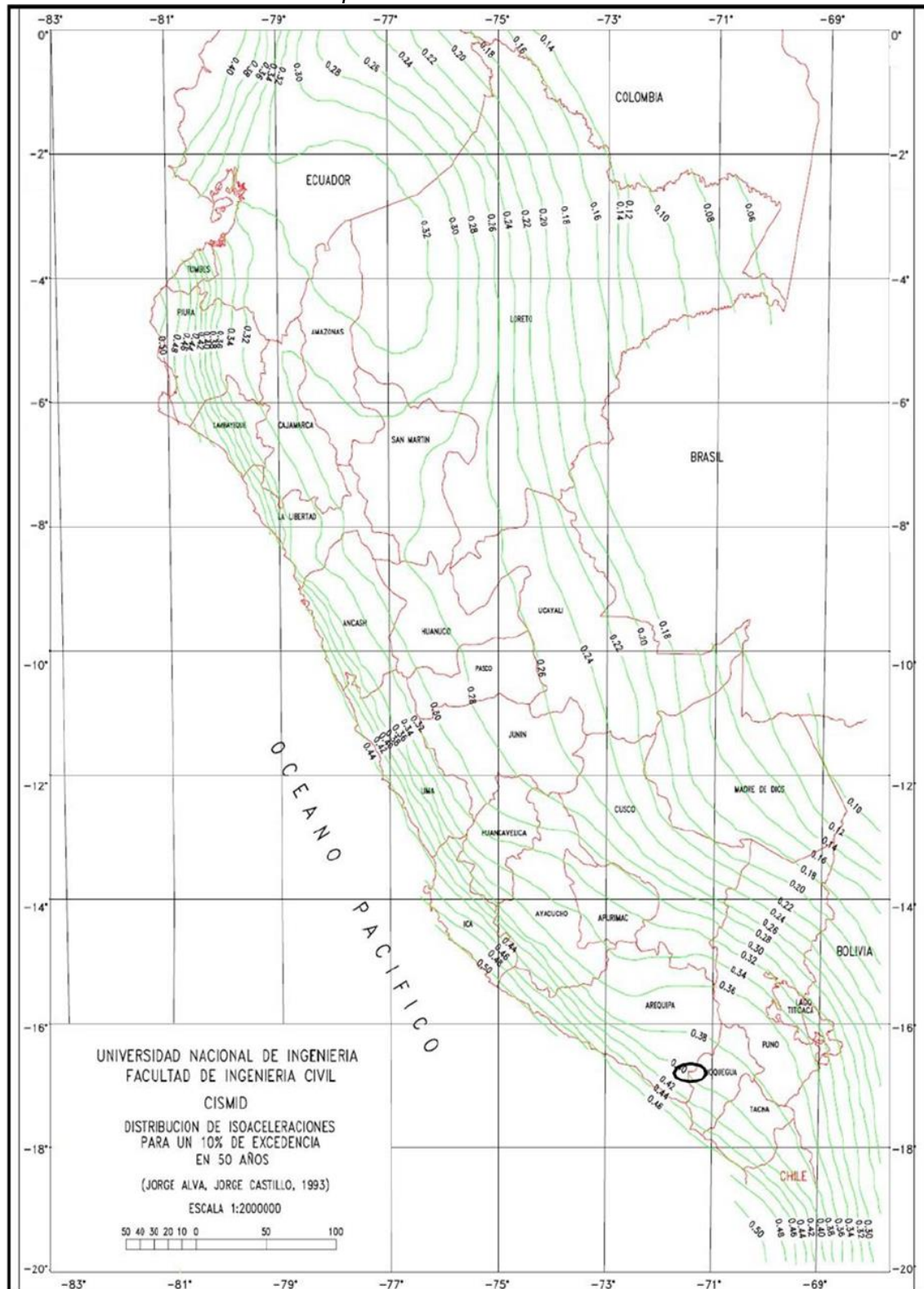
En el estudio se considera el 90% de nivel de confianza para 50 y 100 años de vida útil (t) que corresponden a 475 y 950 años de período de retorno respectivamente, es decir el 10% de nivel de excedencia en un periodo de t años.

3.4.4.4 Determinación del peligro sísmico. Calculados los parámetros sismológicos de las fuentes (M_{min} , M_{max} , β , μ), las profundidades representativas de los hipocentros de las fuentes y seleccionadas las leyes de atenuación, se calcularon las aceleraciones horizontales mediante el programa RISK en una malla de puntos (malla de 50x50 Km aproximadamente) en todo el territorio peruano y áreas vecinas. En las Figuras

16 y 17 se muestran los mapas de isoaceleraciones con un 10% de excedencia para 50 y 100 años de vida útil.

Figura 16

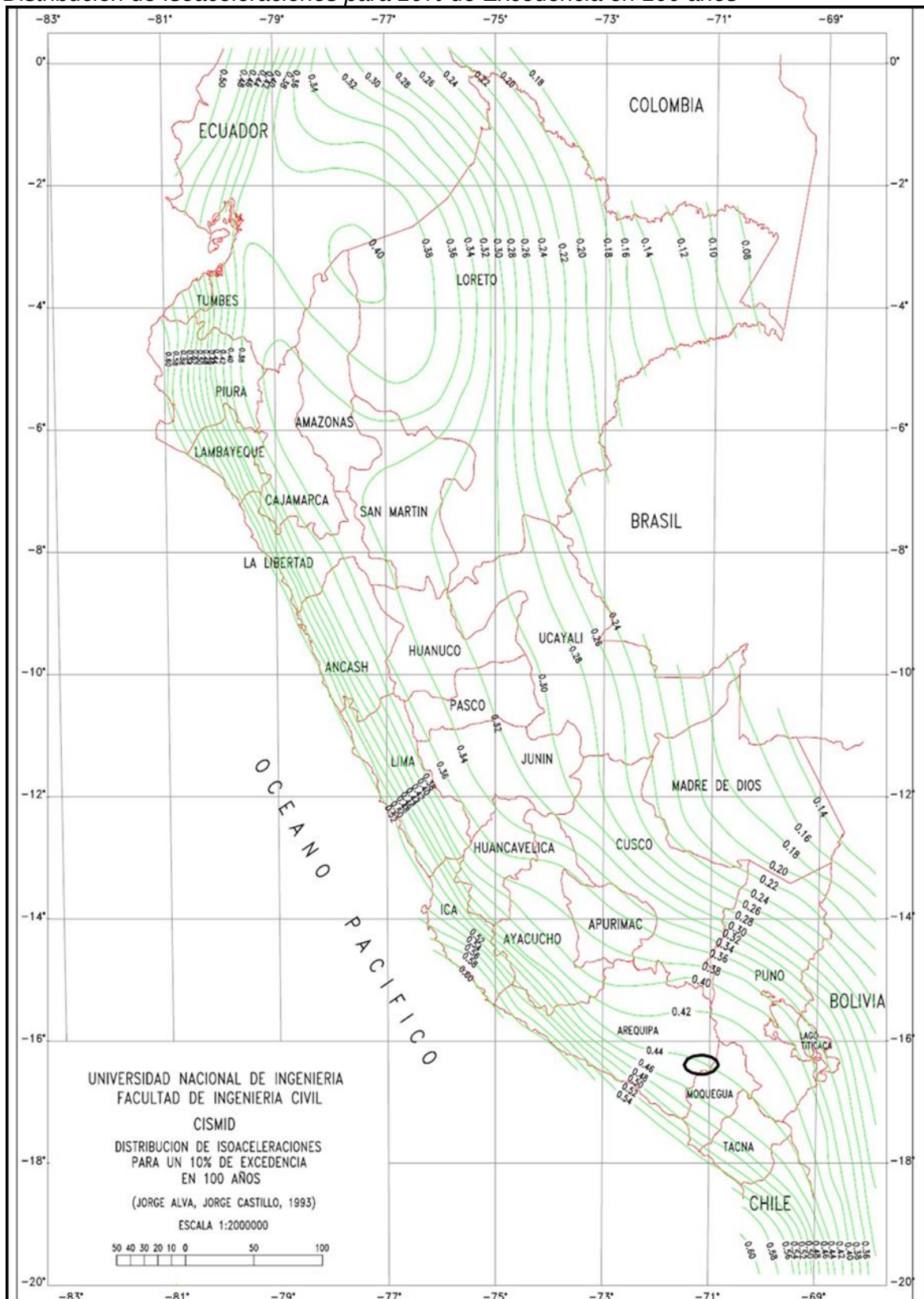
Distribución de Isoaceleraciones para 10% de Excedencia en 50 años



Nota: Fuente: IGP.

Figura 17

Distribución de Isoaceleraciones para 10% de Excedencia en 100 años



Nota: Fuente: IGP.

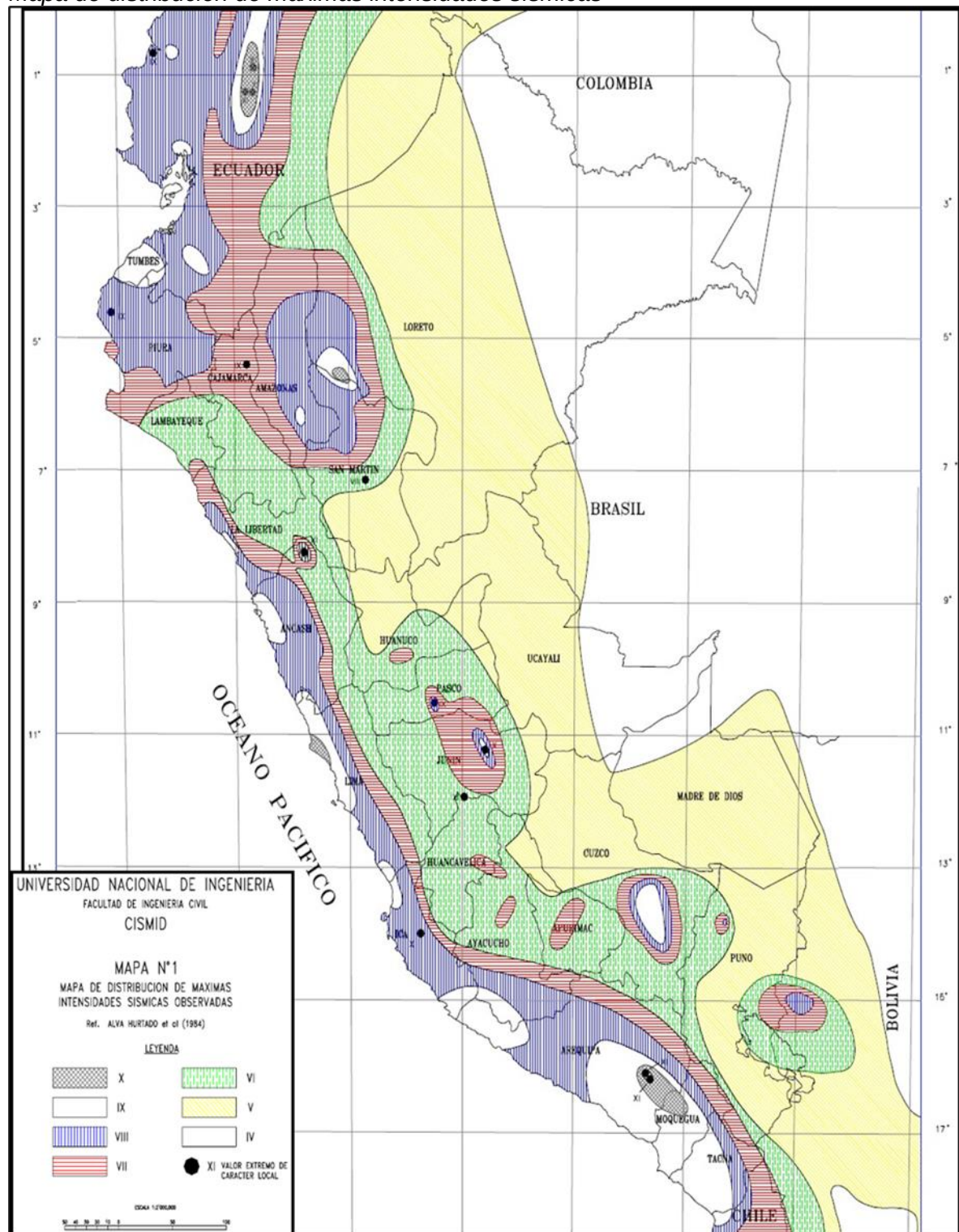
Se observa que los valores más altos de aceleraciones máximas están localizados a lo largo de toda la costa y van disminuyendo a medida que se avanza hacia al Este. Así, las zonas de Tumbes, Piura, Ica, Tacna y el Norte de Chile tienen los valores más altos de aceleración, 0.50g y 0.60g para 50 y 100 años de vida útil respectivamente. Debe considerarse que en estas zonas se han producido históricamente sismos muy grandes y además son las zonas que presentan una mayor tasa de ocurrencia de sismos. Los valores obtenidos en el Norte de Chile coinciden con los encontrados por Aiquel (1990) para los mismos periodos de vida útil. Se observa también altas aceleraciones en las zonas de Moyobamba, norte del departamento de Amazonas y en la zona ecuatoriana de Cuenca con 0.32g y 0.38g en 50 y 100 años respectivamente. Los valores más bajos de aceleración están localizados en la zona oriental, en el departamento de Loreto, con valores de 0.06g y 0.08g. Otra región con valores bajos de aceleración es la zona de Madre de Dios con valores de 0.10g y 0.14g.

Las curvas de isoaceleraciones prácticamente se mantienen paralelas a la costa, lo que coincide con el mecanismo de subducción. En la zona Noreste del país se produce una separación y cambios en la orientación de las curvas asociadas a la alta sismicidad de esta zona, especialmente el nido sísmico de Rioja-Moyobamba. Se observa también cambios en la inclinación de las curvas a la altura de la Contorsión Norte de Arequipa, zona en la cual se produce la más importante inclinación de la Placa de Nazca.

Los resultados que muestran las Figuras 16 y 17 tienen una buena correlación con el mapa de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas (Alva et al, 1984) (figura 18), en el cual se observa que las zonas de Tumbes, Piura, Lima, Arequipa, Tacna y el Norte de Chile tienen intensidades entre VIII y IX Mercalli Modificada y las intensidades más bajas se presentan en la zona oriental con valores por debajo de V MM.

Figura 18

Mapa de distribución de máximas intensidades sísmicas



Nota: Fuente Alva et al. 1984

3.4.4.5 Criterios para la selección del coeficiente sísmico en el análisis pseudo-estático. La determinación del coeficiente sísmico utilizado en el diseño depende de diversos factores interrelacionados, entre los cuales destacan:

- Sismicidad regional: nivel de actividad sísmica propio del área de emplazamiento.
- Condiciones locales del terreno: a mayor densidad y rigidez del subsuelo, menor es la amplificación de las ondas sísmicas.
- Periodo fundamental del Pad II: influido por la altura y las propiedades dinámicas de los materiales de conformación.
- Importancia estructural y nivel de riesgo: asociados a la categoría de la obra y a las consecuencias potenciales ante una falla.

La adecuada selección del coeficiente sísmico constituye uno de los aspectos más críticos del análisis pseudo-estático, tanto por su magnitud como por su distribución vertical a lo largo de la estructura. A continuación, se presentan los enfoques y criterios más reconocidos en la literatura especializada para la determinación de dicho parámetro.

3.4.4.5.1 Método empírico. De acuerdo con la práctica tradicional, los proyectistas suelen adoptar valores empíricos del coeficiente sísmico basados en la sismicidad de la zona y en el tipo de material que conforma el depósito o Pad. Generalmente, se asume que el coeficiente sísmico permanece constante con la altura, tomando valores en el rango de 0.05 a 0.25 en dirección horizontal, y de 0 a 0.5 veces dicho valor en dirección vertical.

La presión dinámica del agua se incorpora dentro del análisis estático convencional. Asimismo, se considera que este coeficiente puede reducirse proporcionalmente cuando el embalse presenta niveles bajos o se encuentra vacío, dado que la probabilidad de coincidencia entre un sismo severo y una inundación extrema es muy reducida.

Sin embargo, se reconoce que los valores empíricos de entre 0.10 y 0.20 pueden no garantizar un diseño completamente seguro, dada la incertidumbre asociada al comportamiento real del sistema ante movimientos sísmicos significativos.

3.4.4.5.2 Análisis de respuesta de cuerpo rígido. Este enfoque considera que el terraplén o estructura de tierra actúa como un cuerpo rígido, de modo que las aceleraciones inducidas son uniformes y equivalentes a las del terreno en todo momento. Tal suposición puede ser razonable en el caso de terraplenes de baja altura o confinados en quebradas

angostas, aunque en la mayoría de las estructuras de tierra dicha condición no se cumple estrictamente.

Desde esta perspectiva, asumir que el coeficiente sísmico sea igual a la aceleración máxima del terreno resulta una hipótesis demasiado conservadora, dado que dicha aceleración ocurre solo de manera instantánea y cambia de dirección múltiples veces, generando deformaciones acumuladas pequeñas (Seed, 1979).

Por esta razón, en Japón se recomienda reducir el coeficiente sísmico de diseño a un rango comprendido entre el 50 % y el 70 % de la aceleración máxima esperada, según lo indicado por Sasaki, Koga y Taniguchi (1987), con el fin de reflejar de forma más realista la respuesta dinámica del terraplén.

3.4.4.5.3 Resultados. El proyecto se ubica en una zona sísmica, presentándose en la misma, magnitudes en la escala de 4.0 a 6 en la escala de Richter e intensidades de grado X a profundidades promedio de 60 a 300 Km.

Para el diseño de estructuras de materiales sueltos se consideran siempre los eventos sísmicos más extremos con el fin de garantizar la seguridad de la estructura, para tal fin se ha considerado una aceleración máxima de 0.44g. Para el diseño del Pad II se ha determinado usar un coeficiente sísmico de diseño de 0.20g, es decir el 45% de la máxima aceleración de la zona fluctuante entre los 0.44g (Sasaki, Koga y Taniguchi, 1987), considerando una vida útil de la estructura de 100 años y un periodo de retorno de 950 años.

3.4.5 Propiedades de los materiales

Se han considerado los valores de resistencia al corte en términos de la cohesión y del ángulo de fricción de las discontinuidades obtenidos de los ensayos de corte directo, los cuales son datos de entrada para los programas Rocplane y Swedge.

Conservadoramente, el ángulo de fricción residual de las discontinuidades considerado en el análisis ha sido de 28° y cohesión nula.

3.4.6 *Análisis cinemático del macizo rocoso*

Para la revisión de la estabilidad de los taludes de bancos, se ha realizado la evaluación geomecánica de los macizos rocosos, se han identificado las principales familias de discontinuidades, se ha evaluado el grado de fracturamiento (RQD), la orientación, espaciamiento entre discontinuidades, persistencia y otros aspectos relevantes.

En consecuencia, se ha realizado el análisis de discontinuidades a fin de estimar el tipo de falla más probable que puede ocurrir considerando el talud de corte existente. Una vez determinado el tipo de falla, se analiza la estabilidad para cada caso, mediante el método de equilibrio límite, utilizando el programa de cómputo Swedge (Rocscience, 2012) para la falla tipo cuña y Rocplane (Rocscience, 2012) para la falla tipo planar.

Las redes estereográficas permiten el análisis tridimensional de las discontinuidades de un macizo rocoso, esto permite la identificación de las discontinuidades que tienen orientación desfavorable respecto a un talud existente; este procedimiento se denomina análisis cinemático. El potencial de ocurrencia de la falla plana, en cuña y por vuelco de estratos pueden identificarse con esta metodología.

Mediante el análisis de la proyección estereográfica con el programa Dips es posible predecir el tipo de falla que produciría en un macizo rocoso con control estructural de acuerdo a la ubicación relativa de los planos de las familias de discontinuidades principales respecto a la orientación de la cara del talud. Esta técnica posibilita ilustrar los planos de discontinuidades en términos de su buzamiento y su dirección de buzamiento.

La orientación de las principales familias de discontinuidades se obtiene a partir de un diagrama de concentración de polos. Generalmente se obtiene tres familias principales de discontinuidades del macizo rocoso y el resto se considera como secundarias.

En el Anexo 4: Caracterización Geomecánica, se presenta los diagramas de rosas, diagramas de concentración de polos y la orientación de las principales familias de discontinuidades obtenidas de cada estación geomecánica, que han servido de base para el posterior análisis cinemático.

En el Anexo 5: Análisis Cinemático del Macizo Rocos, se presenta los análisis cinemáticos para fallas planas, en cuña y por volteo, realizados para cada estación geomecánica, que han servido de base para el posterior análisis de estabilidad.

3.4.7 Análisis de estabilidad a nivel de bancos

Una vez identificado el tipo de falla que puede ocurrir, se procede a estimar el factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudo - estáticas. Para los análisis de estabilidad se utilizó los programas Rocplane y Swedge (Rocscience), considerando fallas tipo planar y cuña, respectivamente.

No se realizaron análisis de estabilidad para falla tipo volteo debido a que en el análisis cinemático de las discontinuidades se han identificado muy pocas fallas de este tipo, y durante la evaluación de campo tampoco se observaron en gran magnitud la falla por volteo en los taludes de los bancos existentes. Además los macizos rocosos presentan más de un sistema de fracturamiento, lo cual no hace posible la formación de un vuelco de estratos puro.

En la Tabla 21 se presentan el resumen de los factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad a nivel de bancos de los taludes del tajo.

Tabla 21

Resumen de análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos

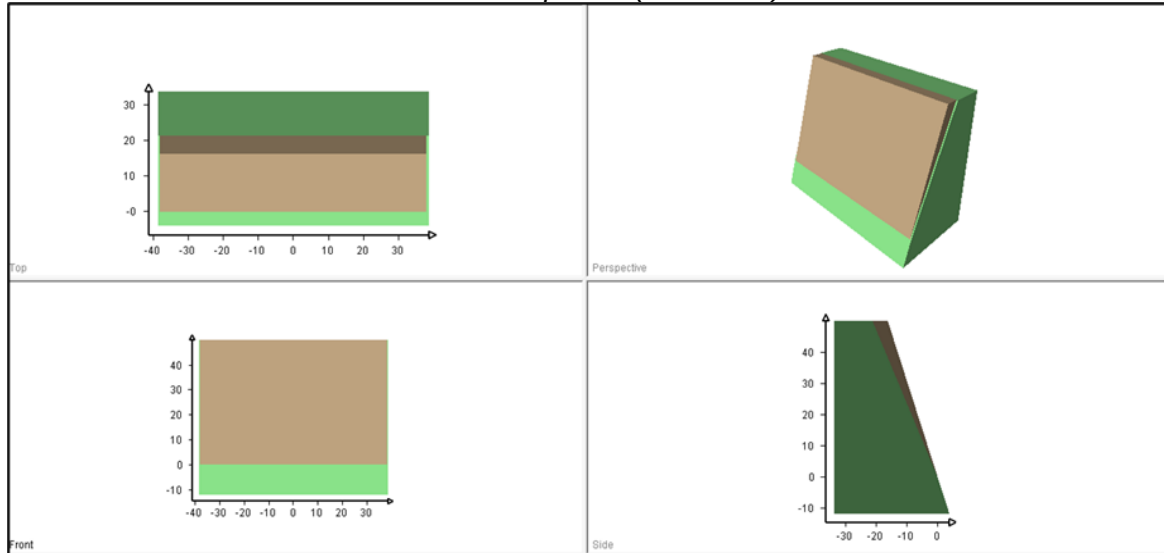
ESTACIÓN GEOMECÁNICA	LITOLOGÍA	Nº FAMILIAS	ORIENTACIÓN DE LAS FAMILIAS PRINCIPALES	BUZ. Y DIRECCIÓN DE BUZ. DEL TALUD DE CORTE	TIPO DE FALLA			FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO		FACTOR DE SEGURIDAD PSEUDO - ESTÁTICO	
					PLANAR	CUÑA	VOLTEO	PLANAR	CUÑA	PLANAR	CUÑA
E-1		2	1) 90°/334° 2) 67°/025°	72°/005°	S1			1.5		1.3	
E-2		3	1) 77°/056° 2) 84°/332° 3) 24°/230°	77°/357°							
E-3		3	1) 86°/261° 2) 90°/167° 3) 57°/343°	82°/250°							
E-4		1	1) 81°/339°	72°/080°							
E-5		2	1) 81°/339° 2) 71°/095°	68°/084°							
E-6		2	1) 81°/244° 2) 50°/104°	80°/250°			F2				

Nota: Fuente elaboración propia

En las Figuras 19 y 20, se presentan las salidas gráficas obtenidas de la aplicación de los programas Swedge y Rocplane en el análisis de estabilidad de fallas en cuña y bloque. Los factores de seguridad obtenidos son mayores que los mínimos permisibles, por lo que los taludes a nivel de los bancos se consideran estables.

Figura 19

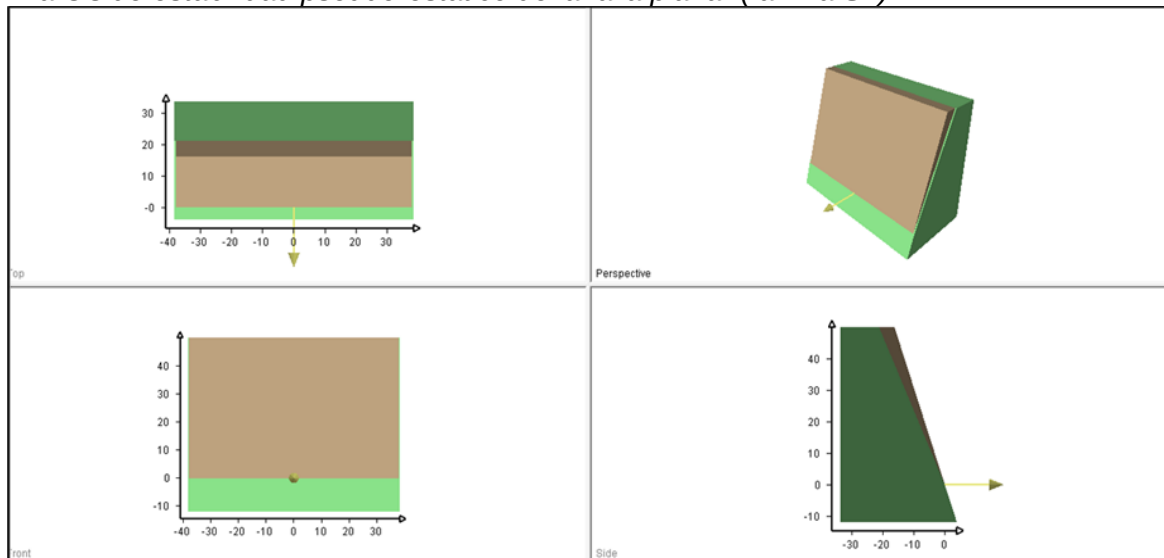
Análisis de estabilidad estático de la falla planar (familia S1)



Nota: Fuente elaboración propia

Figura 20

Análisis de estabilidad pseudo-estático de la falla planar (familia S1)



Nota: Fuente elaboración propia

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Análisis de estabilidad global de los taludes

Teniendo en cuenta los modos de falla, la estabilidad de los taludes de los macizos rocosos se puede estudiar básicamente de dos maneras:

- Roturas controladas por las estructuras, que generan deslizamientos traslacionales en bloque y caídas de roca. Este modo de falla ha sido estudiado y analizado en el análisis de estabilidad a nivel de bancos presentado en el capítulo 3.4 Análisis de Taludes a nivel de Bancos del presente trabajo de suficiencia.
- Falla por corte a través del macizo rocoso, que generan fundamentalmente deslizamientos traslacionales masivos y rotacionales. Este modo de falla debe ser estudiado mediante el análisis de estabilidad global presentado en este capítulo.

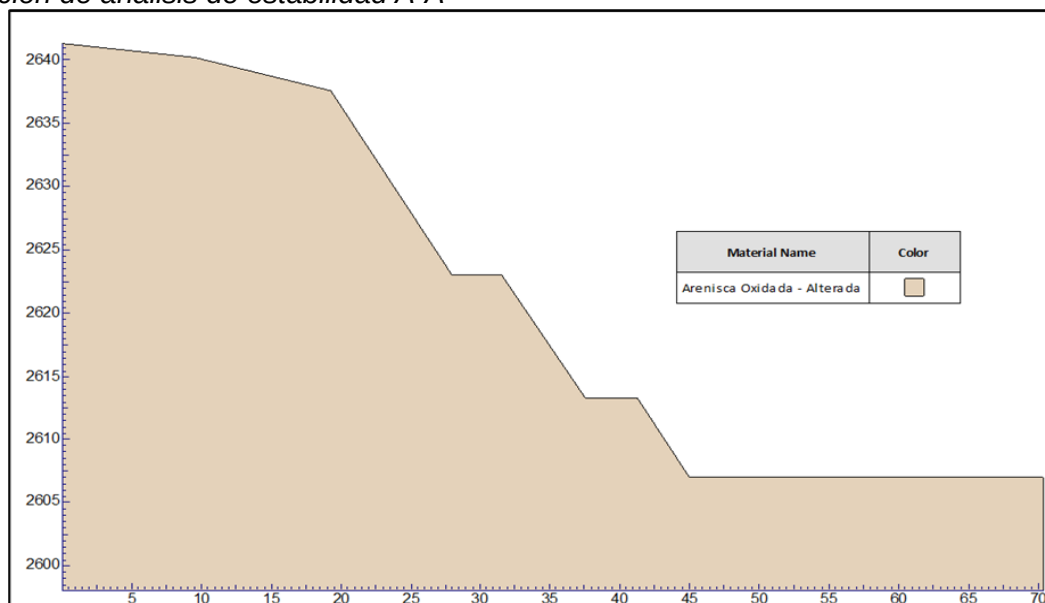
4.1.1 Consideraciones geotécnicas generales

Para el análisis de estabilidad global se consideraron las secciones más críticas y representativas de los taludes del tajo, de acuerdo al diseño del Capítulo anterior.

4.1.1.1 Secciones de análisis. En las Figuras 21, 22, 23 y 24 se presentan las secciones de análisis de acuerdo al diseño de los taludes del tajo.

Figura 21

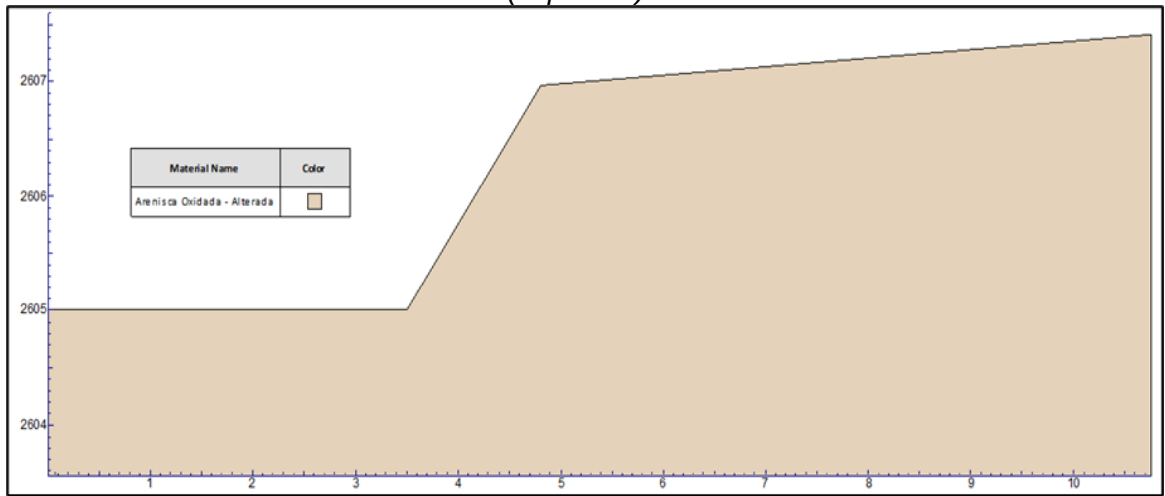
Sección de análisis de estabilidad A-A



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 22

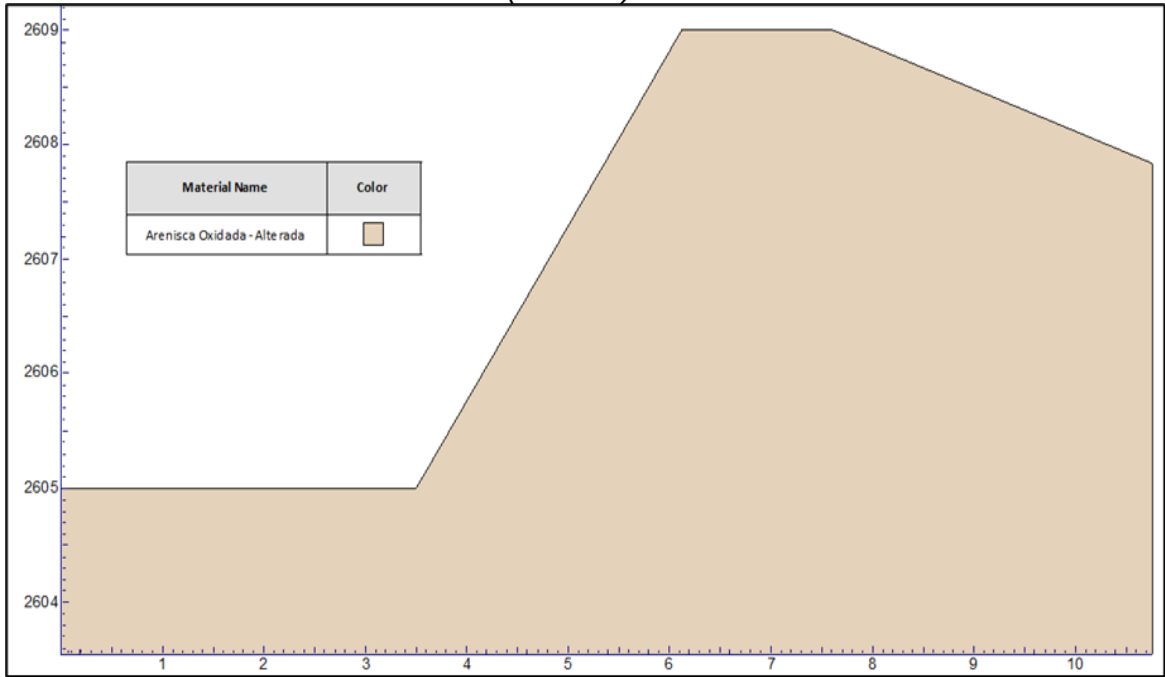
Sección de análisis de estabilidad B-B (izquierda)



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 23

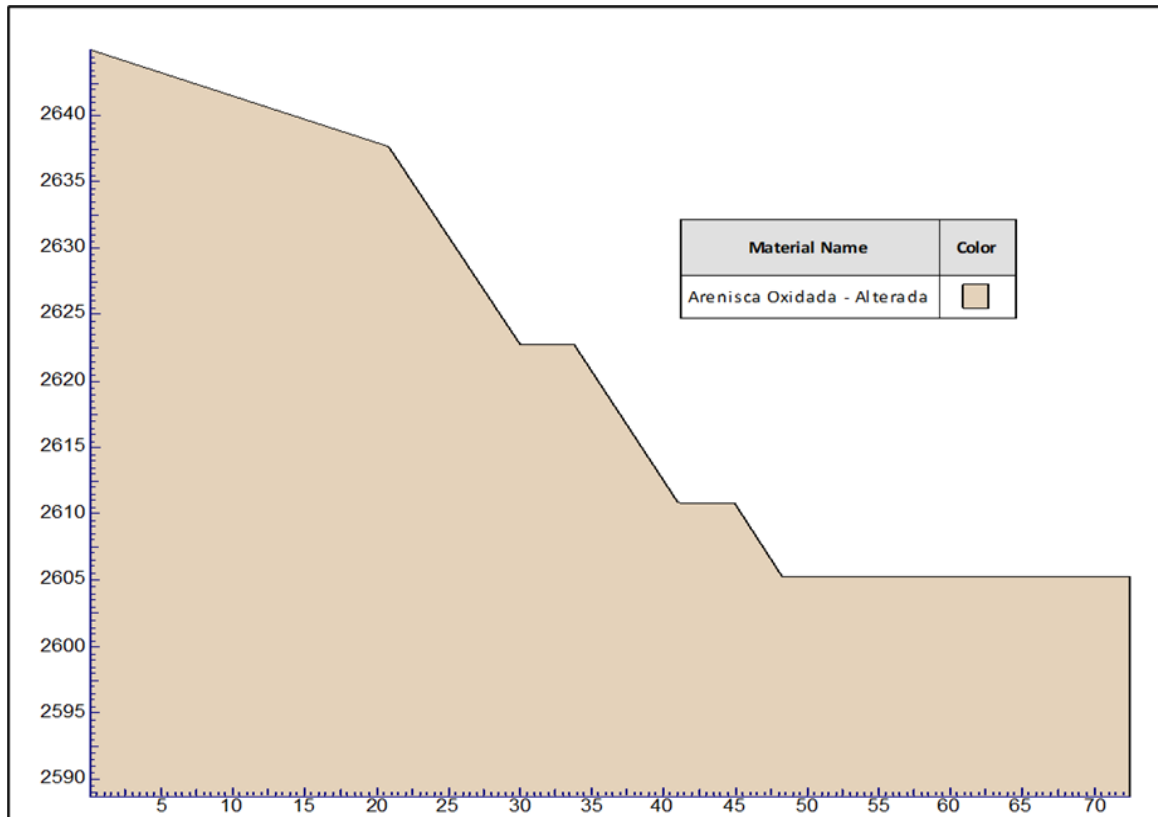
Sección de análisis de estabilidad B-B (derecha)



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 24

Sección de análisis de estabilidad C-C



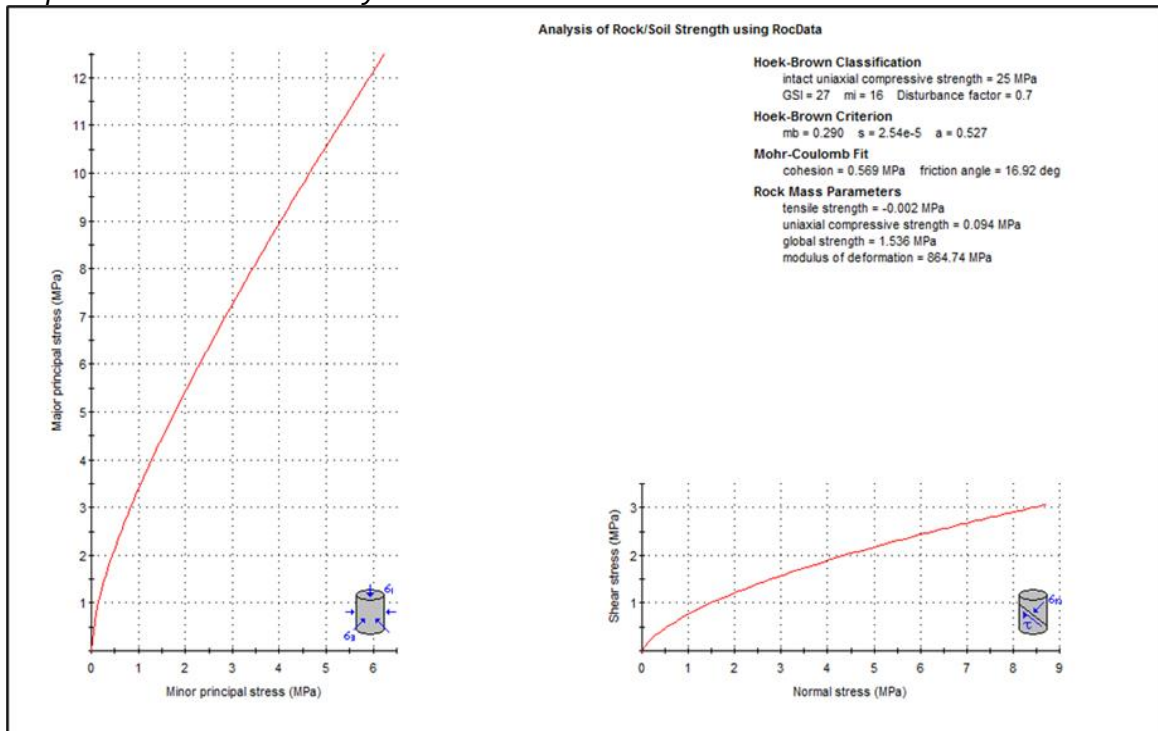
Nota: Fuente elaboración propia.

4.1.1.2 Propiedades de los materiales. De acuerdo al modelo geológico - geotécnico, los parámetros de los materiales a ser usados en el análisis han sido estimados a partir del ensayo triaxial en el caso de la roca intacta y para el macizo rocoso se ha considerado el índice GSI determinado por la valoración del macizo rocoso, además se ha asumido el factor de perturbación de la roca $D = 0.7$.

Para definir los parámetros de resistencia al corte de los macizos rocosos, se ha considerado las propiedades de las estaciones geomecánicas que pasan cerca de las secciones de análisis. Previamente se ha realizado el análisis de las curvas de resistencia del macizo rocoso con el programa Rocdata (considerando la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, el índice GSI, la constante de la matriz rocosa y el factor de perturbación), los cuales se muestran en la Figura 25.

Figura 25

Propiedades de resistencia y deformación – arenisca alterada/oxidada



Nota: Fuente elaboración propia.

Los parámetros de resistencia de los macizos rocosos usados en el análisis de estabilidad de taludes se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22

Parámetros de los materiales a usar en el análisis de estabilidad global

LITOLOGÍA	DENSIDAD (kN/m ³)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)	mi	GSI	D
Arenisca Oxidada - Alterada	24.40	10.0	16	27	0.7

Nota: Fuente elaboración propia.

4.1.1.3 Condiciones hidrogeológicas. Dado que durante la etapa de evaluación de campo no se ha identificado la presencia de la napa freática y teniendo en cuenta que en el área de estudio las lluvias son esporádicas y no hay riesgo de inundación, para el análisis de estabilidad no se ha considerado la presión hidrostática.

4.1.2 Condiciones de análisis

Para el análisis de estabilidad de taludes el Ministerio de Energía y Minas (MEM) recomienda los siguientes factores de seguridad (F.S.) mínimos admisibles:

- Condición estática (sin considerar la acción del sismo), FS = 1.5.

- Condición pseudo - estática (considerando la acción del sismo), $FS = 1.1$.

4.1.3 Software empleado para el análisis de estabilidad global

Para el análisis se ha empleado el programa Slide v.6.0 (Rocscience, 2012), este programa realiza los análisis de estabilidad utilizando el método de equilibrio límite bidimensional y calcula el factor de seguridad de un talud con varios estratos empleando el Modelo de Rotura Generalizado de Hoek y Brown. El programa permite analizar la estabilidad considerando superficies de rotura no circulares, con el método de Morgenstern - Price. Para los cálculos realizados en el presente estudio, se han considerado 200 círculos de falla por cada análisis. Se obtiene así el mínimo factor de seguridad, graficando las superficies de falla que corresponden a factores de seguridad mínimos.

4.1.4 Resultados obtenidos

En la Tabla 23 se presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de estabilidad de los taludes globales.

Tabla 23

Resultados del análisis de estabilidad global

SECCIÓN	TALUD	FACTOR DE SEGURIDAD	
		ESTÁTICO	PSEUDO - ESTÁTICO
A-A	Global	1.8	1.3
	Local	1.8	1.3
B-B (izquierda)	Global	3.8	2.9
B-B (derecha)	Global	2.8	2.3
C-C	Global	1.7	1.3
	Local	1.8	1.3

Nota: Fuente elaboración propia.

De este análisis se concluye que los taludes son estables, pues todos los factores de seguridad son mayores que los mínimos permisibles, tanto para condiciones estáticas como para condiciones pseudo - estáticas.

En el Anexo 6: Análisis de Estabilidad Global, se presentan las salidas gráficas del programa Slide para cada sección de análisis.

4.2 Modelamiento numérico de los taludes del tajo

Los métodos de equilibrio límite pueden considerarse válidos para la mayoría de aplicaciones de análisis de mecánica de suelos, pero es considerado demasiado simplista para muchas aplicaciones en mecánica de rocas. Para aplicar un método de análisis que se ajuste más a la realidad, se han desarrollado programas de modelamiento numérico (Plaxis, Phase2, etc.), los cuales crean una malla numérica de dos o tres dimensiones, asignándose en cada elemento las propiedades del macizo rocoso como densidad, ángulo de fricción, coeficiente de Poisson, etc.

En este capítulo se realizó el modelamiento numérico del talud más desfavorable del tajo utilizando el Método de Elementos Finitos y calculando el factor de seguridad por métodos numéricos a través de la metodología de reducción de la resistencia al corte del macizo rocoso hasta ocasionar la falla del talud (Método SSR).

4.2.1 Condiciones de análisis

Las condiciones adoptadas para el modelamiento numérico de los taludes del tajo son las siguientes:

- **Software geotécnico utilizado:**

Phase2 v 8.0 (Rocscience, 2012).

- **Método de análisis:**

Método de Elementos Finitos, el cual ha sido utilizado conjuntamente con el análisis de reducción de los parámetros de resistencia al corte (SSR), con la finalidad de obtener el factor de seguridad por medio del análisis numérico (SRF).

- **Modelo constitutivo:**

El modelo constitutivo elegido es el elasto - plástico junto con el criterio de rotura generalizado de Hoek y Brown (2002).

- **Condiciones de contorno:**

Se han restringido los movimientos de la frontera inferior y los movimientos verticales en las fronteras laterales del modelo, y en la superficie superior donde se realiza la excavación se ha permitido el libre movimiento.

- **Condicionantes externos:**

No se consideró presencia de nivel freático, ni condiciones pseudo-estáticas.

- **Forma de los elementos finitos:**

Se han considerado elementos finitos triangulares de 6 nodos.

- **Tipo de análisis:**

Deformación plana.

- **Número de iteraciones:**

500 con una tolerancia de 0.001.

- **Ley de fluencia:**

Se ha optado por una ley de fluencia no asociada considerando la dilatación nula, la razón es porque es difícil conocer la dilatación en un macizo rocoso y, como señalan Griffiths y Lane (1999), las diferencias son prácticamente nulas en el factor de seguridad calculado.

- **Módulo elástico y Coeficiente de Poisson:**

Se ha utilizado el módulo elástico recomendado por Hoek (2002) y un coeficiente de Poisson promedio de $\nu = 0.18$ tomado de los ensayos de propiedades elásticas.

- **Equilibrio:**

En los análisis realizados, para obtener el estado de equilibrio límite se ha ido reduciendo progresivamente los parámetros de resistencia al corte del macizo rocoso, pasando de una situación estable a una situación inestable donde no se alcanza la convergencia del sistema, de esta manera se obtiene el factor de seguridad mediante la metodología SSR.

- **Factor de seguridad:**

Se considera un factor de seguridad mínimo de 1.5 para garantizar la estabilidad en condiciones estáticas.

- **Mecanismo de rotura:**

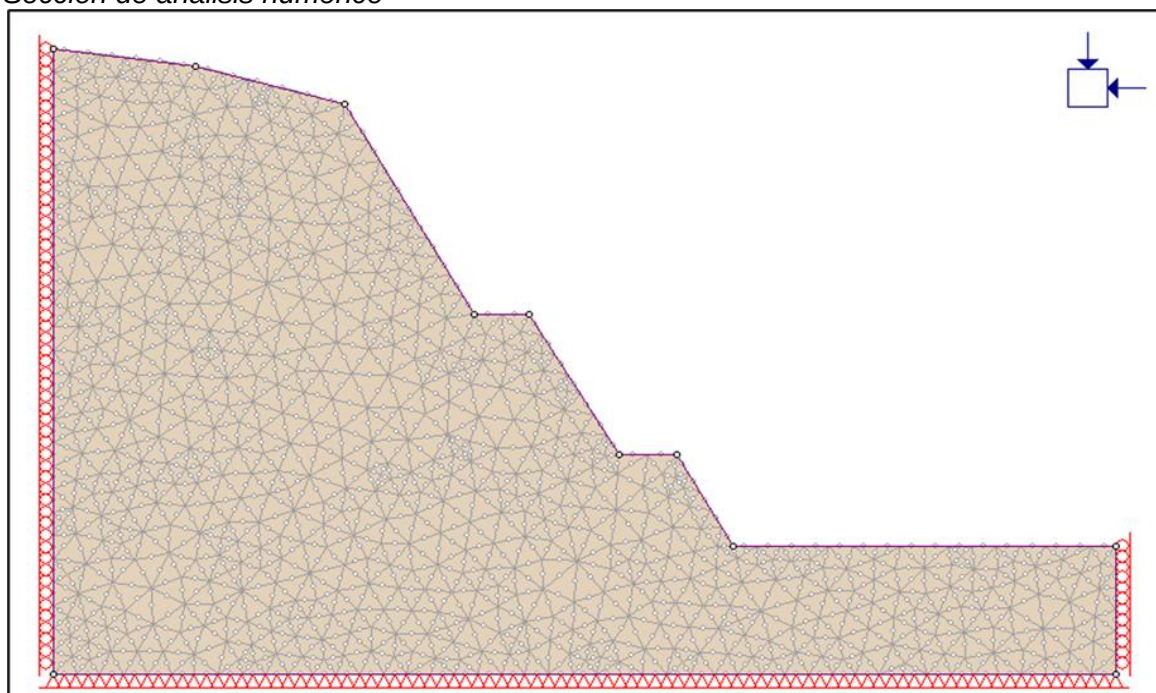
El mecanismo de rotura de los taludes se obtiene a partir de los contornos de desplazamientos totales obtenidos con el programa Phase2.

4.2.2 Sección de análisis

En la Figura 26 se presenta la geometría del talud analizado, en la cual se puede observar la malla de elementos finitos y las condiciones de contorno del modelo numérico. Esta sección corresponde al talud más desfavorable del tajo.

Figura 26

Sección de análisis numérico



Nota: Fuente elaboración propia.

4.2.3 Propiedades de los materiales

Para definir los parámetros de deformacionales de los macizos rocosos, se ha realizado el análisis de las curvas de resistencia del macizo rocoso con el programa Rocdata de Roscscience (considerando la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, el índice GSI, la constante de la matriz rocosa y el factor de perturbación).

Los parámetros deformacionales de los macizos rocosos usados en el análisis esfuerzo - deformación se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24

Parámetros deformacionales

LITOLOGÍA	DENSIDAD (kN/m ³)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)	m _i	GSI	D	E (MPa)	ν
Arenisca Oxidada - Alterada	24.40	10.0	16	27	0.7	864	0.18

Nota: Fuente elaboración propia.

4.2.4 Resultados del análisis

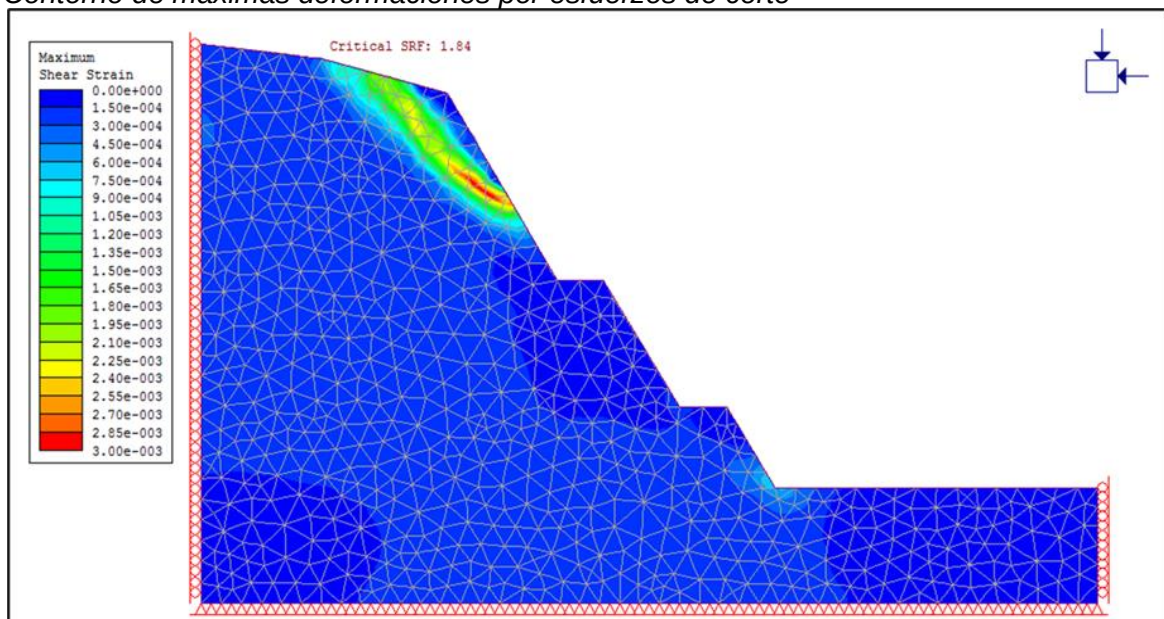
El mecanismo de rotura de los taludes se ha identificado a partir de los contornos de desplazamientos totales obtenidos con el programa Phase2.

Debido a que el espaciamiento y persistencia de las discontinuidades son de magnitud muy pequeña con respecto a la altura del talud, el macizo rocoso tiene un comportamiento como si se tratara de un medio continuo, produciéndose la rotura curva, similar a la que se produce en los suelos.

Las salidas gráficas del programa Phase se presentan en las Figuras 27 y 28, estas salidas se presentan en términos de las máximas deformaciones por esfuerzos de corte y contornos de desplazamientos totales, el factor de seguridad obtenido fue de 1.90, lo cual indica que el talud es estable.

Figura 27

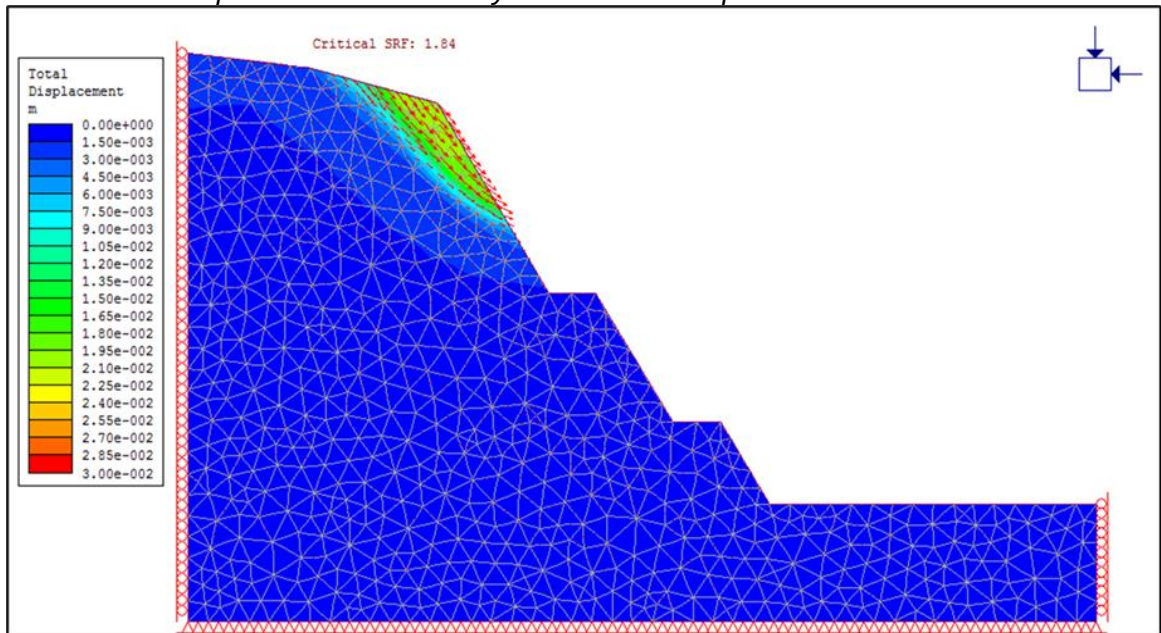
Contorno de máximas deformaciones por esfuerzos de corte



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 28

Contorno de desplazamientos totales y vectores de desplazamientos



Nota: Fuente elaboración propia.

Conclusiones

La inspección de campo, complementada con seis estaciones geomecánicas distribuidas estratégicamente y ensayos geofísicos (240 m de refracción sísmica y un ensayo MASW), permitió evaluar con precisión la estabilidad de los taludes tanto a nivel de bancos como a nivel global, aportando datos confiables de los módulos de deformación dinámica.

Los ensayos de laboratorio (compresión simple, carga puntual, propiedades índice, compresión triaxial y corte directo) realizados en muestras representativas de las estaciones y tipos de roca del tajo, permitieron caracterizar de manera integral las propiedades mecánicas y de resistencia de las formaciones presentes.

La zonificación geomecánica identificó dos áreas diferenciadas: la Zona 1, con areniscas oxidadas y alteradas de baja calidad geomecánica (RMR 32–34, RQD 20–30, dureza R1–R2), ubicada en el fondo del tajo; la Zona 2, con areniscas oxidadas y alteradas de calidad regular (RMR 43–44, RQD 35–40, dureza R3), en taludes de la zona baja oeste, con presencia de cuñas y bloques estables; y una tercera zona de mejores características geotécnicas no detallada en el presente resumen pero incluida en la zonificación general del tajo.

El diseño de taludes definió alturas de bancos simples entre 2,0 y 4,0 m y de bancos triples de 30 m, con bermas de seguridad mínimas de 4,0 m y 11,0 m respectivamente. El ángulo promedio confiable de banco se estableció en 59°, considerando la fracturación generalizada del macizo rocoso.

El análisis de estabilidad a nivel de bancos mostró que las fallas tipo cuña y planar poseen factores de seguridad estáticos y pseudo-estáticos superiores a los valores mínimos requeridos, por lo que se consideran estables en las condiciones evaluadas.

El análisis de estabilidad global y la verificación mediante modelamiento numérico confirmaron que los factores de seguridad globales son mayores a los mínimos exigidos,

indicando que los taludes del tajo son estables y no requieren obras adicionales de sostenimiento bajo las condiciones actuales de operación.

El monitoreo constante de la Zona 2 debe realizarse debido a su posible infiltración de aguas meteóricas que pueden oxidar los sulfuros asociados a la silicificación, los cuales rellenan controles estructurales pudiendo generar una porosidad secundaria y una inestabilidad en la profundidad del talud.

Recomendaciones

Mantener seguimiento periódico de la estabilidad de los taludes mediante estaciones geomecánicas, inspecciones visuales y equipos de monitoreo (p. ej., inclinómetros, radar o fotogrametría con drones), especialmente en la Zona 1 debido a su baja calidad geomecánica y mayor grado de fracturación.

Diseñar y mantener sistemas de drenaje y canales de desvío para evitar acumulación de agua en bermas y pies de talud, minimizando la reducción de resistencia en las zonas con materiales alterados y oxidados.

Recalibrar periódicamente los ángulos y bermas proyectados usando nuevos datos geomecánicos y geofísicos conforme avance la explotación, asegurando que los factores de seguridad permanezcan por encima de los mínimos admisibles.

Referencias bibliográficas

- Alejano, L., Pons, B., Ramírez-Oyanguren, P. y Rodríguez-Dono, A. (2014). *Slope stability analysis using the finite element method: Application to a case study from Spain*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.
- Benedetto, A. y Pajewski, L. (2015). *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Springer International Publishing.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley.
- Cundall, P. y Strack, O. (1979). *A discrete numerical model for granular assemblies*. Geotechnique.
- Gao, H., Xie, H., Zhang, R., Zhang, Z., Gao, M., Lu, J., Wu, M., Li, Y. y Xie, H. (2025). *Effect of true triaxial loading and unloading rates on the mechanical properties of deep rock*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58, 9047–9071.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2nd ed.). Wiley.
- Gutiérrez, G. (2022). *Propuesta de evaluación de estabilidad y optimización de parámetros de diseño geotécnico de taludes en tajo abierto* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Universidad Nacional de San Agustín. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/15513>
- Harbord, C., Brantut, N., David, E. y Mitchell, T. (2022). *A high pressure, high temperature gas medium apparatus to measure acoustic velocities during deformation of rock*.
- Hoek, E. y Bray, J. W. (2014). *Rock Slope Engineering* (4th ed.). CRC Press.
- Hoek, E. y Marinos, P. (2020). *GSI: Geological Strength Index – updated approach and interpretation*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Huang, Y., Hao, Y., Chen, G., Zhang, L., Zhao, Y., & Zhang, P. (2024). *Stability evaluation of open-pit coal mine slopes under rainfall infiltration effects: A case study (Shengli open-pit coal mine, Inner Mongolia, China)*. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-3439>

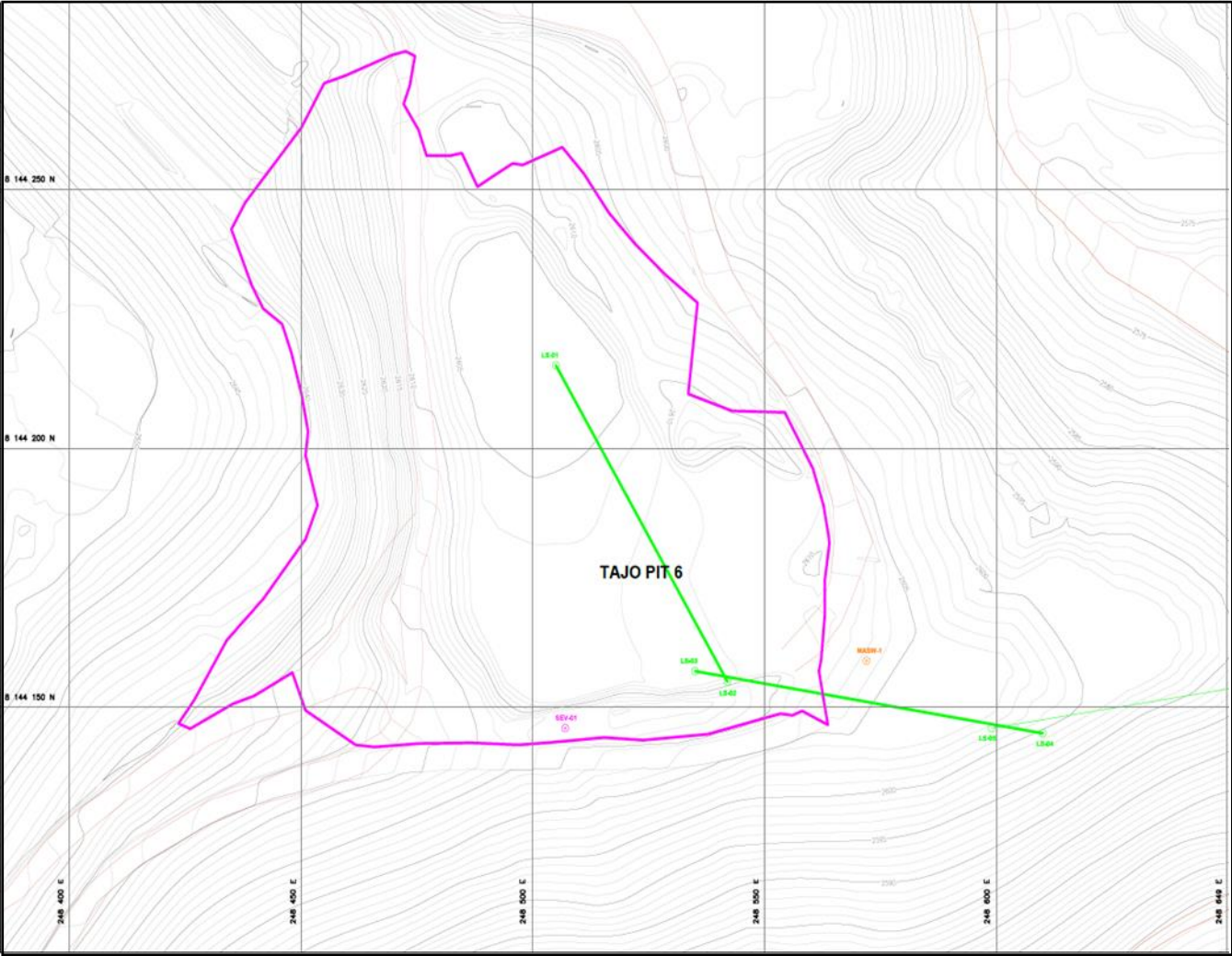
- ISRM. (2015). *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Springer.
- Itasca Consulting Group. (2019). *FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions: User's Guide*. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc.
- Jiang, Q., Zhong, S., Cui, J., Feng, X.-T., & Song, L. (2016). *Statistical characterization of the mechanical parameters of intact rock under triaxial compression: An experimental proof of the Jinping marble*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 4631–4646.
- Mahdi, D. S. y Alrazzaq, A. A. A. (2023). *Rock mechanical properties: A review of experimental tests and prediction approaches*. *Iraqi Journal of Oil & Gas Research*, 3(1), 106–119.
- Marinos, P. y Hoek, E. (2019). *Practical application of the Geological Strength Index (GSI) – A review*. *Geomechanics and Tunnelling*.
- Medina, M. (2014). *Estudio geomecánico de estabilidad de taludes del tajo Chapi Sulfuros* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/40>
- Nian, T., Chen, W., Liu, J. y Xu, W. (2020). *Seismic stability analysis of rock slopes considering dynamic displacement*. *Engineering Geology*.
- Palmström, A. y Stille, H. (2015). *Rock engineering*. CRC Press.
- Patton, F. D. (1966). *Multiple modes of shear failure in rock*. *Proceedings of the 1st ISRM Congress*, 509–513.
- Pedemonte Aguilar, I. (2018). *Evaluation of open pit slope deformation with the novel numerical modeling software Slope Model* [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/159333/Evaluation-of-open-pit-slope-deformation-using-novel-numerical-modeling-software-slope-model.pdf>
- Peña, L. (2014). *Estabilidad de taludes en tajo*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/9934>

- Pérez, H. y Portal, E. (2023). *Evaluación geomecánica y geotécnica, para el diseño de estabilidad física de taludes del tajo noreste de una mina en Junín, 2022* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte, Perú].
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/35888>
- Read, J. y Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design*. CSIRO Publishing.
- Ricchio-Hitchcock, E., & Chatterjee, S. (2025). *Evaluating geomechanical uncertainty and slope reliability analysis in open pit mine planning and optimization*. Mining, Metallurgy & Exploration. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-01152-6>
- Romana, M. (2015). *Slope Mass Rating (SMR) Geomechanics Classification: Thirty Years Review*. STMR Servicio Técnico de Mecánica de Rocas.
- Singh, B. y Goel, R. (2022). *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundations and Landslides* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Szwedzicki, T. (1993). *Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Open Pit and Underground Mining* (1st ed.). CRC Press.
- Terán, M. (2020). *Evaluación de la estabilidad física de los taludes de un tajo abierto en función a la alteración hidrotermal del macizo rocoso* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería] <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22073>
- Tschuchnigg, F., Schweiger, H. F. y Sloan, S. W. (2021). *Numerical analysis of seepage effects on slope stability*. Computers and Geotechnics.
- Wang, H., Zhang, C., Zhou, B., Xue, S., & Jia, P. (2023). *Prediction of triaxial mechanical properties of rocks based on mesoscopic finite element numerical simulation and multi-objective machine learning*. Journal of King Saud University – Science.
- Wyllie, D. C. y Mah, C. W. (2017). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining* (5th ed.). CRC Press.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. y Zhu, J. Z. (2014). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (7th ed.). Elsevier.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Plano de ubicación de investigaciones geotécnicas.....	1
Anexo 2: Registros de mapeo geomecánico.....	2
Anexo 3: Ensayos de laboratorio de Carga Puntual.....	8
Anexo 4: Caracterización geomecánica.....	10
Anexo 5: Análisis cinemático del macizo rocoso.....	16
Anexo 6: Análisis de estabilidad global.....	22

Anexo 1: Plano de ubicación de investigaciones geotécnicas



Anexo 2: Registros de mapeo geomecánico

ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 1

DATOS DE MAPEO GEOMECANICO						LUGAR: E 248556 / N 8144143		POR: VMV				
MINERA PAMPA DE COBRE S.A.						COTA: 2605 msnm		FECHA: 12/05/2015				
TAJO PIT 6								HOJA: 1				
N° ESTACION	ORIENTACION DEL TALUD		TRAMO		VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)							
E-1	005	72	0	20								
TIPO DE ROCA					PARAMETRO	RANGO DE VALORES				VALORACI.		
						VALOR ESTIMADO						
A	%	B	%	N°Fract./m.l.	R. COMPRES. UNIAXIAL (MPa)	≥250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	X <25(2) <5(1) <1(0)	1	
					RQD %	90-100 (20)	75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	X <25 (3)	2	
					ESPACIAMIENTO (m)	≥2 (20)	0.6-2 (15)	0.2-0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	X <0.06 (5)	3	
TIPO	ORIENTACION		RELLENO		CONDICION							
ESTRUC.	DIR. BUZAMIENTO	BUZAMIENTO	ESPACIAMIENTO	TIPO	ESPESOR	COMENTARIOS						
D	335	80	4cm	Ox, Arc	1mm						1	
D	93	85	8cm	Ox, Arc	1mm						1	
D	330	82	4cm	Ox, Arc	1mm						3	
D	27	89	4cm	Ox, Arc	1mm						1	
D	334	85	4cm	Ox, Arc	1mm						2	
D	22	86	4cm	Ox, Arc	1mm						15	
D	328	85	4cm	Ox, Arc	1mm						32	
D	286	78	4cm	Ox, Arc	1mm							
F	322	66		Ox, Arc	1mm							
						VALOR TOTAL RMR (suma de valoracion de 1 a 5)						
						CLASE DE MACIZO ROCOSO						
						RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	IV
						DESCRIPCION	I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA	

GRADO	INDICE DE RESISTENCIAS IDENTIFICACION DE CAMPO	RANGO RES. COMP. MPa
R1	Deleznable con golpes firmes con la punta de martillo de greda o se desconcha con una cuchilla	10 - 50
R2	Se desconcha con dificultad con cuchilla. Marcas poco profundas en la roca con golpe firme del martillo (de punta)	5 - 25
R3	No se raya ni desconcha con cuchillo. La muestra se rompe con golpe firme del martillo	25 - 50
R4	La muestra se rompe con mas de un golpe del martillo	50 - 100
R5	Se requiere varios golpes de martillo para romper la muestra	100 - 250
R6	Solo se rompe esquirlas de la muestra con el martillo	> 250

GRADO	INDICE DE ALTERACION DESCRIPCION
I SANA	Ningún signo de alteración en el material rocoso. Quizás lig. decoloración sobre superficies de discontinuidades principales
II LIGERO	La decoloración indica alteración del material rocoso y superf. de disc. El material rocoso decolorado extremadamente es más débil que en su condición sana.
III MODERADA	Menos de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo la roca sana o decolorada se presenta como un marco continuo o como núcleo rocoso.
IV MUY ALTERD.	Más de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo. La roca sana o decolorada se presenta como un núcleo rocoso.
V DESCOMPU.	Todo el material rocoso está descomp. y/o desintegrado a suelo. La estructura original de la masa rocosa aun se conserva intacta.

CORRELACION RQD vs ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES

ABREVIACION DE TIPO DE ROCA

Mz	Monzonita
Min	Mineral
Cz	Caliza
Di	Diorita
Ar	Arenisca

ABREVIATURAS DE TIPOS DE ESTRUCTURAS

D	DIA CLASA
Fm	FALLA
V	VETA
E	ESTRATO
Vn	VENILLA
Gl	GRIETAS

ABREVIATURAS DE TIPOS DE RELLENO

Ox	OXIDO
Bx	BRECHA
Arc	ARCILLA
Pnz	PANZO
Cal	CALCITA

COMENTARIOS ADICIONALES

ROCA SEDIMENTARIA DENOMINADA ARENISCA, DE COLOR ROJIZO Y BLANQUECINO, MUY METEORIZADA, ALTERACION: ARGILICA Y OXIDACION, MUY FRACTURADA

ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 2

DATOS DE MAPEO GEOMECANICO				LUGAR: E 248527 / N 8144137		POR: VMV	
MINERA PAMPA DE COBRE S.A.				COTA: 2605 msnm		FECHA: 12/05/2015	
TAJO PIT 6						HOJA: 1	

N° ESTACION	ORIENTACION DEL TALUD		TRAMO		VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)												
E-2	DOIR 357	DIP 77	DESDE 0	HASTA 20	PARAMETRO		RANGO DE VALORES										VALORACI.
							VALOR ESTIMADO										
							R. COMPRES. UNIAxIAL (MPa)	<250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	X <25(2) <5(1) <1(0)	1				
							ROD %	90-100 (20)	75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	X <25 (3)	2				
							ESPACIAMIENTO (m)	>2 (20)	0.6-2 (15)	0.2-0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	X <0.06 (5)	3				
							CONDICION DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m Long. (6)	1-3m Long. (4)	3-10m (2)	X 10-20m (1)	>20m (0)	4A			
								ABERTURA	Cerrada (6)	<0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	X 1-5mm (1)	>5mm (0)	4B			
								DE RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	X Lig. rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	4C			
								RELLENO	Limpia (6)	Duro <5mm (4)	Duro >5mm (2)	X Suave <5mm (1)	Suave >5mm (0)	4D			
								ALTERACION	Sana (6)	Lig. Alterada. (5)	Mod. Alterada. (3)	X Muy Alterada. (2)	Descompuesta (0)	4E			
							AGUAS SUBTERRANEAS	X Seco (15)	Humedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	5				
					VALOR TOTAL RMR (suma de valoracion de 1 a 5)										32		
					CLASIFICACION DEL MACIZO ROCOSO												
							RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	IV				
							DESCRIPCION	I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA					

GRADO	INDICE DE RESISTENCIAS IDENTIFICACION DE CAMPO	RANGO RESIS. COMP. MPa
R1	Deleznable con golpes firmes con la punta de martillo de geólogo se desconcha con una cuchilla	1.0 - 5.0
R2	Se desconcha con dificultad con cuchilla. Marcas poco profundas en la roca con golpe firme del martillo (de punta)	5 - 25
R3	No se raya ni desconcha con cuchillo. La muestra se rompe con golpe firme del martillo	25 - 50
R4	La muestra se rompe con más de un golpe de el martillo	50 - 100
R5	Se requiere varios golpes de martillo para romper la muestra	100 - 250
R6	Solo se rompe esquirlas de la muestra con el martillo	> 250

GRADO	INDICE DE ALTERACION DESCRIPCION
I SANA	Ningún signo de alteración en el material rocoso. Quizás lig. decoloración sobre superficies de discontinuidades principales
II LIGERO	La decoloración indica alteración del material rocoso y superf. de disc. El material rocoso descolorido extremadamente es más débil que en su condición sana.
III MODERADA	Menos de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo la roca sana o decolorada se presenta como un marco continuo o como núcleo rocoso.
IV MUY ALTERO.	Más de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo. La roca sana o decolorada se presenta como un núcleo rocoso.
V DESCOMPU.	Todo el material rocoso está descomp. y/o desintegrado a suelo. La estructura original de la masa rocosa aun se conserva intacta.

CORRELACION RQD vs ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES

ABREVIACION DE TIPO DE ROCA	
Mz	Monzonita
Min	M. mineral
Cz	Caliza
Di	Diorita
Ar	Arenisca

ABREVIATURAS DE TIPO DE DESTRUCTURAS	
D	DIA CLASA
Fn	FALLA
V	VETA
E	ESTRATO
Vn	VENILLA
Gi	GRIETAS

COMENTARIOS ADICIONALES	
ROCA SEDIMENTARIA DENOMINADA ARENISCAS, DE COLOR BLANQUECINO, COMPLETAMENTE METEORIZADA, ALTERACION: ARGILICA Y OXIDACION, ROCA TRITURADA	

ABREVI. ESPACIAMIENTO	
1	> 2 m
2	0.6 - 2 m
3	0.2 - 0.6 m
4	0.06 - 0.2 m
5	< 0.06 m

ABREVIATURAS DE TIPO DE RELLENO	
Ox	OXIDO
Bx	BRECHA
Arc	ARCILLA
Pnz	PANIZO
Cal	CALCITA

ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 3

DATOS DE MAPEO GEOMECANICO				LUGAR: E 248522 / N 8144213		POR:	
MINERA PAMPA DE COBRE S.A.				COTA: 2605 msnm		FECHA: 12/05/2015	
TAJO PIT 6						HOJA: 1	

N° ESTACION	ORIENTACION DE LA CARA DEL TALUD		TRAMO		VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)												
E-3	DOR 250	DIP 82	DESDE 0	HASTA 20	PARAMETRO		RANGO DE VALORES										VALORACI.
							VALOR ESTIMADO										
							R. COMPRES. UNIAXIAL (MPa)										
							RQD %										
							ESPACIAMIENTO (m)										
							CONDICION DE JUNTAS										
							ALTERACION										
							AGUAS SUBTERRANEAS										
							VALOR TOTAL RMR (suma de valoracion de 1 al 5)										
							CLASIFICACION DEL MACIZO ROCOSO										
							DESCRIPCION										

TIPO	ORIENTACION		RELLENO		COMENTARIOS											
ESTRUC.	DIR. BUZAMIENTO	BUZAMIENTO	ESPACIAMIENTO	TIPO	ESPEJOR											
D	252	86	4cm	Ox. Arc	1mm											
D	3	85	6cm	Ox. Arc	1mm											
D	277	83	4cm	Ox. Arc	1mm											
D	155	89	4cm	Ox. Arc	1mm											
D	343	60	4cm	Ox. Arc	1mm											
D	172	80	4cm	Ox. Arc	1mm											
E	257	8	4cm	Ox. Arc	1mm											
D	26	78	4cm	Ox. Arc	1mm											
D	70	85	4cm	Ox. Arc	1mm											

GRADO	INDICE DE RESISTENCIAS IDENTIFICACION DE CAMPO	RANGO RESIS. COMP. MPa
R1	Desmenuzable con golpes firmes con la punta de martillo de geólogo se desmenuza con una cuchilla	10 - 50
R2	Se desmenuza con dificultad con cuchilla. Marcas poco profundas en la roca con golpe firme del martillo (de punta)	5 - 25
R3	No se raya ni desmenuza con cuchilla. La muestra se rompe con golpe firme del martillo	25 - 50
R4	La muestra se rompe con mas de un golpe del martillo	50 - 100
R5	Se requiere varios golpes de martillo para romper la muestra	100 - 250
R6	Se la se rompe esquilas de la muestra con el martillo	> 250

GRADO	INDICE DE ALTERACION DESCRIPCION
I SANA	Ningún signo de alteración en el material rocoso. Quizás lig. decoloración sobre superficies de discontinuidades principales
II LIGERO	La decoloración indica alteración del material rocoso y superf. de disc. El material rocoso decolorado extremadamente es más débil que en su condición sana.
III MODERADA	Menos de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo la roca sana o decolorada se presenta como un marco continuo o como núcleo rocoso.
IV MUY ALTER.	Más de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo. La roca sana o decolorada se presenta como un núcleo rocoso.
V DESCOMPU.	Todo el material rocoso está descomp. y/o desintegrado a suelo. La estructura original de la masa rocosa aún se conserva intacta.

ABREVIACION DE TIPO DE ROCA	
Mz	Monzonita
Min	Mineral
Cz	Caliza
Di	Diorita
Ar	Arenisca

ABREVIATURAS DE TIPOS DE ESTRUCTURAS	
D	DISCLAS
Fn	FALLA
V	VETA
E	ESTRATO
Vn	VENILLA
Gi	GRIETAS

COMENTARIOS ADICIONALES	
ROCA SEDIMENTARIA DENOMINADA ARENISCAS, DE COLOR BLANQUECINO, COMPLETAMENTE METEORIZADA, ALTERACION: ARGILICA Y OXIDACION, ROCA TRITURADA	

ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 4

DATOS DE MAPEO GEOMECANICO				LUGAR: E 248487 / N 8144204		POR: VMV	
MINERA PAMPA DE COBRE S.A.				COTA: 2605 msnm		FECHA: 12/05/2015	
TAJO PIT 6						HOJA: 1	

N° ESTACION	ORIENTACION DE LA CARA DEL TALUD		TRAMO		VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)										VALOR ACL.		
	DIR	DIP	DESDE	HASTA	PARAMETRO		RANGO DE VALORES										
E-4	0 80	72	0	20													
TIPO DE ROCA					FRECUENCIA FRACTURA		VALOR ESTIMADO										
A		%	B		%	N° Fract. / m ²											
TIPO ESTRUCT.	DIR. BUZAMIENTO	BUZAMIENTO	ESPACIAMIENTO	TIPO	ESPESES	COMENTARIOS											
D	86	67	4cm	Ox, Arc	1mm												4
D	350	80	6cm	Ox, Arc	1mm												5
D	334	85	4cm	Ox, Arc	1mm												8
D	160	89	4cm	Ox, Arc	1mm												1
D	348	75	4cm	Ox, Arc	1mm												1
D	104	75	4cm	Ox, Arc	1mm												5
D	336	75	4cm	Ox, Arc	1mm												1
D	330	77	4cm	Ox, Arc	1mm												3
D	335	82	4cm	Ox, Arc	1mm												15
VALOR TOTAL RMR (suma de valoracion de 1 a 5)														43			
CLASIFICACION DEL MACIZO ROCOSO														III			
RMR							100 - 81		80 - 61		60 - 41		40 - 21		20 - 0		
DESCRIPCION							I MUY BUENA		II BUENA		III REGULAR		IV MALA		V MUY MALA		

GRADO	INDICE DE RESISTENCIAS IDENTIFICACION DE CAMPO	RANGO RESIS. COMP. MPa
R1	Desmenuzable con golpes firmes con la punta de martillo de geólogo se desmenuza con una cuchilla	10 - 5,0
R2	Se desmenuza con dificultad con cuchilla. Marcas poco profundas en la roca con golpe firme del martillo (de punta)	5 - 25
R3	No se raya ni desmenuza con cuchilla. La muestra se rompe con golpe firme del martillo	25 - 50
R4	La muestra se rompe con más de un golpe del martillo	50 - 100
R5	Se requiere varios golpes de martillo para romper la muestra	100 - 250
R6	Solo se rompe esquirlas de la muestra con el martillo	> 250

GRADO	INDICE DE ALTERACION DESCRIPCION
I SANA	Ningún signo de alteración en el material rocoso. Quizás lig. decoloración sobre superficies de discontinuidades principales
II LIGERO	La decoloración indica alteración del material rocoso y superf. de disc. El material rocoso decolorado extremadamente es más débil que en su condición sana.
III MODERADA	Menos de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo la roca sana o decolorada se presenta como un marco continuo o como núcleo rocoso.
IV MUY ALTERD.	Más de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo. La roca sana o decolorada se presenta como un núcleo rocoso.
V DESCOMP. PU.	To do el material rocoso está descomp. y/o desintegrado a suelo. La estructura original de la masa rocosa aun se conserva intacta.

ABREVIACION DE TIPO DE ROCA	
Mz	Monzonita
Min	Mineral
Cz	Caliza
Di	Diorita
Ar	Arenisca

ABREVIATURAS DE TIPOS DE ESTRUCTURAS	
D	DIA CLASA
Fn	FALLA
V	VETA
E	ESTRATO
Vn	VENILLA
Gi	GRIETAS

ABREVI. ESPACIAMIENTO	
1	> 2 m
2	0.6 - 2 m
3	0.2 - 0.6 m
4	0.06 - 0.2 m
5	< 0.06 m

ABREVIATURAS DE TIPOS DE RELLENO	
Ox	OXIDO
Bx	BRECHA
Arc	ARCILLA
Puz	PANIZO
Cal	CALCITA

COMENTARIOS ADICIONALES

ROCA SEDIMENTARIA DENOMINADA ARENISCA, DE COLOR BEIGE Y ROJIZO, MUY METEORIZADA, ALTERACION: OXIDACION Y ARGILICA, ROCA MUY FRACTURADA

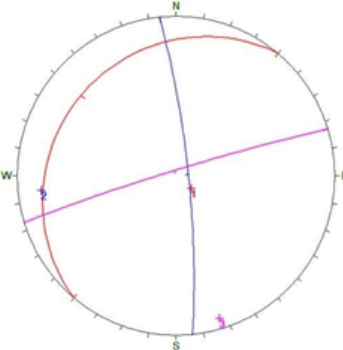
ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 5

DATOS DE MAPEO GEOMECANICO				LUGAR: E 248486 / N 8144161		POR: VMV	
MINERA PAMPA DE COBRE S.A.				COTA: 2605 msnm		FECHA: 12/05/2015	
TAJO PIT 6						HOJA: 1	

N° ESTACION	ORIENTACION DE LA CARA DEL TALUD	TRAMO	VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)										
E-5	DIR 0 84 DIP 68	DESDE 0 HASTA 20	PARAMETRO	RANGO DE VALORES									
			VALOR ESTIMADO										
			VALOR APLICADO										
			VALOR TOTAL RMR (suma de valoracion de 1 al 5)										
			CLASIFICACION DEL MACIZO ROCOSO										
			DESCRIPCION										

GRADO	INDICE DE RESISTENCIAS IDENTIFICACION DE CAMPO	RANGO RESIS. COMP. MPa
R1	Desmenuzable con golpes firmes con la punta de martillo de geólogo se desmenuza con una cuchilla	10 - 50
R2	Se desmenuza con dificultad con cuchilla. Marcas poco profundas en la roca con golpe firme del martillo (de punta)	5 - 25
R3	No se raya ni desmenuza con cuchillo. La muestra se rompe con golpe firme del martillo	25 - 50
R4	La muestra se rompe con más de un golpe del martillo	50 - 100
R5	Se requiere varios golpes de martillo para romper la muestra	100 - 250
R6	Solo se rompe esquirlas de la muestra con el martillo	> 250

GRADO	INDICE DE ALTERACION DESCRIPCION
I SANA	Ningún signo de alteración en el material rocoso. Quizás lig. decoloración sobre superficies de discontinuidades principales
II LIGERO	La decoloración indica alteración del material rocoso y superf. de disc. El material rocoso descolorido extremadamente es más débil que en su condición sana.
III MODERADA	Menos de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo la roca sana o decolorada se presenta como un marco continuo o como núcleo rocoso.
IV MUY ALTERD.	Más de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo. La roca sana o decolorada se presenta como un núcleo rocoso.
V DESCOMPU.	To do el material rocoso está descomp. y/o desintegrado a suelo. La estructura original de la masa rocosa aun se conserva intacta.



Orientations

ID Dip / Direction

1 14 / 310

2 81 / 084

3 86 / 343

ABREVIAS. ESPACIAMIENTO	
1	> 2 m
2	0.6 - 2 m
3	0.2 - 0.6 m
4	0.06 - 0.2 m
5	< 0.06 m

ABREVIATURAS DE TIPOS DE RELLENO	
Ox	OXIDO
Bx	BRECHA
Ar	ARCILLA
Pz	PANIZO
Ca	CALCITA

ABREVIACION DE TIPO DE ROCA	
Mz	Monzonita
Min	Mineral
Cz	Caliza
Di	Dionita
Ar	Arenisca

ABREVIATURAS DE TIPOS DE ESTRUCTURAS	
D	DIA CLASA
Fn	FALLA
V	VETA
E	ESTRATO
Vn	VENILLA
Gi	GRIETAS

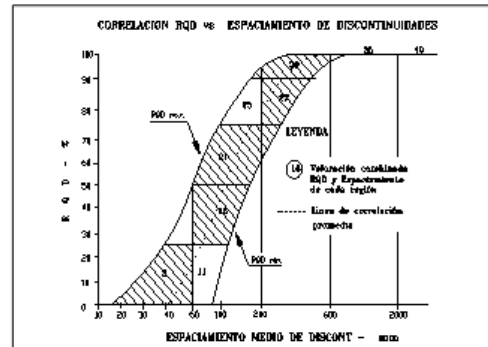
COMENTARIOS ADICIONALES	
ROCA SEDIMENTARIA DENOMINADA ARENISCA, DE COLOR BEIGE Y ROJIZO, MUY METEORIZADA, ALTERACION: OXIDACION Y ARGILICA, ROCA MUY FRACATURADA	

ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 6

DATOS DE MAPEO GEOMECANICO										LUGAR: E 248505 / N 8144268		POR: VMV			
MINERA PAMPA DE COBRE S.A.										COTA: 2605 msnm		FECHA: 12/05/2015			
TAJO PIT 6												HORA: 1			
N°		ORIENTACION DE LA CARA DEL TALUD				TRAMO		VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)							
ESTACION		DIR.		DIP		DESDE		HASTA							
E-6		250		80		0		20							
TIPO DE ROCA										FRECUENCIA FRACATURA					
A		%		B		%		N° Fract. / m.							
TIPO	ORIENTACION			ESPACIAMIENTO		RELLENO		COMENTARIOS							
ESTRUC.	DIR.	BUZAMIENTO			TIPO	ESPESES	OR								
E	245	19	4cm	Ox. Arc	1mm										
D	243	82	6cm	Ox. Arc	1mm										
D	425	55	4cm	Ox. Arc	1mm										
D	245	80	4cm	Ox. Arc	1mm										
D	320	82	4cm	Ox. Arc	1mm										
D	95	47	4cm	Ox. Arc	1mm										
D	112	54	4cm	Ox. Arc	1mm										
PARAMETRO										RANGO DE VALORES				VALORACION	
										VALOR ESTIMADO					
R. COMPRESION UNIAXIAL (MPa)										RQD %					
										ESPACIAMIENTO (m)					
										CONDICION DE JUNTAS					
										AGUA SUBTERRANEA					
										VALOR TOTAL RMR (suma de valoracion de 1al 5)					
										CLASIFICACION DE MACIZO ROCOSO					
										DESCRIPCION					

GRADO	INDICE DE RESISTENCIAS IDENTIFICACION DE CAMPO	RANGO RESIS. COMP. Mpa
R1	Deleznable con golpes firmes con la punta de martillo de geólogo se desconcha con una cuchilla	10 - 5,0
R2	Se desconcha con dificultad con cuchilla. Marcas poco profundas en la roca con golpe firme del martillo (de punta)	5 - 25
R3	No se raya ni desconcha con cuchillo. La muestra se rompe con golpe firme del martillo	25 - 50
R4	La muestra se rompe con mas de un golpe de el martillo	50 - 100
R5	Se requiere varios golpes de martillo para romper la muestra	100 - 250
R6	Solo se rompi esquirlas de la muestra con el martillo	>250

GRADO	INDICE DE ALTERACION DESCRIPCION
I SANA	Ningún signo de alteración en el material rocoso. Quizás lig. de coloración sobre superficies de discontinuidades principales.
II LIGERO	La decoloración indica alteración del material rocoso y superfl. de disc. El material rocoso descolorido extremadamente es más débil que en su condición sana.
III MODERADA	Menos de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo la roca sana o decolorada se presenta como un marco continuo o como núcleo rocoso.
IV MUY ALTERD.	Más de la mitad del mat. rocoso está descomp. y/o desintegrado a un suelo. La roca sana o decolorada se presenta como un núcleo rocoso.
V DESCOMP. PU.	Todo el material rocoso está descomp. y/o desintegrado a suelo. La estructura original de la masa rocosa aun se conserva intacta.



ABREVIATA. ESPACIAMIENTO	
1	> 2 m
2	0.6 - 2 m
3	0.2 - 0.6 m
4	0.06 - 0.2 m
5	< 0.06 m

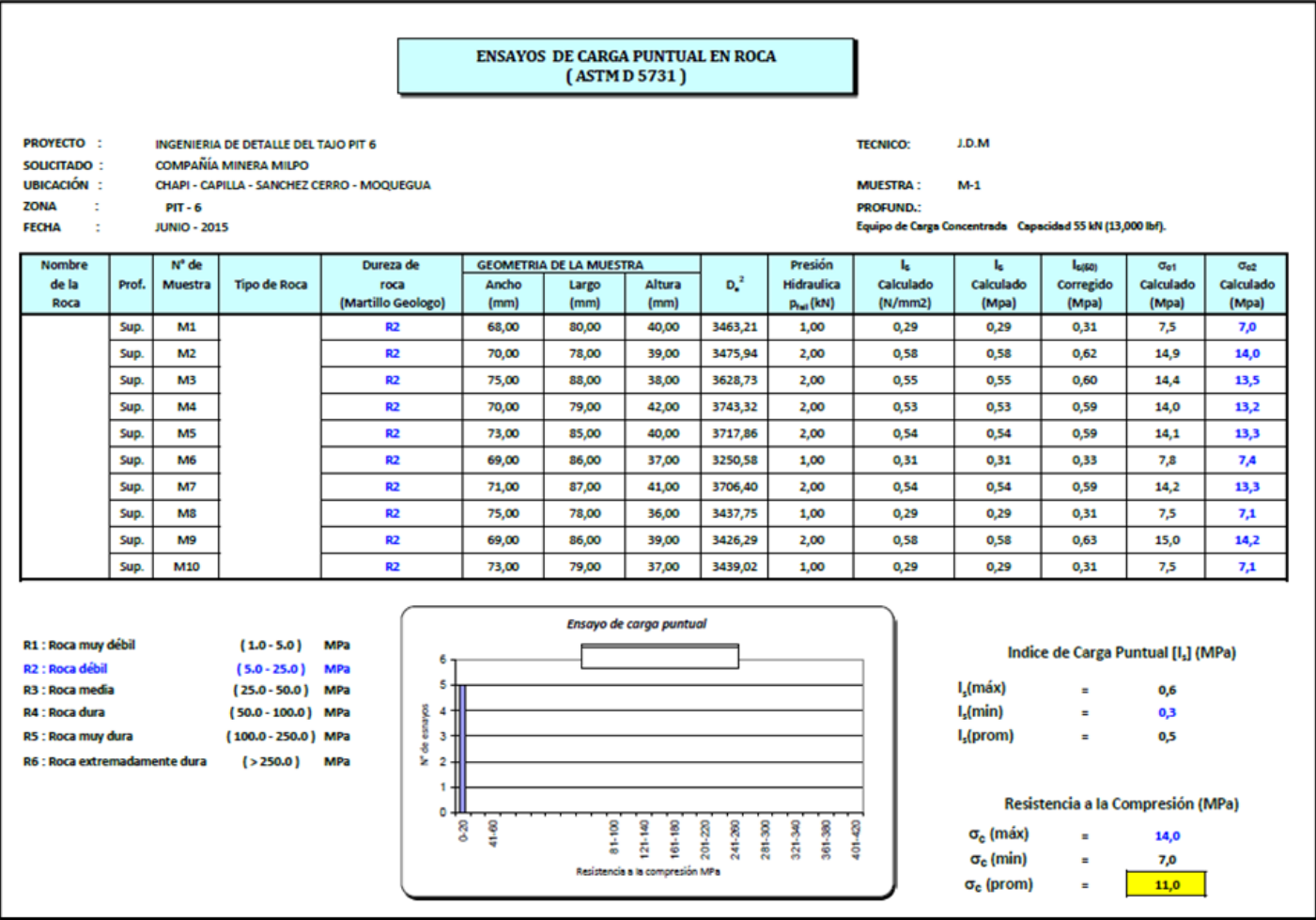
ABREVIATURAS DE TIPOS DE RELLENO	
Ox	OXIDO
Bx	BRECHA
Arc	ARCILLA
Prz	PANIZO
Cal	CALCITA

ABREVIACION DE TIPO DE ROCA	
Mz	Moconzilita
Min	Mineral
Cz	Caliza
Di	Diorita
Ar	Arenisca

AB REMATURAS DETIPOS DEESTRUCTURAS	
D	DIA CLASA
F _n	FALLA
V	VETA
E	ESTRATO
V _n	VENILLA
Gi	GRIETAS

COMENTARIOS ADICIONALES	
ROCA SEDIMENTARIA DENOMINADA ARENISCA, DE COLOR MARRON CLARO, MUY METEORIZADA, ALTERACION: OXIDACION Y ARGILICA, ROCA MUY FRACTURADA	

Anexo 3: Ensayos de laboratorio de Carga Puntual



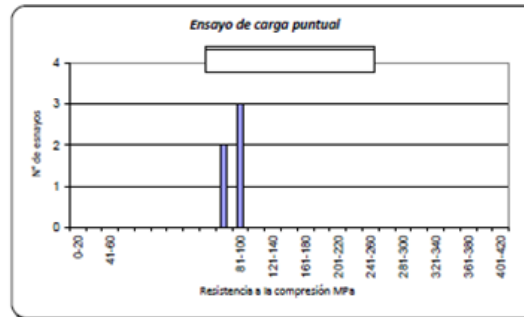
ENSAYOS DE CARGA PUNTUAL EN ROCA (ASTM D 5731)

PROYECTO : INGENIERÍA DE DETALLE DEL TAJO PIT 6
 SOLICITADO : COMPAÑÍA MINERA MILPO
 UBICACIÓN : CHAPI - CAPILLA - SANCHEZ CERRO - MOQUEGUA
 ZONA : PIT - 6
 FECHA : JUNIO - 2015

TECNICO: J.D.M
 MUESTRA : M-2
 PROFUND.:
 Equipo de Carga Concentrada Capacidad 55 kN (13,000 lbf).

Nombre de la Roca	Prof.	N° de Muestra	Tipo de Roca	Dureza de roca (Martillo Geologo)	GEOMETRÍA DE LA MUESTRA			D _s ²	Presión Hidráulica P _{hid} (kN)	I _c Calculado (N/mm2)	I _c Calculado (Mpa)	I _c (60) Corregido (Mpa)	σ ₀₁ Calculado (Mpa)	σ ₀₂ Calculado (Mpa)
					Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)							
	Sup.	M1		R4	80,00	93,00	40,00	4074,37	16,00	3,93	3,93	4,38	105,2	98,8
	Sup.	M2		R4	83,00	95,00	39,00	4121,48	13,00	3,15	3,15	3,53	84,7	79,6
	Sup.	M3		R4	79,00	92,00	43,00	4325,19	14,00	3,24	3,24	3,66	87,9	82,6
	Sup.	M4		R4	81,00	89,00	41,00	4228,43	12,00	2,84	2,84	3,19	76,7	72,0
	Sup.	M5		R4	79,00	90,00	40,00	4023,44	15,00	3,73	3,73	4,15	99,6	93,6
	Sup.	M6		R4	82,00	92,00	42,00	4385,04	15,00	3,42	3,42	3,88	93,2	87,5
	Sup.	M7		R4	80,00	88,00	38,00	3870,65	13,00	3,36	3,36	3,71	88,9	83,6
	Sup.	M8		R4	82,00	89,00	39,00	4071,82	14,00	3,44	3,44	3,84	92,1	86,5
	Sup.	M9		R4	79,00	91,00	39,00	3922,85	14,00	3,57	3,57	3,95	94,8	89,1
	Sup.	M10		R4	81,00	93,00	41,00	4228,43	12,00	2,84	2,84	3,19	76,7	72,0

R1 : Roca muy débil (1.0 - 5.0) MPa
 R2 : Roca débil (5.0 - 25.0) MPa
 R3 : Roca media (25.0 - 50.0) MPa
 R4 : Roca dura (50.0 - 100.0) MPa
 R5 : Roca muy dura (100.0 - 250.0) MPa
 R6 : Roca extremadamente dura (> 250.0) MPa



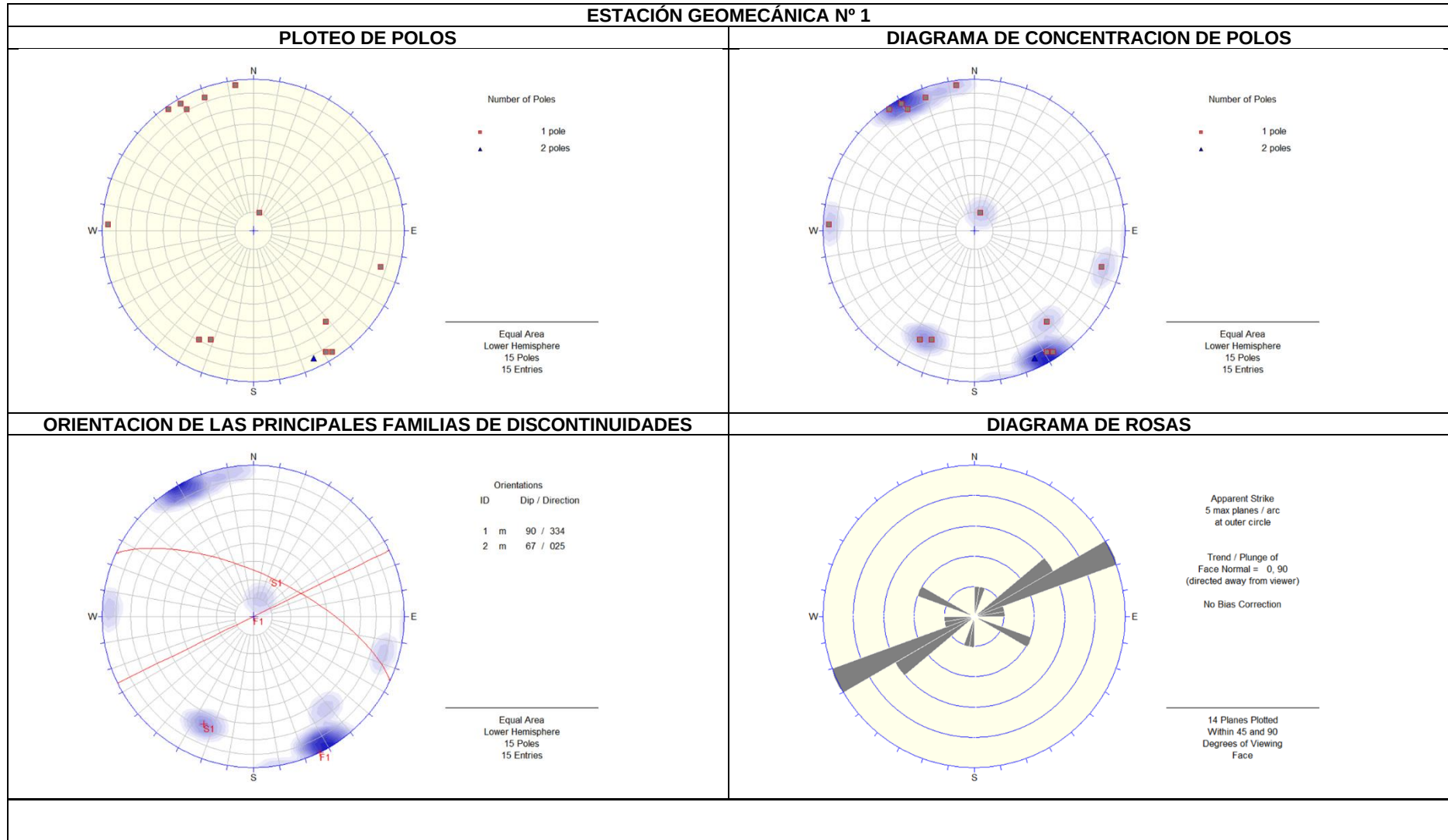
Índice de Carga Puntual [I_c] (MPa)

I_c(máx) = 4,4
 I_c(mín) = 3,5
 I_c(prom) = 3,9

Resistencia a la Compresión (MPa)

σ_c (máx) = 98,8
 σ_c (mín) = 79,6
 σ_c (prom) = 84,5

Anexo 4: Caracterización geomecánica



ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 2

PLOTEO DE POLOS

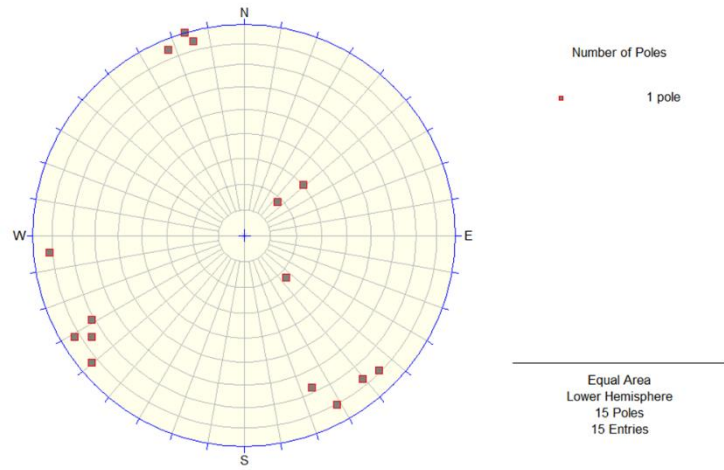
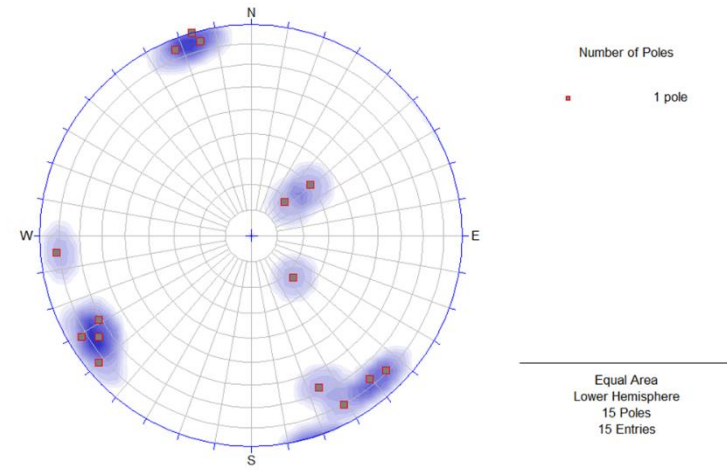


DIAGRAMA DE CONCENTRACION DE POLOS



ORIENTACION DE LAS PRINCIPALES FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

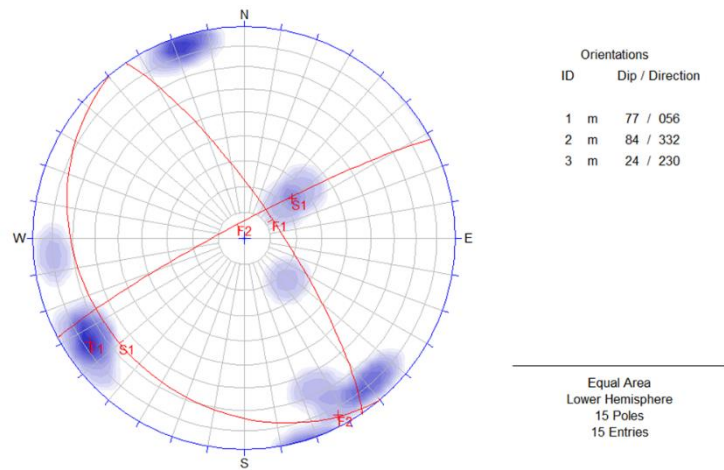
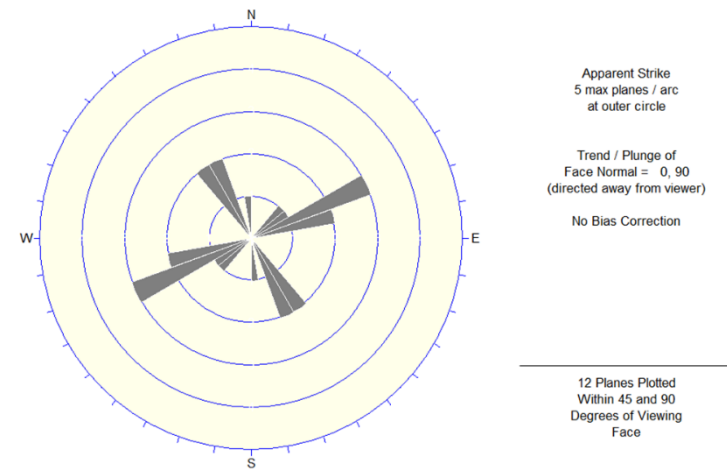


DIAGRAMA DE ROSAS



ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 3

PLOTEO DE POLOS

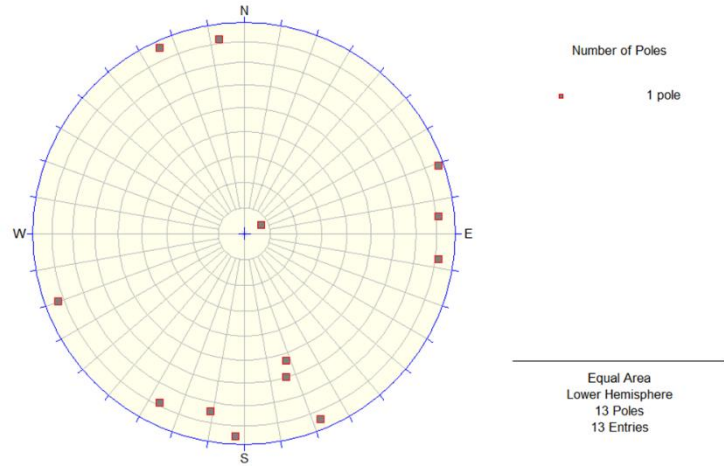
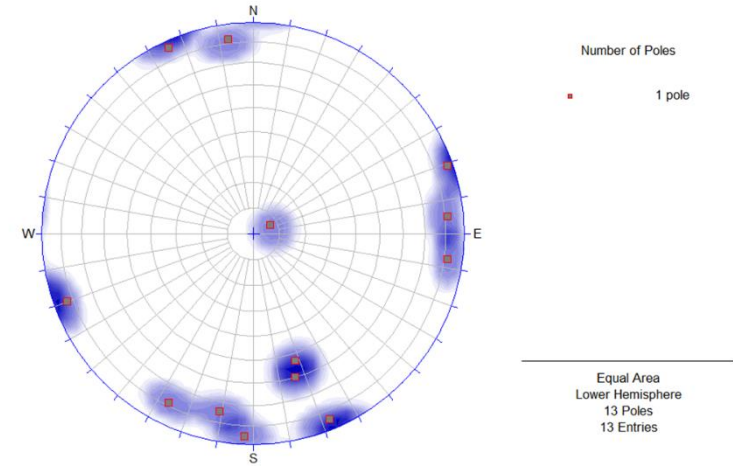


DIAGRAMA DE CONCENTRACION DE POLOS



ORIENTACION DE LAS PRINCIPALES FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

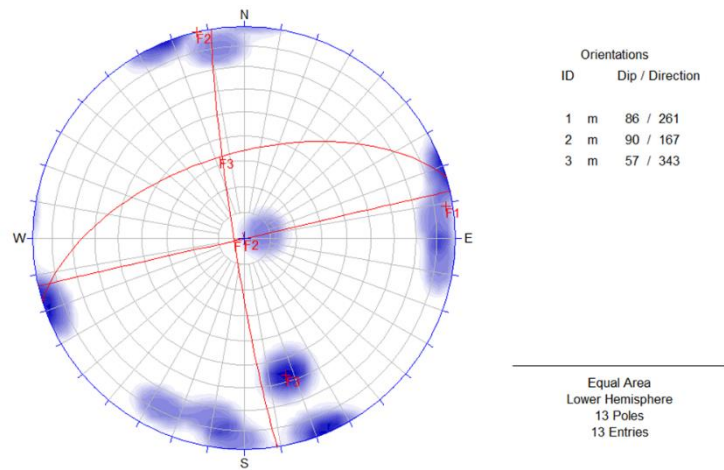
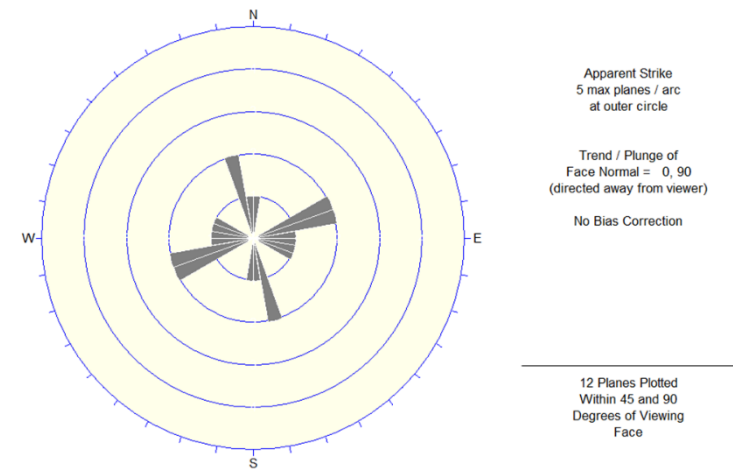


DIAGRAMA DE ROSAS



ESTACIÓN GEOMECÁNICA Nº 4

PLOTEO DE POLOS

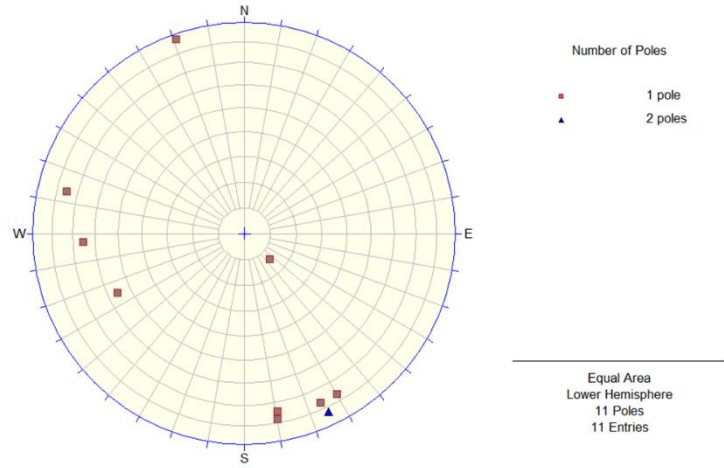
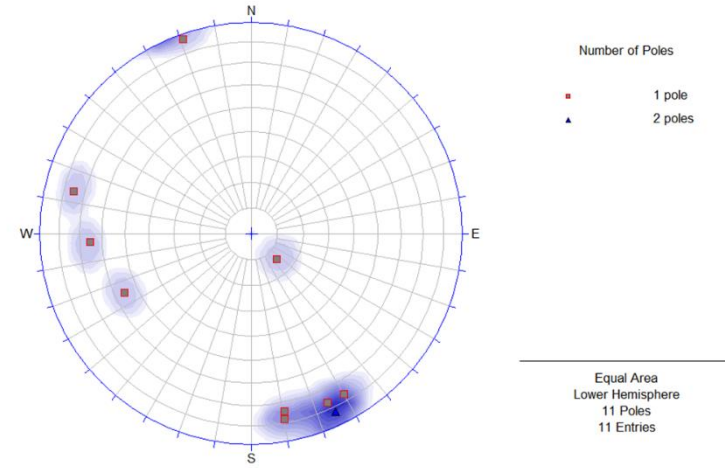


DIAGRAMA DE CONCENTRACION DE POLOS



ORIENTACION DE LAS PRINCIPALES FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

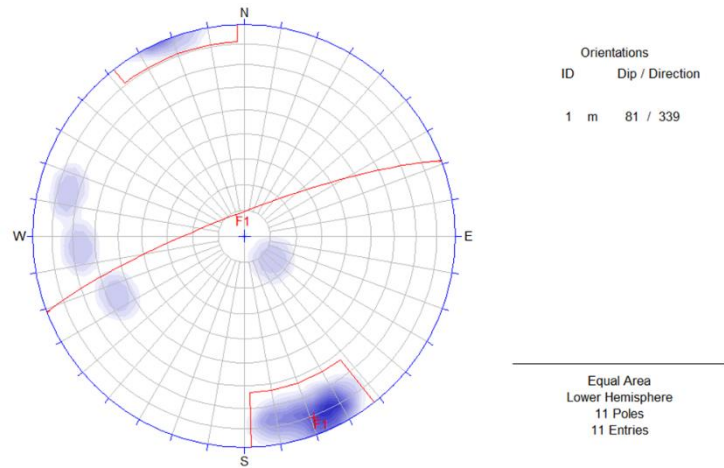
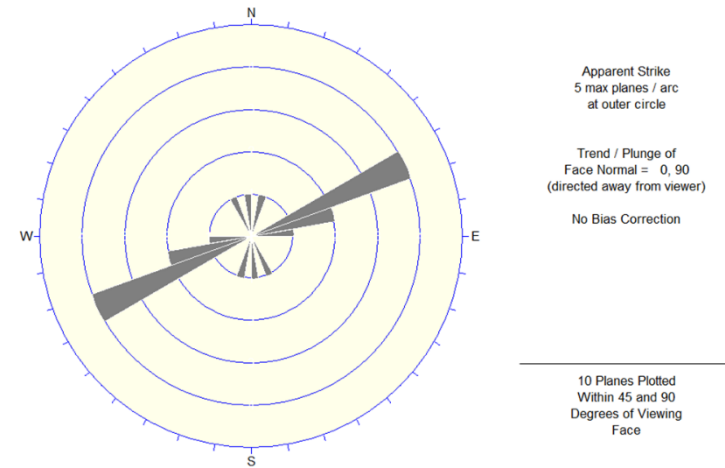


DIAGRAMA DE ROSAS



ESTACIÓN GEOMECÁNICA Nº 5

PLOTEO DE POLOS

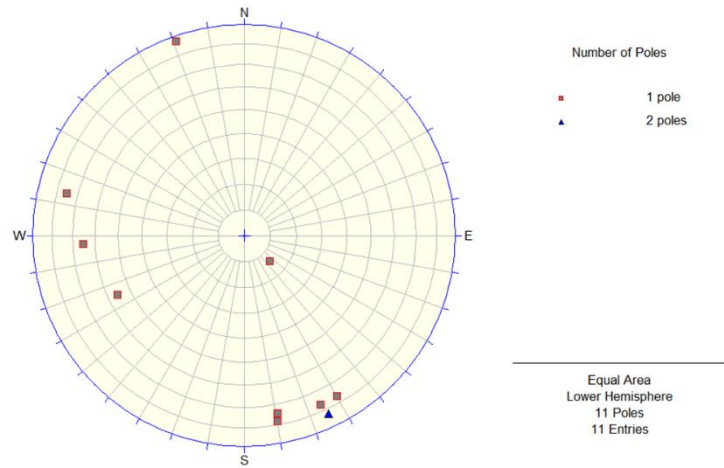
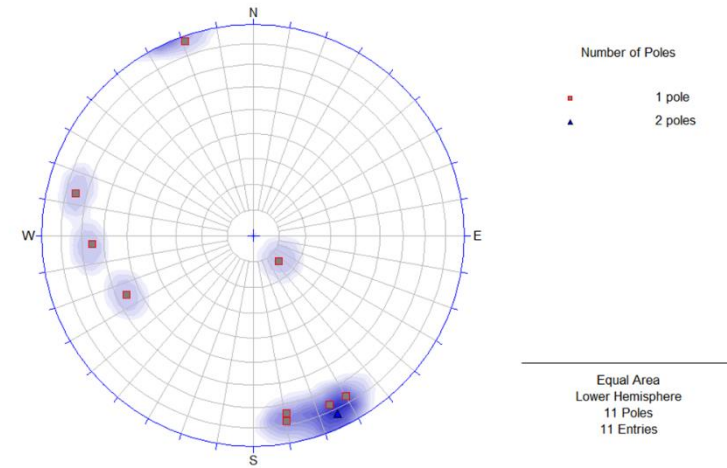


DIAGRAMA DE CONCENTRACION DE POLOS



ORIENTACION DE LAS PRINCIPALES FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

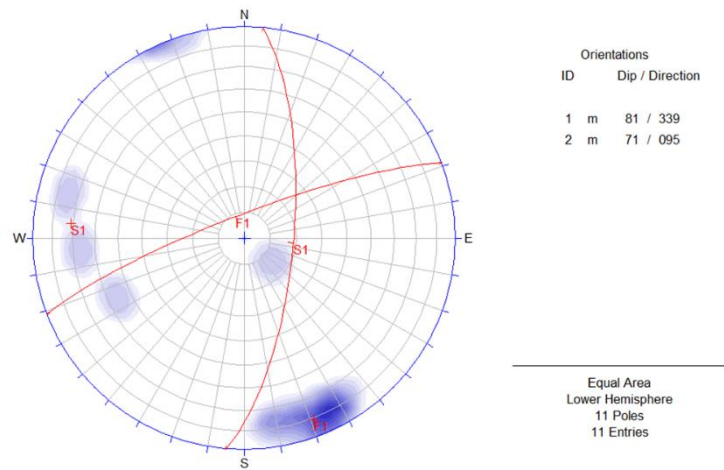
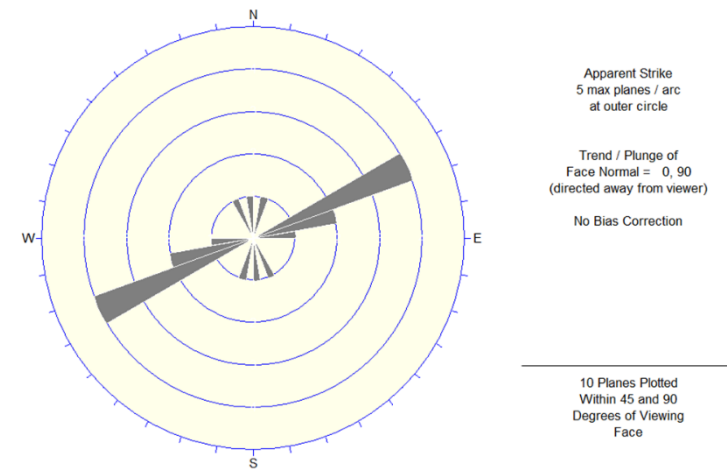


DIAGRAMA DE ROSAS



ESTACIÓN GEOMECÁNICA Nº 6

PLOTEO DE POLOS

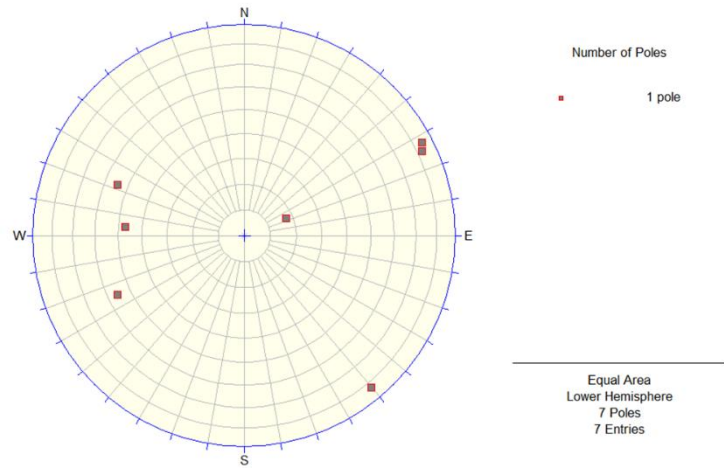
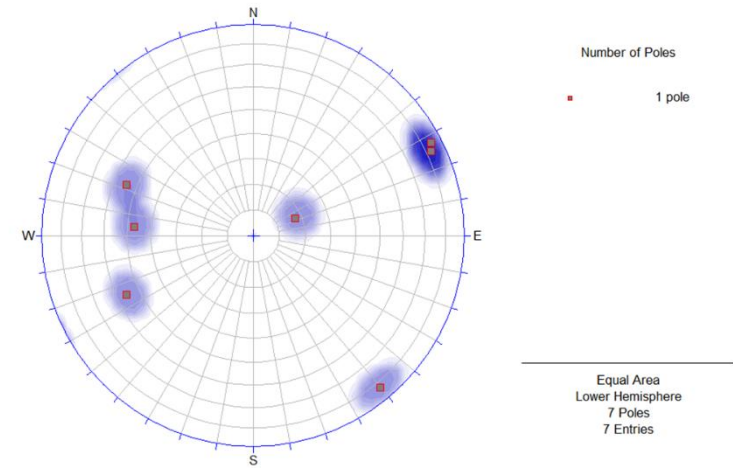


DIAGRAMA DE CONCENTRACION DE POLOS



ORIENTACION DE LAS PRINCIPALES FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

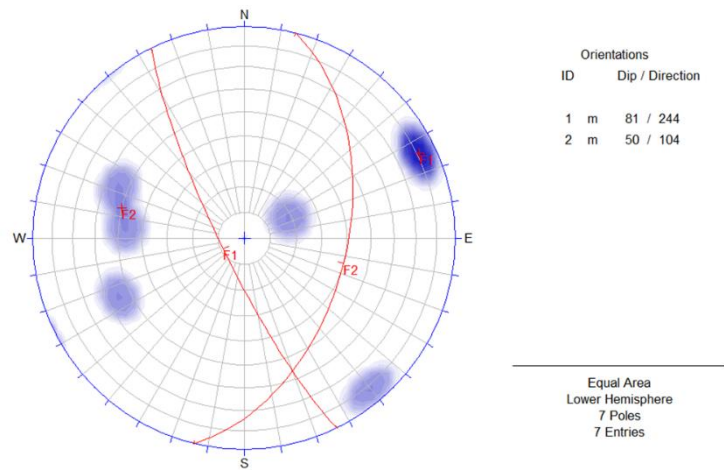
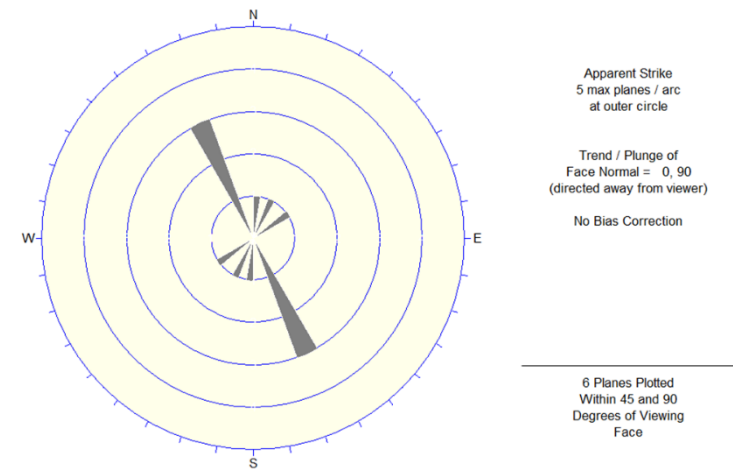
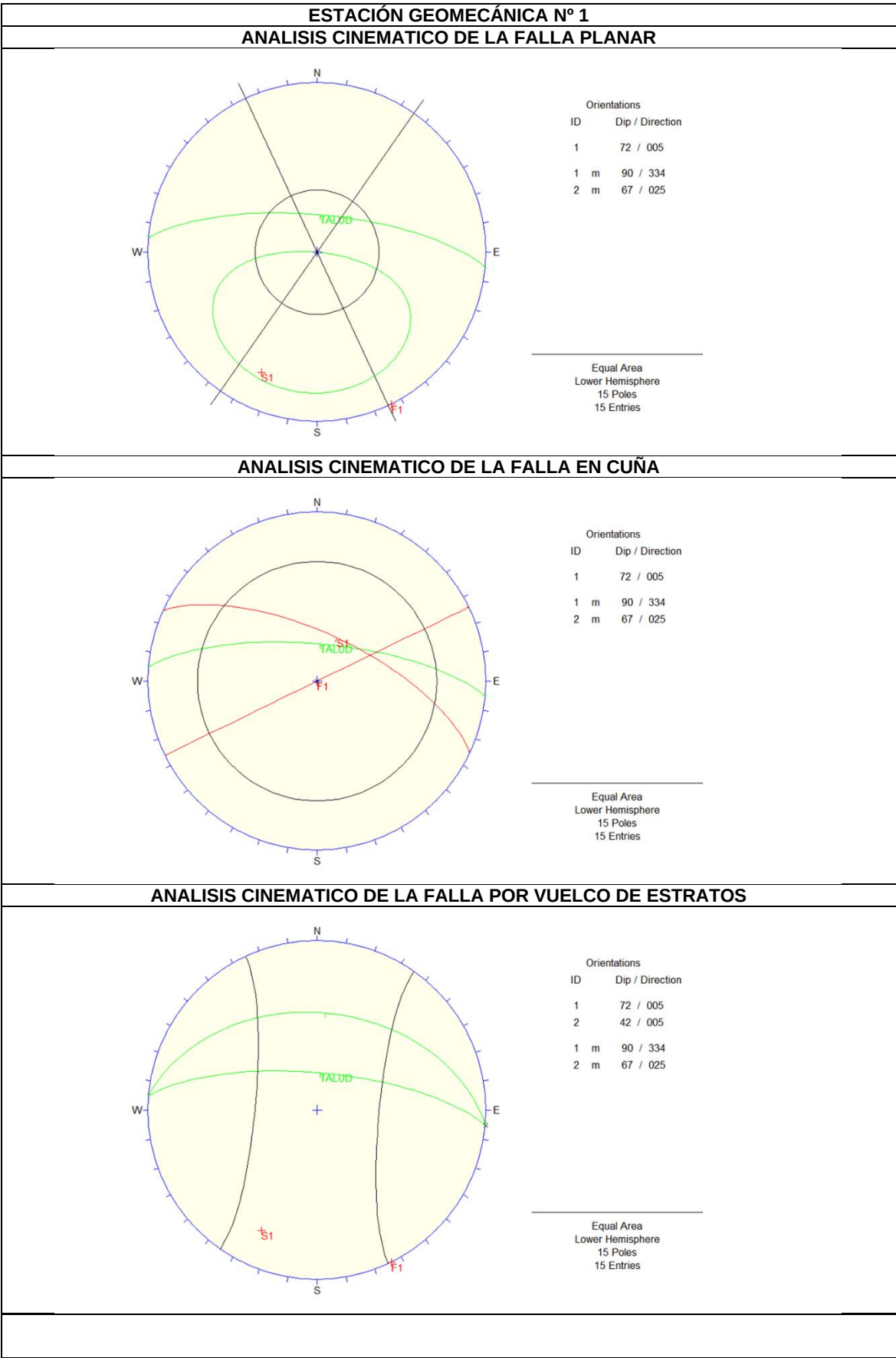


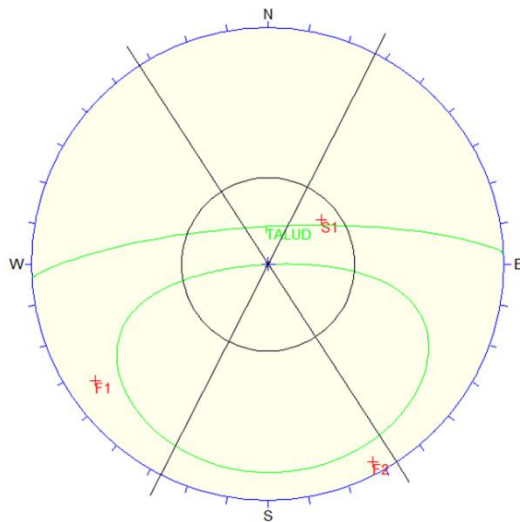
DIAGRAMA DE ROSAS



Anexo 5: Análisis cinemático del macizo rocoso



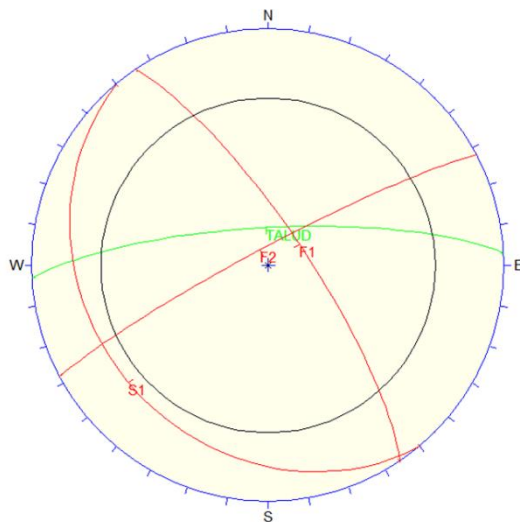
ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 2
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA PLANAR



Orientations	
ID	Dip / Direction
1	77 / 357
1 m	77 / 056
2 m	84 / 332
3 m	24 / 230

Equal Area
 Lower Hemisphere
 15 Poles
 15 Entries

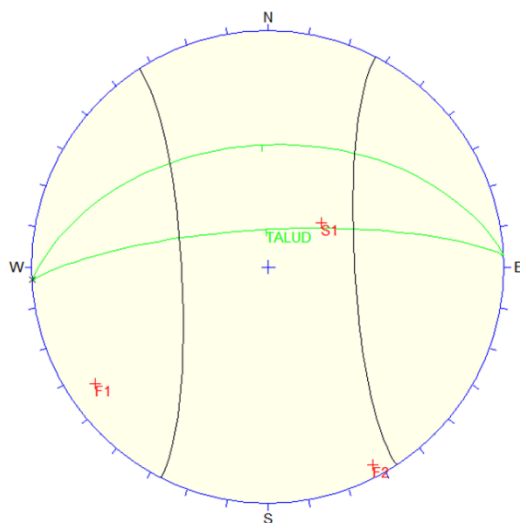
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA EN CUÑA



Orientations	
ID	Dip / Direction
1	77 / 357
1 m	77 / 056
2 m	84 / 332
3 m	24 / 230

Equal Area
 Lower Hemisphere
 15 Poles
 15 Entries

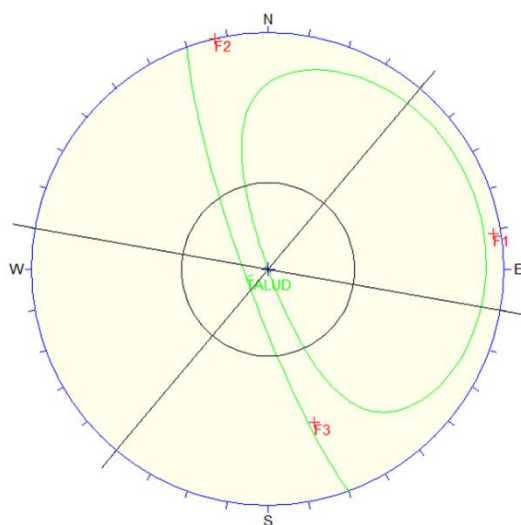
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA POR VUELCO DE ESTRATOS



Orientations	
ID	Dip / Direction
1	77 / 357
2	47 / 357
1 m	77 / 056
2 m	84 / 332
3 m	24 / 230

Equal Area
 Lower Hemisphere
 15 Poles
 15 Entries

ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 3
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA PLANAR

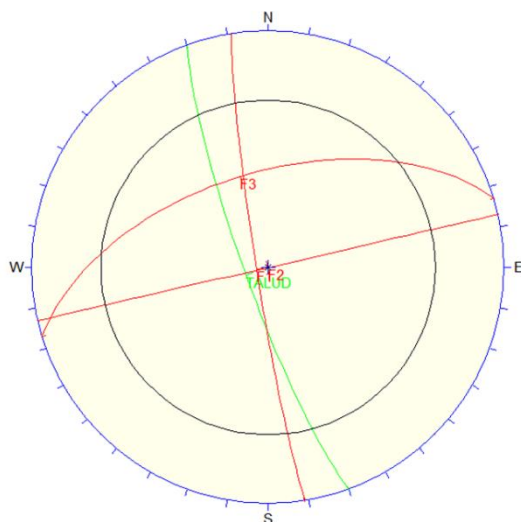


Orientations

ID	Dip / Direction
1	82 / 250
1 m	86 / 261
2 m	90 / 167
3 m	57 / 343

Equal Area
 Lower Hemisphere
 13 Poles
 13 Entries

ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA EN CUÑA

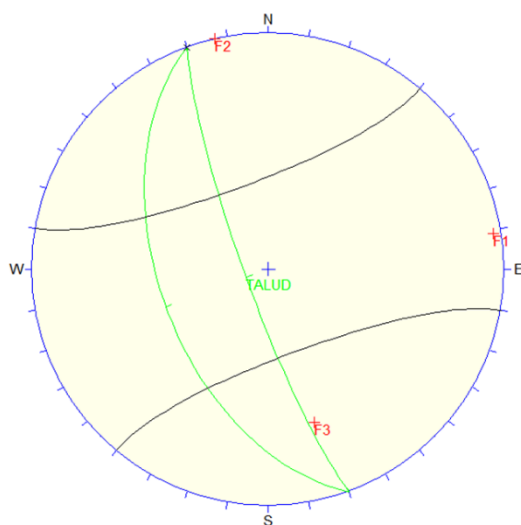


Orientations

ID	Dip / Direction
1	82 / 250
1 m	86 / 261
2 m	90 / 167
3 m	57 / 343

Equal Area
 Lower Hemisphere
 13 Poles
 13 Entries

ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA POR VUELCO DE ESTRATOS

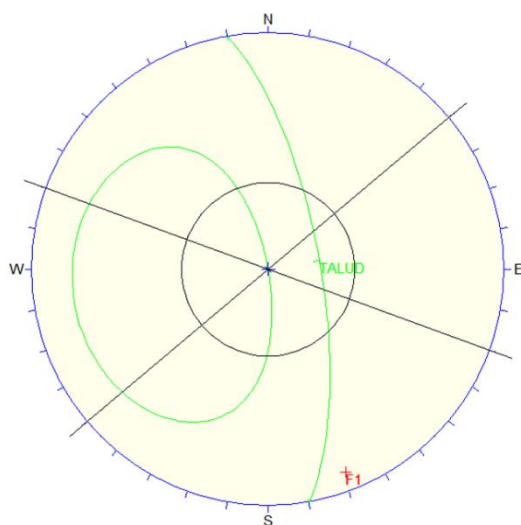


Orientations

ID	Dip / Direction
1	82 / 250
2	52 / 250
1 m	86 / 261
2 m	90 / 167
3 m	57 / 343

Equal Area
 Lower Hemisphere
 13 Poles
 13 Entries

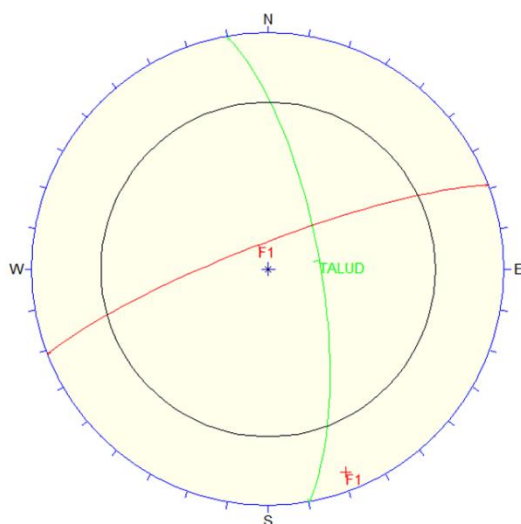
ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 4
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA PLANAR



Orientations	
ID	Dip / Direction
1	72 / 080
1 m	81 / 339
1 w	81 / 339

Equal Area
Lower Hemisphere
11 Poles
11 Entries

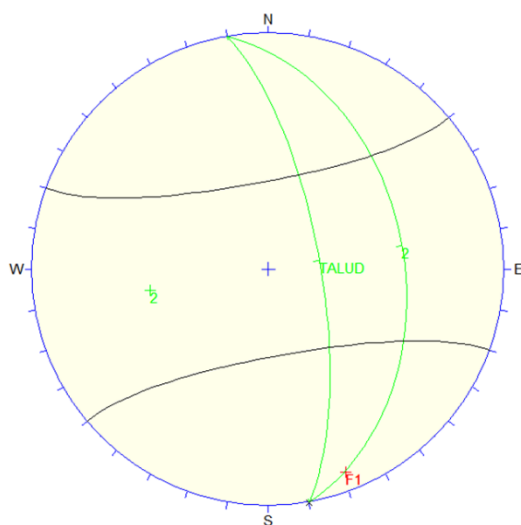
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA EN CUÑA



Orientations	
ID	Dip / Direction
1	72 / 080
1 m	81 / 339
1 w	81 / 339

Equal Area
Lower Hemisphere
11 Poles
11 Entries

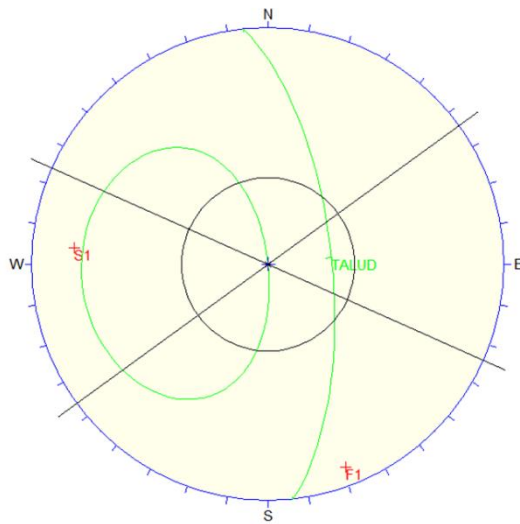
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA POR VUELCO DE ESTRATOS



Orientations	
ID	Dip / Direction
1	72 / 080
2	42 / 080
1 m	81 / 339
1 w	81 / 339

Equal Area
Lower Hemisphere
11 Poles
11 Entries

ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 5
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA PLANAR

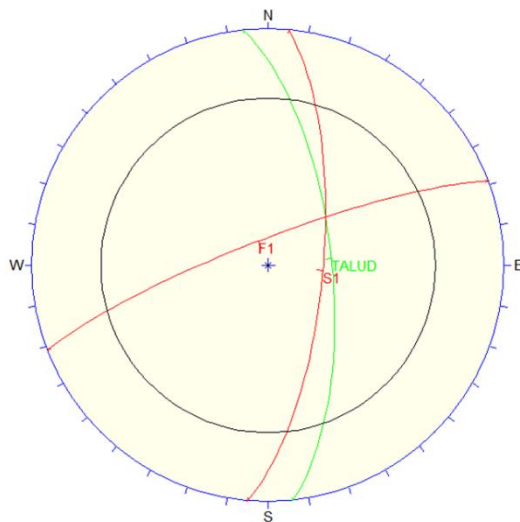


Orientations

ID	Dip / Direction
1	68 / 084
1 m	81 / 339
2 m	71 / 095

Equal Area
 Lower Hemisphere
 11 Poles
 11 Entries

ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA EN CUÑA

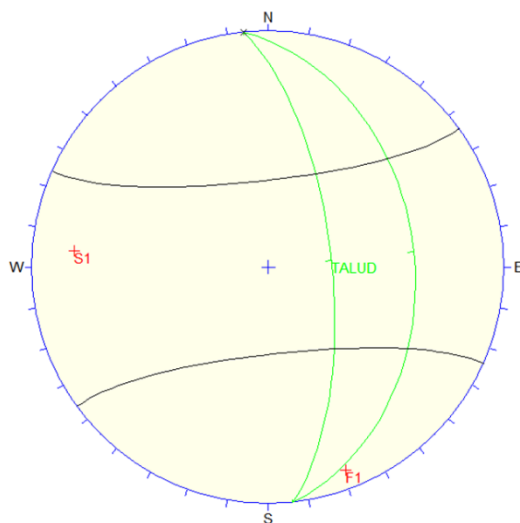


Orientations

ID	Dip / Direction
1	68 / 084
1 m	81 / 339
2 m	71 / 095

Equal Area
 Lower Hemisphere
 11 Poles
 11 Entries

ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA POR VUELCO DE ESTRATOS

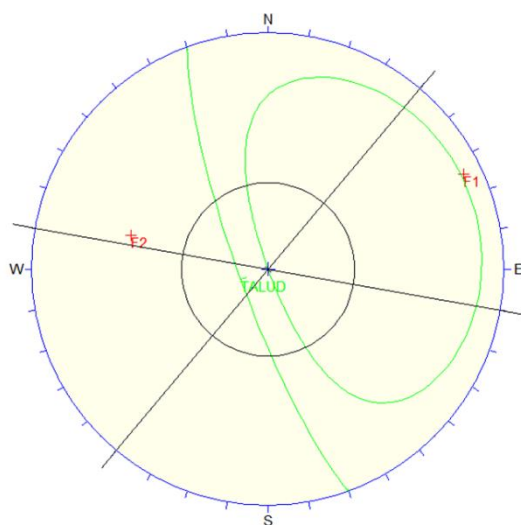


Orientations

ID	Dip / Direction
1	68 / 084
2	38 / 084
1 m	81 / 339
2 m	71 / 095

Equal Area
 Lower Hemisphere
 11 Poles
 11 Entries

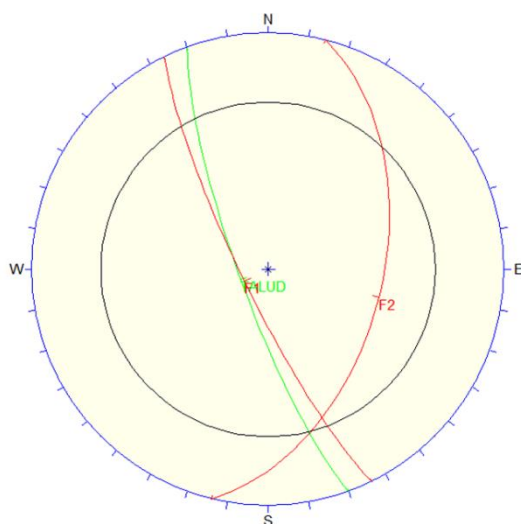
ESTACIÓN GEOMECÁNICA N° 6
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA PLANAR



Orientations	
ID	Dip / Direction
1	80 / 250
1 m	81 / 244
2 m	50 / 104

Equal Area
 Lower Hemisphere
 7 Poles
 7 Entries

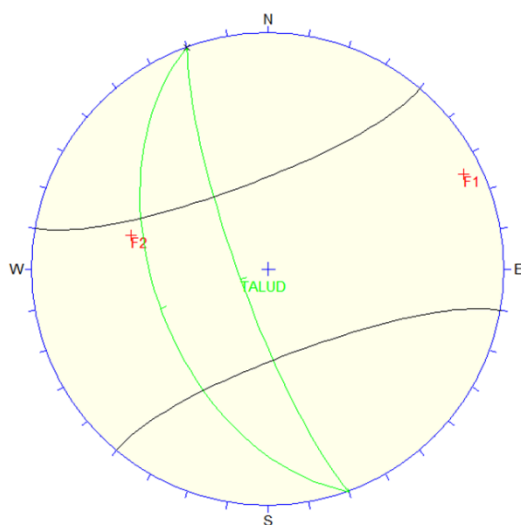
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA EN CUÑA



Orientations	
ID	Dip / Direction
1	80 / 250
1 m	81 / 244
2 m	50 / 104

Equal Area
 Lower Hemisphere
 7 Poles
 7 Entries

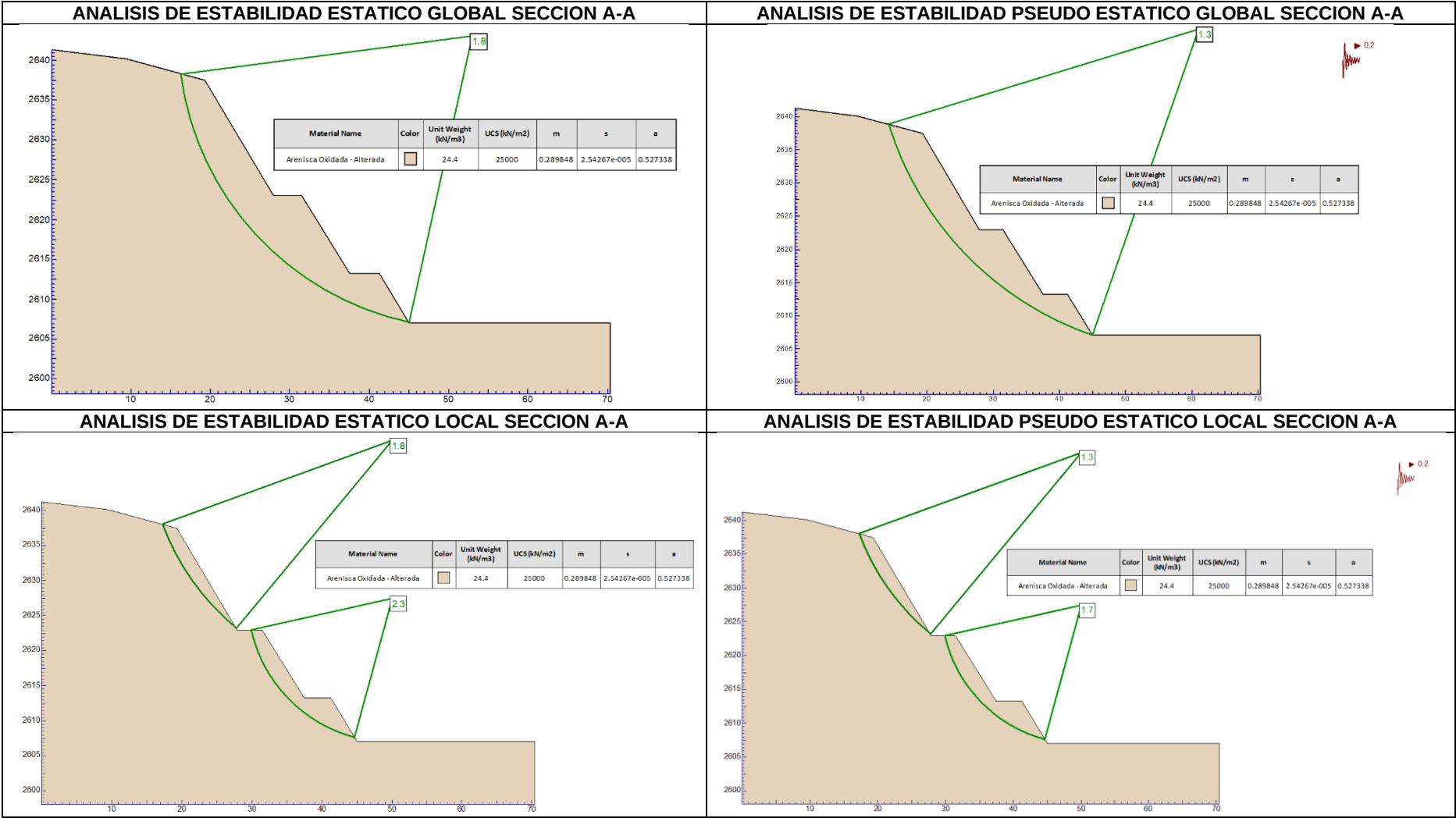
ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA POR VUELCO DE ESTRATOS



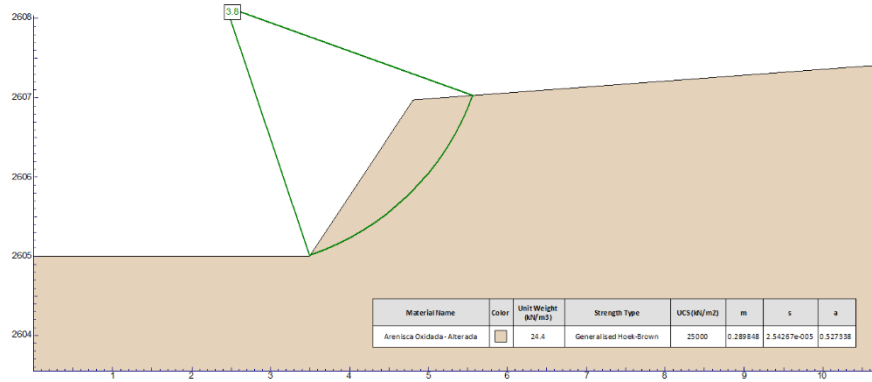
Orientations	
ID	Dip / Direction
1	80 / 250
2	50 / 250
1 m	81 / 244
2 m	50 / 104

Equal Area
 Lower Hemisphere
 7 Poles
 7 Entries

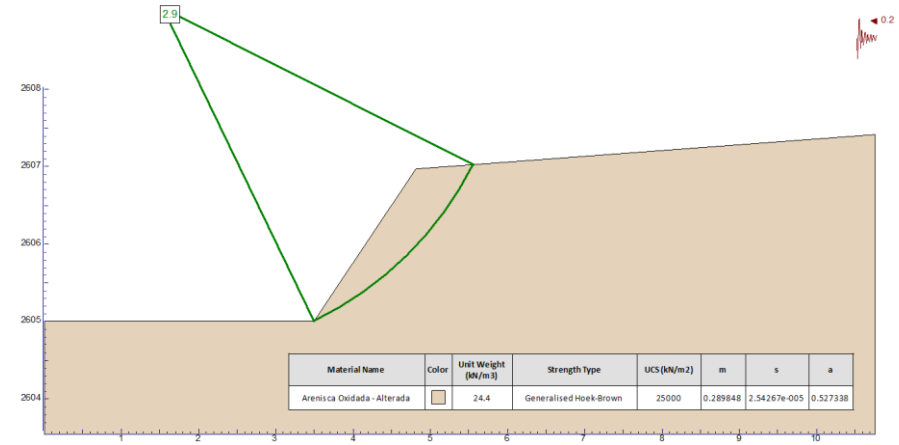
Anexo 6: Análisis de estabilidad global



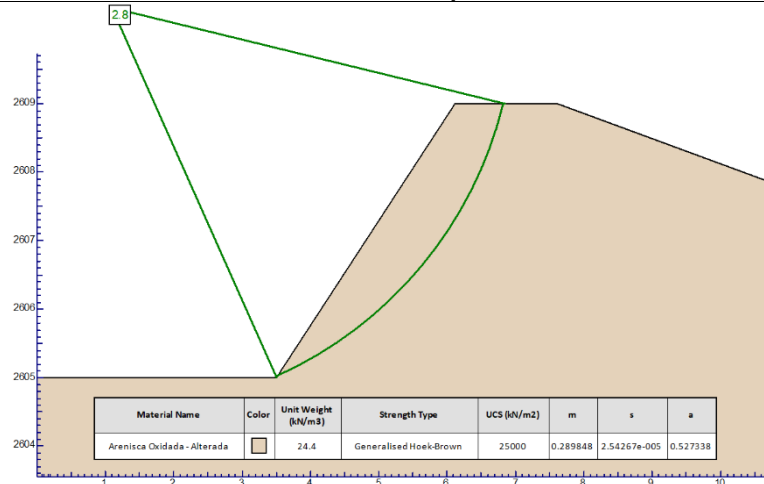
ANALISIS DE ESTABILIDAD ESTATICO GLOBAL SECCION B-B (LADO IZQUIERDO)



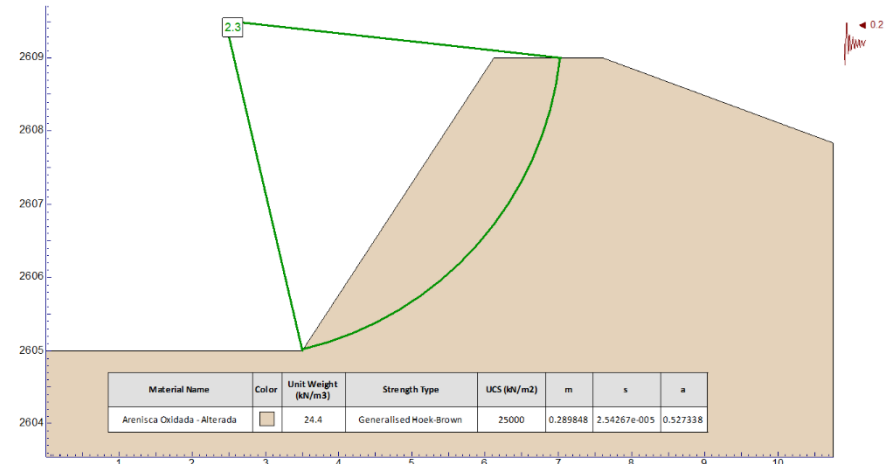
ANALISIS DE ESTABILIDAD PSEUDO - ESTATICO GLOBAL SECCION B-B (LADO IZQUIERDO)



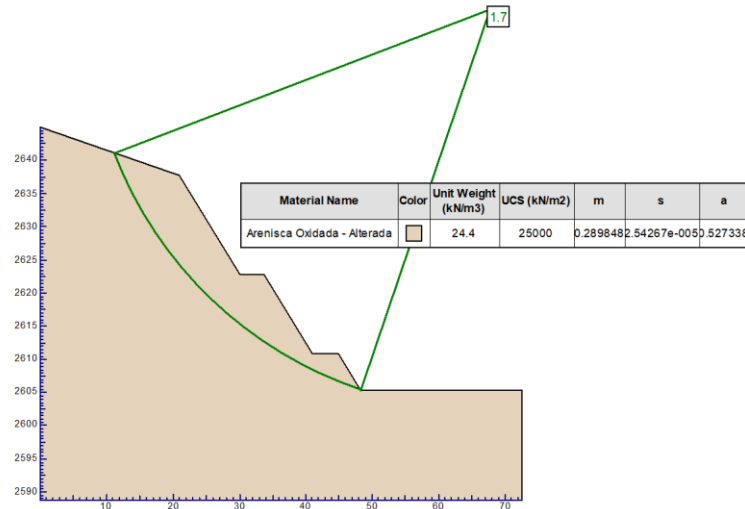
ANALISIS DE ESTABILIDAD ESTATICO GLOBAL SECCION B-B (LADO DERECHO)



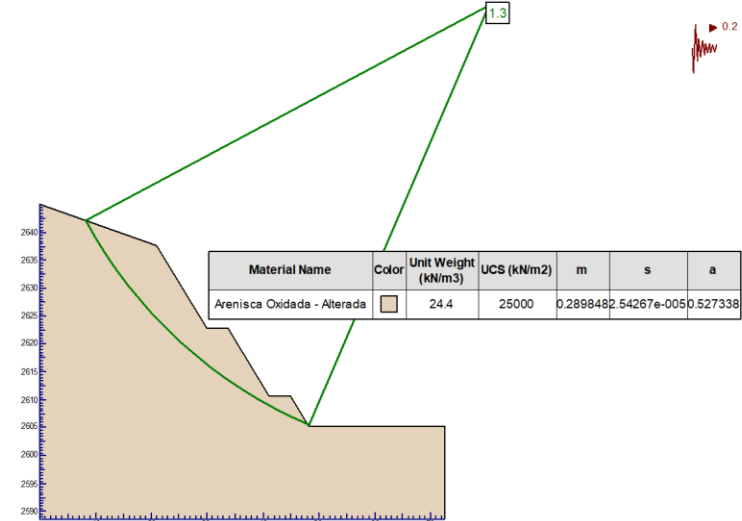
ANALISIS DE ESTABILIDAD PSEUDO - ESTATICO GLOBAL SECCION B-B (LADO DERECHO)



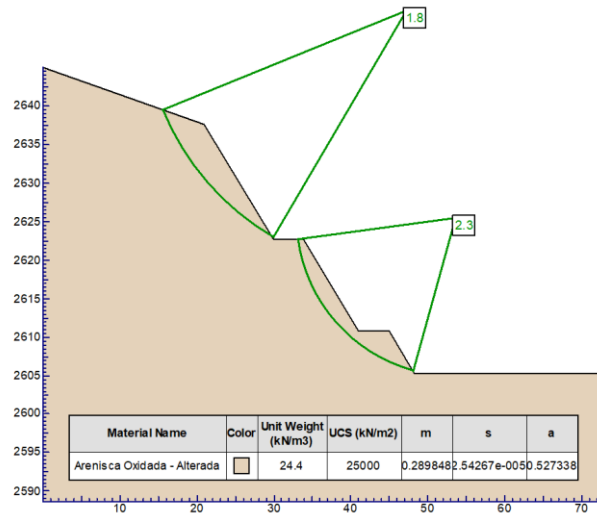
ANALISIS DE ESTABILIDAD ESTATICO GLOBAL SECCION C-C



ANALISIS DE ESTABILIDAD PSEUDO - ESTATICO GLOBAL SECCION C-C



ANALISIS DE ESTABILIDAD ESTATICO LOCAL SECCION C-C



ANALISIS DE ESTABILIDAD PSEUDO ESTATICO LOCAL SECCION C-C

