

Análisis retrospectivo y evaluación de la estabilidad del talud asociado al deslizamiento de Nangora, Loja, Ecuador: implicaciones geológicas y geotécnicas

Retrospective Analysis and Stability Assessment of the Slope Associated with the Nangora Landslide, Loja, Ecuador: Geological and Geotechnical Implications.

**Byron Antonio Bravo Granda¹, Pablo Javier Bravo Mejía²,
Angelica Gabriela León Peralta¹ Adán Saúl Abarca Abarca³**

- ¹. Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito – Ecuador
byron.bravo@geoenergia.gob.ec; angelica.leon@geoenergia.gob.ec
- ². Investigador independiente. Loja - Ecuador
pablijavi2013@gmail.com
- ³. Investigador independiente. Loja - Ecuador
adabasaul1@gmail.com

ISSN: 2661-6998



Fecha de recepción: : 08-05-2026

Fecha de aceptación: 31-08-2026

Resumen

La vía Loja–Malacatos presenta una recurrencia de deslizamientos que compromete la estabilidad de taludes y la conectividad vial. Este estudio desarrolla un análisis retrospectivo enfocado en examinar y comprender la dinámica, evolución histórica y factores detonantes del evento ocurrido en abril de 2025 en el sector Nangora. La evaluación se sustentó en la caracterización geomecánica y modelamiento analítico-numérico de estabilidad. Aunque el análisis cinemático indicó baja susceptibilidad a fallas estructurales (8,33 % planar y 4,03 % en cuña), los modelos por equilibrio límite evidenciaron que el comportamiento del talud está controlado por la anisotropía del macizo rocoso (RMR=58,2; GSI=47). Los modelos isotrópicos sobreestimaron la estabilidad (FS>1,2), mientras que las funciones anisotrópicas (ASF) reprodujeron condiciones críticas (FS=0,96 estático y FS=0,64 pseudoestático). Se concluye que las intervenciones previas mediante terraceo no mitigaron el control estructural y que el evento respondió a la degradación progresiva del macizo y a la saturación superficial, más que a una anomalía climática extraordinaria.

Abstract

The Loja–Malacatos road corridor exhibits recurring landslides that compromise slope stability and road connectivity. This study presents a retrospective analysis aimed at examining and understanding the dynamics, historical evolution, and triggering factors of the April 2025 event in the Nangora sector. The assessment was grounded in geomechanical characterization and analytical–numerical slope stability modeling. Although kinematic analysis indicated low susceptibility to structural failures (8.33 % planar and 4.03 % wedge), limit equilibrium models demonstrated that slope behavior is governed by rock mass anisotropy (RMR = 58.2; GSI = 47). Isotropic models overestimated stability (FS > 1.2), whereas anisotropic strength functions (ASF) reproduced critical conditions (FS = 0.96 static and FS = 0.64 pseudo-static). It is concluded that previous terracing interventions failed to mitigate the structural control, and that the event was driven by the progressive degradation of the rock mass and surficial saturation, rather than an extraordinary climatic anomaly.

Palabras clave: Geotecnia, Inestabilidad, Ladera, Susceptibilidad, Talud.

Keywords: Geotechnics, Hillslope, Instability, Slope, Susceptibility.

1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa constituyen uno de los principales procesos geodinámicos que afectan la estabilidad de laderas y taludes, especialmente en regiones montañosas con alta susceptibilidad geomorfológica y condiciones climáticas favorables para su ocurrencia [1], [2], [3], [4].

En Ecuador, estos fenómenos representan una amenaza recurrente para la infraestructura vial y las poblaciones asentadas en zonas de pendiente, particularmente en la región andina, donde la combinación entre relieve abrupto, precipitaciones intensas y materiales meteorizados favorece procesos de inestabilidad.

La vía Loja-Malacatos (E35) constituye uno de los principales corredores de conectividad del sur del Ecuador y atraviesa sectores caracterizados por pendientes pronunciadas y condiciones geomorfológicas favorables para la ocurrencia de movimientos en masa. En varios tramos de este corredor vial se ha registrado eventos recurrentes de inestabilidad que afectan la transitabilidad y seguridad vial. La cartografía temática de amenaza por movimientos en masa elaborada por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos clasifica varios sectores de esta vía dentro de categorías de amenaza alta y muy alta, incluyendo el sector Nangora (Fig. 1)

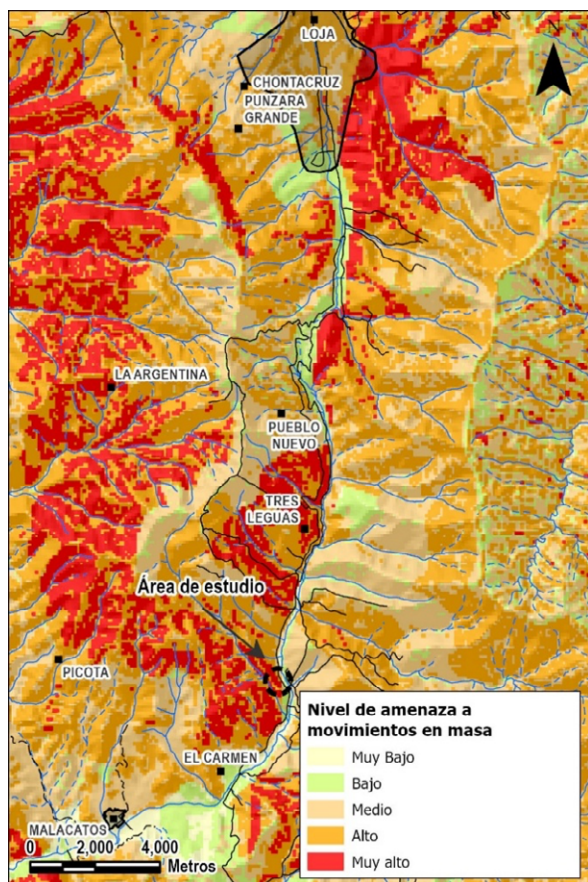


Figura 1: Nivel de amenaza por movimientos en masa en la vía Loja-Malacatos. Elaborado a partir de [5].

El sector Nangora localizado en la parroquia Malacatos del cantón Loja, (Fig. 2), ha presentado recurrencia histórica de procesos de inestabilidad que afectan directamente la vía Loja-Malacatos.

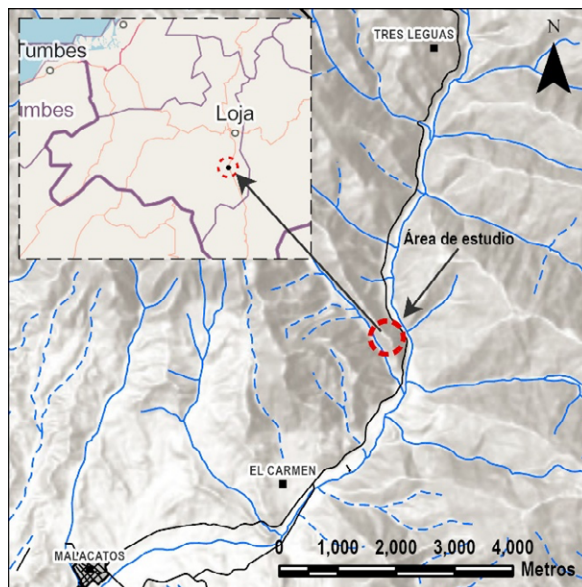


Figura 2: Ubicación de la zona de estudio (UTM 698679/9540317).

En el año 2022 se registraron eventos de deslizamiento que motivaron la intervención del ex Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), ejecutando trabajos de desalojo aproximado de 4 000 m³ de material y conformación de terrazas (bermas) [6].

Posteriormente, en el mes de febrero de 2025, se generaron nuevas afectaciones sobre esta vía. De acuerdo con reportes de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SGR), el 28 de febrero de 2025 ocurrió un deslizamiento que afectó aproximadamente 30 m de calzada [7], [8]. Durante abril de 2025, el proceso presentó una evolución progresiva caracterizada por caída recurrente de material y restricciones parciales al tránsito vehicular [9].

A pesar de la recurrencia de eventos en el sector y de la elevada susceptibilidad identificada regionalmente, los estudios e intervenciones desarrollados se han enfocado principalmente en medidas reactivas, existiendo limitada integración entre análisis geomorfológico, caracterización geológica y evaluación geotécnica aplicada a la comprensión de los mecanismos que controlan la inestabilidad del talud.

En este contexto, el presente estudio desarrolla un análisis retrospectivo del deslizamiento ocurrido en abril de 2025 en el sector Nangora, con el propósito de reconstruir los antecedentes y evolución del evento, evaluar las condiciones geológicas y geotécnicas del talud, y analizar los factores que controlaron la inestabilidad mediante la integración de información de campo, morfometría y análisis de estabilidad.

2. METODOLOGÍA

Esta investigación combina un enfoque documental, de campo y analítico para evaluar las causas y consecuencias del evento ocurrido. La metodología se organiza en tres fases principales:

- a) **Recopilación de información:** se realizó la revisión de reportes técnicos institucionales, cartografía temática, estudios geológicos regionales, información geofísica disponible y antecedentes históricos de eventos de inestabilidad del área de estudio.
- b) **Fase de campo:** con el fin de caracterizar la geometría y extensión del deslizamiento, se realizó levantamiento aerofotogramétrico mediante dron para la obtención de ortomosaicos y modelos digitales de superficie procesados en Pix4D [10].

El levantamiento geológico-geomecánico, incluyó descripción litológica, medición de discontinuidades y la clasificación geomecánica en cada una de las estaciones geomecánicas (EG) establecidas en los respectivos puntos de control geológico (PC).

- c) **Fase de gabinete:** a partir de la integración de información geológica, estructural y geomecánica, se elabora un modelo geológico-geotécnico del talud para definir el perfil crítico (sentido O-E) de análisis y las unidades geotécnicas (UG) representativas. El análisis de estabilidad se desarrolló mediante el siguiente esquema:

La resistencia al corte de discontinuidades, se determinó con el criterio Barton-Bandis [11] y criterios de [12] y [13] para JRC, JCS, tensión normal efectiva y ángulo de fricción básica.

La estabilidad empírica del talud fue evaluada mediante el SMR [14] con el software SMRTool [15] y los criterios de clasificación de [16] y [17].

La rotura planar, falla en cuña y volcamiento, se estimó con el análisis cinemático de la relación geométrica entre la orientación de las discontinuidades y la geometría del talud [18] [19]. Se analizaron también fallas circulares y no circulares, donde el comportamiento mecánico del macizo puede aproximarse al de un suelo por su elevado grado de fracturamiento [20] y [21].

El análisis de estabilidad se ejecutó en el software Slide V8.0 [22], con métodos de equilibrio límite (LE) según su geomecánica y el tipo de superficie de falla. Los métodos de Bishop simplificado [23] y Spencer [24] se aplicaron en escenarios isotrópicos con superficies circulares y parámetros equivalentes Mohr-Coulomb, mientras que Janbu

corregido [25] y Morgenstern-Price [26] se utilizaron en macizos anisótropos y superficies de falla no circulares. Además, se incorporaron funciones anisotrópicas (ASF) según Jaeger [27], con parámetros del criterio Barton-Bandis.

El cálculo de los coeficientes sísmicos se estimó conforme a la NEC-15 [28].

3. ANTECEDENTES DEL EVENTO

En 2022, se registraron eventos de inestabilidad que afectaron la vía Loja-Malacatos, motivando la intervención del ex Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO). Como medida de estabilización se realizó el desalojo de aproximadamente 4 000 m³ de material y la conformación de terrazas (bermas) en el talud [6] (Ver Fig. 3). A finales de febrero de 2025, durante precipitaciones intensas se generaron deslizamientos parciales y afectaciones sobre la vía.



Figura 3: Vista en planta del área de estudio sobre fotografía aérea con fecha 03-04-2024 [29]. Se delimita el área de afectación previa mediante una línea amarilla y el área asociada al evento actual mediante una línea roja continua.

De acuerdo con reportes de la SNGR, el 28 de febrero de 2025 ocurrió un deslizamiento que afectó aproximadamente 30 m de la calzada [7], [8], y continuaron las primeras semanas de abril de 2025, registrando una intensificación del proceso, caracterizada por grietas de tracción en la parte superior del talud, caída recurrente de material y restricciones parciales al tránsito vehicular [9].

Finalmente, el 26 de abril de 2025 ocurrió el deslizamiento de mayor magnitud, provocando el bloqueo total de la vía Loja-Malacatos [30]. A mitad

del mes de julio finalizaron los trabajos de estabilización mediante la conformación de 5 terrazas (bermas) [31].

4. ESTUDIOS PREEXISTENTES

Previo al evento, se ejecutó la prospección geofísica en el talud mediante Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) a lo largo de una línea de 195,0 m de longitud.

El perfil de inversión obtenido (Fig. 4) devela tres horizontes principales: i) horizonte superficial (0-5m), presenta resistividades ($> 4\ 000\ \Omega.m$) dispuestas en bloques, asociadas a un material eluvial-coluvial de baja cohesión; ii) horizonte intermedio (5-10m), con resistividades moderadamente altas, interpretadas como roca con intenso fracturamiento; y iii) anomalías de baja resistividad (valores mínimos en la escala) que denotan zonas con alto grado de saturación hídrica.

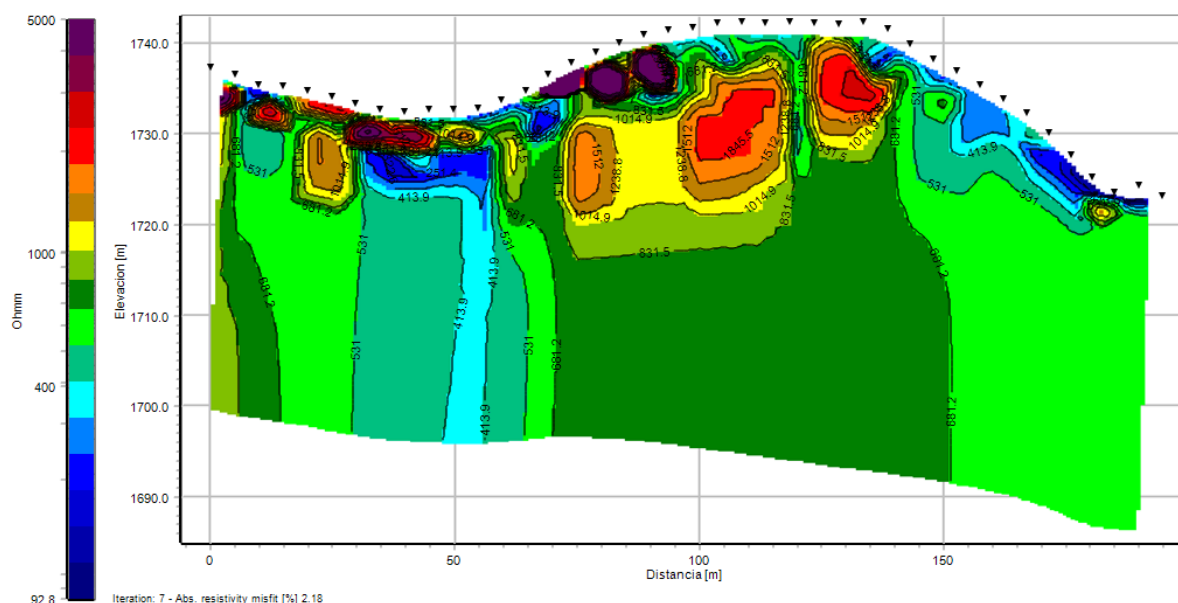


Figura 4: Modelo de resistividad calculada por inversión con escala vertical ampliada [32].

En la Fig. 5 se ilustra la ubicación espacial y la extensión A-B (195.0 m) de la línea de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) desplegada sobre el área del deslizamiento, la cual sirvió de base para la generación del perfil de inversión geofísica.



Figura 5: Ubicación en planta y extensión A-B de la línea de prospección TRE en el talud afectado.

5. CONTEXTO GEOLÓGICO

5.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El deslizamiento se ubica al límite norte de la cuenca sedimentaria Malacatos-Vilcabamba [33], sobre la Unidad Chiquinda de la serie no diferenciada Zamora (Fig.6), aflorando cuarcitas y filitas en las laderas y drenajes de la vía Loja-Malacatos [34].

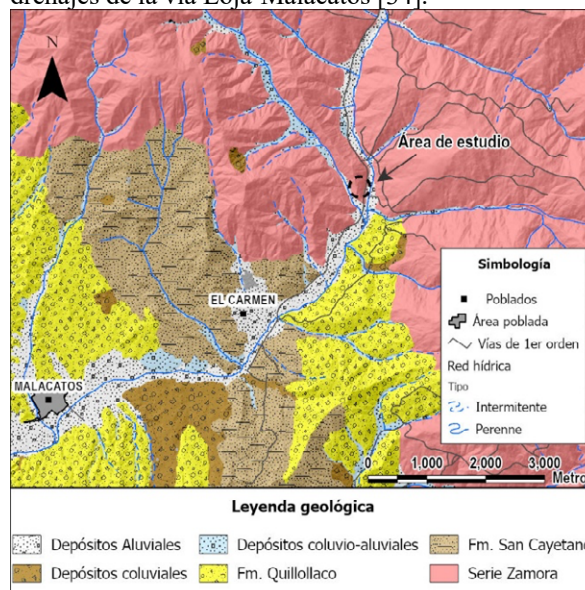


Figura 6: Geología Malacatos-Nangora. Elaborado de [35] y [36].

5.2. GEOLOGÍA LOCAL

La litología corresponde a filitas negras a gris oscuras, textura foliada de grano fino a muy fino, constituidas por minerales micáceos y marcada fisilidad. Existe variación del grado de meteorización y fracturamiento, manteniendo una estructura planar característica de la foliación. En los PC-1, PC-4 y PC-5 se evidencia meteorización avanzada, desintegración laminar y elevada fisilidad (Fig. 7).

El PC-2 presenta un clivaje de crenulación incipiente, por otro lado, el PC-3 muestra una roca más competente y sana, con buzamientos subverticales (80°) y plegamientos suaves.

En conjunto, el talud está compuesto por filita en facies de bajo grado, con evidencias de deformación dúctil a frágil-dúctil y transición progresiva del grado de meteorización hacia los extremos.

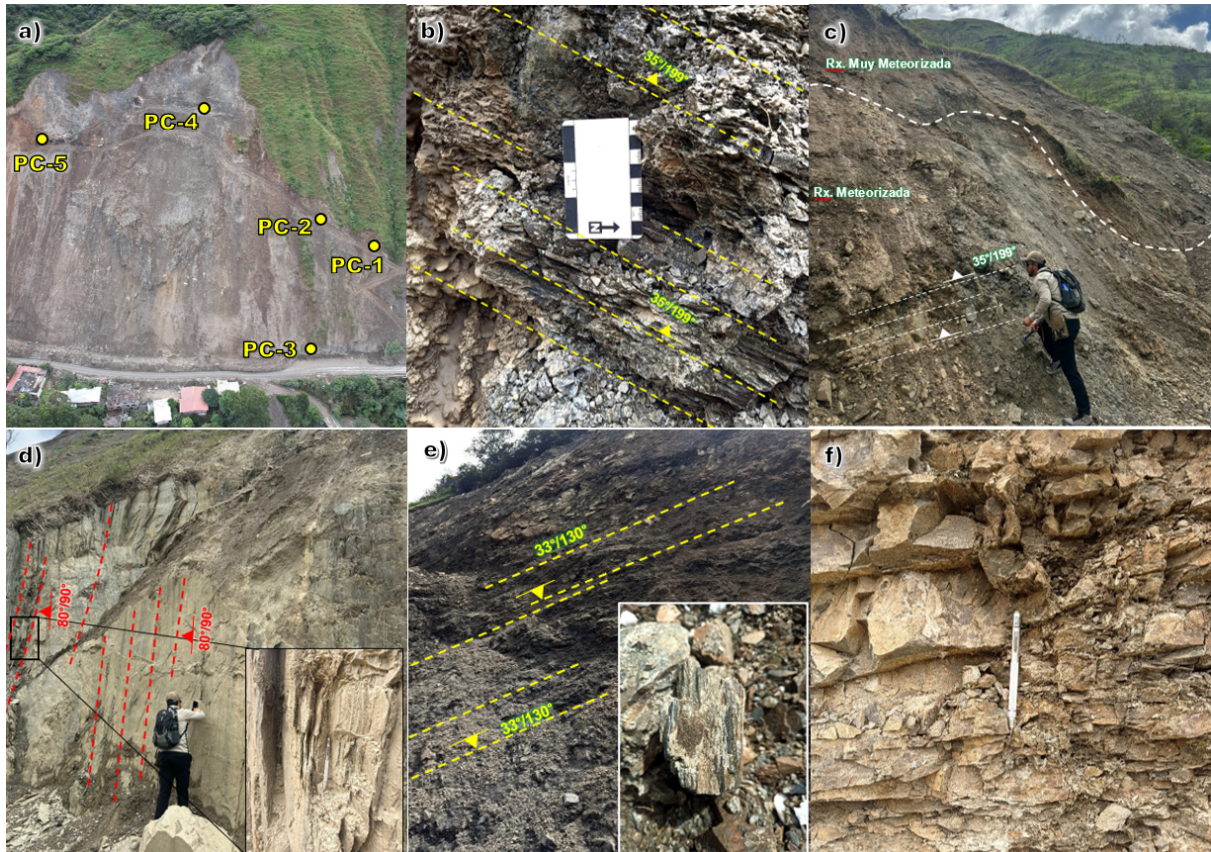


Figura 7: a) Ubicación de puntos de control en perspectiva suroeste del deslizamiento, b) PC-1. Flanco derecho del deslizamiento (UTM 698497 / 9537192), c) PC-2. Flanco derecho del deslizamiento (UTM 698514 / 9537223), d) PC-3. Pie de ladera (UTM 698554 / 9537210), e) PC-4. Berma superior (UTM 698479 / 9537171), f) PC-5. Flanco izquierdo (UTM 698436 / 9537057).

5.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área de estudio está influenciada por sistemas de fallas que delimitan el sector norte de la cuenca sedimentaria Malacatos-Vilcabamba, según [37] con direcciones dominantes N-S, NW-SE y NE-SW. Como se observa en la Fig. 8 estas estructuras definen límites de cuenca y contactos entre unidades geológicas.

El talud estudiado, presenta un macizo rocoso aparentemente condicionado por fallamientos al este y oeste, destacándose la falla Nangora (Q. Nangora) y la falla Loja con aparente influencia tectónica, evidenciada en variaciones de la orientación de los planos de foliación. Debido al grado de meteorización y limitaciones de acceso, su caracterización es parcial; sin embargo, en algunos cortes de talud se ha logrado medir la dirección y el buzamiento de estas estructuras.

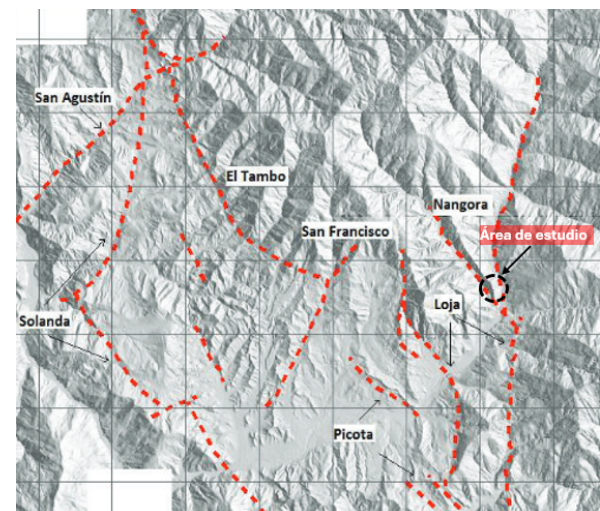


Figura 8: Fallas geológicas al norte de la cuenca Malacatos-Vilcabamba. Tomado de [37].

6. CONTEXTO GEOTÉCNICO

6.1. CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS

La caracterización geomecánica se realizó en cada punto de control geológico (PC) mediante los índices RMR de Bieniawski [38], RQD estimado mediante la correlación de Palmström [39], estimación visual de

resistencia a compresión uniaxial según criterios ISRM [40], y el índice GSI (Geological Strength Index) [41]. En la Tabla 1 se aprecia el resumen de la clasificación geomecánica en cada EG.

Tabla 1: Clasificación del macizo rocoso del área de estudio según el método RMR de Bieniawski

RMR Bieniawski		EG-1		EG-2		EG-3		EG-4		EG-5	
Parámetro		Valor	Punt.	Valor	Punt.	Valor	Punt.	Valor	Punt.	Valor	Punt.
UCS (Mpa)	R ₁	35	4	35	4	70	7	25	4	35	4
RQD (%)	R ₂	75.4	17	82	17	88.6	17	72.1	13	75.4	17
Espaciamiento (m)	R ₃	0.15	8	0.25	10	0.6	15	0.2	10	0.2	10
Longitud (m)	R ₄	1.20	5	0.80	6	5.00	4	2.00	5	0.60	6
Abertura (mm)		5.00	4	6.00	1	2.00	4	6.00	1	5.00	4
Rugosidad		Lig. Rug.	3	Lig. Rug.	3	Rug.	5	Lig. Rug.	3	Lig. Rug.	3
Relleno		Rell. bl. <5mm	2	Rell. bl. >5mm	0	Sin rell.	6	Rell. bl. >5mm	0	Rell. bl. <5mm	2
Alteración		Mod. alt.	3	Muy alt.	1	Lig. alt.	5	Mod. alt.	3	Lig. alt.	5
Agua subt.	R ₅	Húmedo	10	Húmedo	10	Húmedo	10	Húmedo	10	Húmedo	10
RMR= R ₁ +R ₂ +R ₃ +R ₄ +R ₅		RMR=	56	RMR=	52	RMR=	73	RMR=	49	RMR=	61
		GSI ₁ =	40	GSI ₂ =	36	GSI ₃ =	60	GSI ₄ =	30	GSI ₅ =	39
										X _{RMR} =	58.2
										X _{GSI} =	41

Para la caracterización estructural del macizo rocoso, se empleó la técnica de levantamiento por líneas de escaneo (*scan-line surveying technique*) en las EG establecidas. Los datos estructurales obtenidos fueron utilizados en la evaluación geomecánica del sitio.

Posteriormente, mediante el uso del software Dips 7.0 [42], se realizó la proyección estereográfica de la orientación y el buzamiento de las juntas, con el fin de identificar la tendencia principal de los sets estructurales (Fig. 9).

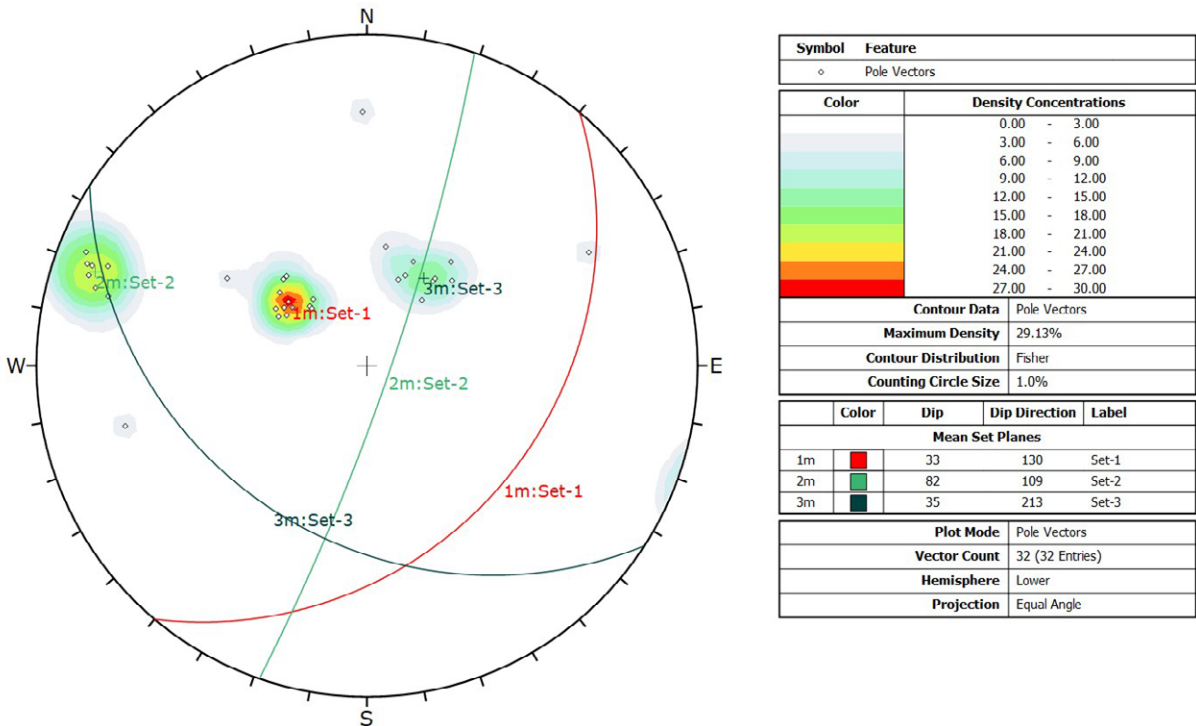


Figura 9: Tendencia de los principales sets de juntas expuestos en el talud.

7. MORFOMETRÍA Y MECANISMO DE FALLA

La geometría del talud del deslizamiento se basó en técnicas de levantamiento aerofotogramétrico. La morfometría, vista en planta y en perspectiva del talud se detallan en las Fig. 10 y 11, así como en la Tabla 3.



Figura 10: Morfometría del talud del deslizamiento-vista en planta.

Tabla 3: Morfometría del talud del deslizamiento

Parámetro	Medida
Área de afectada (ha)	2,5
Ancho máximo (m)	256
Ancho en sus flancos (m)	190
Longitud del movimiento (m)	120
Pendiente (°)	50 - 60
Desnivel del talud (m)	140
Altura de talud de deslizamiento (m)	106

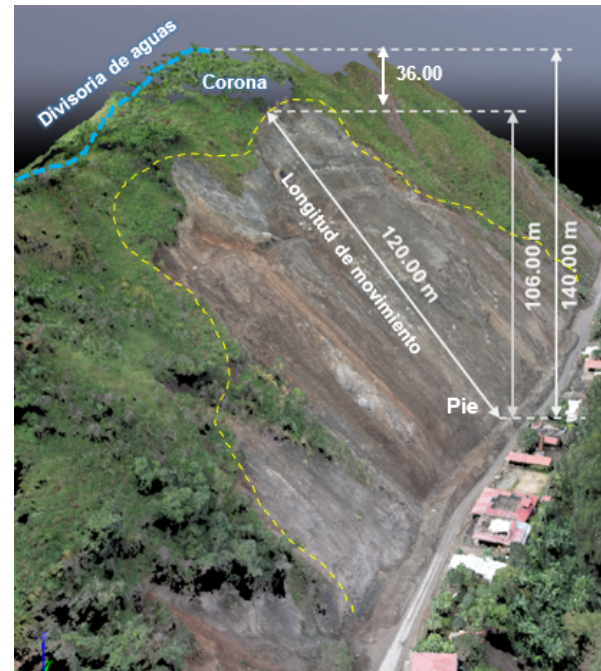


Figura 11: Morfometría del talud del deslizamiento-perspectiva noroeste.

El mecanismo de falla es de tipo complejo; iniciando como un deslizamiento traslacional con un mecanismo de falla planar sobre un sustrato competente fracturado, evolucionando con desprendimientos y caídas de rocas.

8. RESULTADOS

La integración geológica, estructural, geomecánica y la prospección geofísica permitió idealizar el modelo geológico-geotécnico del talud para definir el perfil A-A' (Fig.12).

La TRE resultó determinante para estimar profundidades de contacto de los diferentes materiales, permitiendo definir con precisión las unidades geotécnicas (UG) del modelo.

Como se aprecia en la Fig. 13, el perfil comprende cuatro UG: la UG1, un depósito remanente no cohesivo eluvial-coluvial con parámetros tomados de la base estándar de GEO5 [43]; la UG2, capa de roca filita meteorizada fracturada, la UG3, capa de roca fracturada de mayor competencia; y la UG4, se le asignaron propiedades propias de roca intacta.

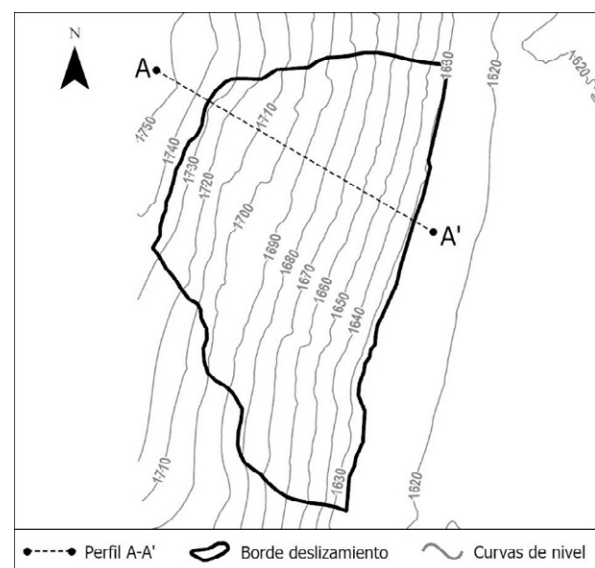


Figura 12: Vista en planta. Perfil geológico-geotécnico

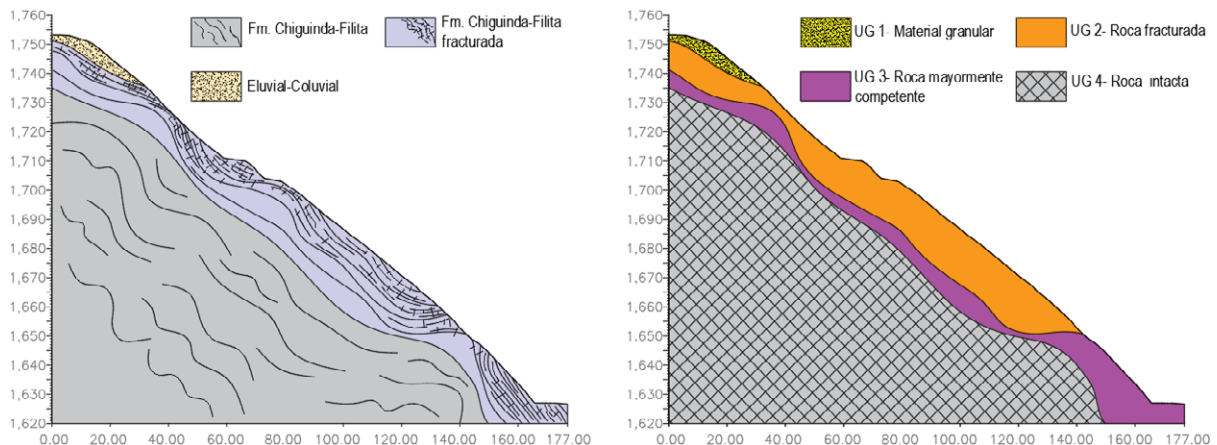


Figura 13: Modelo geológico-geotécnico. Izquierda. - perfil geológico idealizado. Derecha. - unidades geotécnicas definidas.

8.1. CRITERIO DE FALLA E ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI)

El índice de resistencia de la roca (GSI) se detallan en la Tabla 2 y Fig. 14.

Tabla 2: Valores calculados de GSI según valor RMR

Est. Geom	RMR	GSI *	GSI **	GSI ***
EG-1	56	40	51	45
EG-2	52	36	47	50
EG-3	73	60	68	50
EG-4	49	30	42	44
EG-5	61	39	56	47
X total		41	53	47

*GSI tomado en campo, **GSI según ecuación de [46], ***GSI según ecuación de [47].

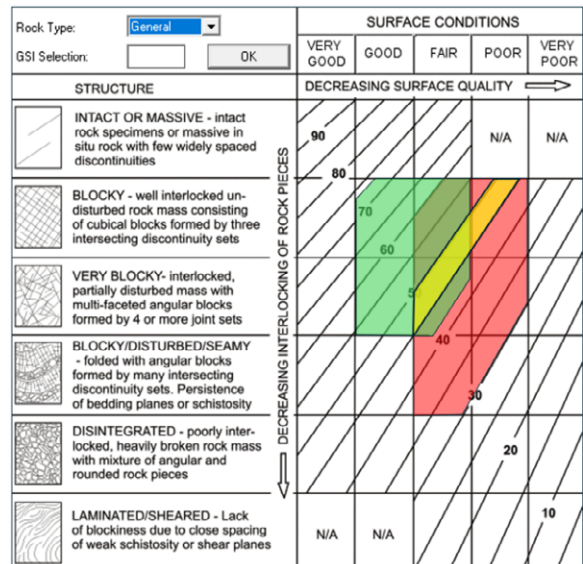


Figura 14: GSI de campo en rojo, verde GSI según [46] y en amarillo GSI según [47].

La resistencia al corte del macizo fracturado (UG2 y UG3) se estimó con el criterio no lineal de Hoek-Brown [44] y el efecto de escala [45], utilizando el GSI y las correlaciones de [46], [47]. Las envolventes de falla no lineales HB y su equivalente lineal MC (Fig. 15) se obtuvieron con el software RocData [48]. Para la UG4, se utilizaron directamente las propiedades HB de roca intacta ($\sigma_{ci} = 175$ MPa, $m_i = 7$, $GSI=80$ y $D=0,7$).

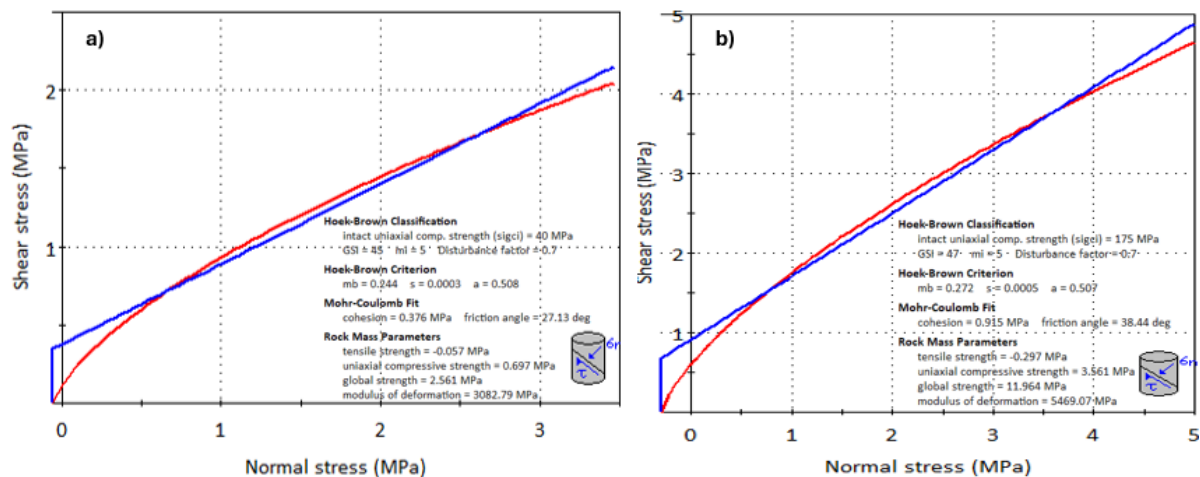


Figura 15: Ajuste del criterio Hoek-Brown (línea roja) y envolvente equivalente de Mohr-Coulomb (línea azul): (a) parámetros para la UG2 y (b) parámetros para la UG3.

En la Tabla 4 se resumen los parámetros JRC, JCS, fricción básica (ϕ_b), altura del talud (H) y peso específico (γ) procesados con el software RocData (Fig. 16). La estimación de ángulos de fricción pico y residual en la Tabla 5.

Tabla 4: Parámetros de entrada para calcular la resistencia al corte de las juntas según criterio BB.

Parámetros de entrada	Valor
Tensión normal, σ_n	2.835 MPa
Peso específico, γ	27.00 kN/m ³
Altura de talud, H	105.00 m
Ángulo de fricción básica	27.50°

Para este estudio se adoptó $\phi_b = 27,5^\circ$, y se considera que, el ángulo de fricción residual de las juntas no contribuye a la resistencia al corte, por lo tanto, $\phi_r = \phi_b = 27,5^\circ$.

Tabla 5: Estimación de ángulos de fricción pico y residual.

Junta	JCS (Mpa)	JRC	Ángulo de fricción pico, ϕ_p	Ángulo de fricción residual, ϕ_r
Set#1	75	7	37,46°	27,5°
Se#2	175	9	43,61°	27,5°
Se#3	75	7	37,46°	27,5°

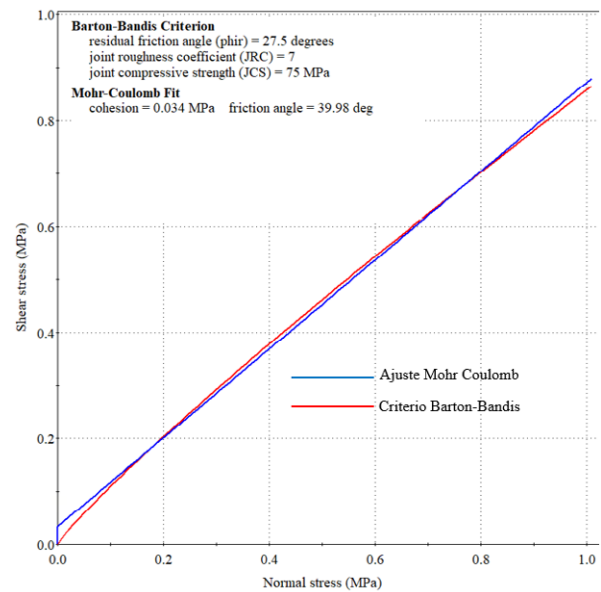


Figura 16: Resistencia al corte de las discontinuidades para el set#1 y set#3 según criterio Barton-Bandis (BB). Parámetros MC en línea azul y en color rojo criterio según BB.

8.2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POR DIFERENTES MÉTODOS

8.2.1. ANÁLISIS EMPÍRICO

Los resultados de la clasificación SMR, se presentan en la Tabla 6. Para el análisis se consideró un RMR básico promedio de 58,2 y un método de excavación mecánico ($F4 = 0$).

El Set#1 presenta posibilidad de rotura planar; de acuerdo con los cálculos del SMR continuo, en contraste, el valor de SMR discreto clasifica este mismo set como parcialmente estable.

Los Set#2 y Set#3 presentan condiciones parcialmente estables, caracterizados por fracturamiento moderado y numerosos bloques.

Respecto al análisis de rotura por cuña, se identificó potencial de falla en las intersecciones Set#1–Set#3 y Set#2–Set#3, aunque el comportamiento global del macizo se mantiene como parcialmente estable.

Tabla 6: Resultados del sistema de clasificación geomecánica SMR de Romana para el talud rocoso en estudio

Tabla 1. Resultados de la simulación de la estabilidad de las cuñas de la zona de estudio.												
	Conjunto	Ángulos auxiliares			Factor de ajuste				SMR		Condición de estabilidad	Modo de falla
		A	B	C	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	Discr.	Conti.		
Planar	Set#1	25,00	33,00	-27,00	0,4	0,7	-60	0	41	40	Parcialmente estable	Algunas fracturas o muchas cuñas
	Set#2	4,00	82,00	22,00	1,0	1,0	0	0	57	56		
	Set#3	72,00	35,00	95,00	0,15	1,0	0	0	57	57		
Cuña	Set#1 - Set#2	88,05	14,26	74,26	0,15	1,0	0	0	57	57	Parcialmente estable	Algunas fracturas o muchas cuñas
	Set#1 - Set#3	64,06	26,76	-33,24	1,15	0,4	-60	0	54	53		
	Set#2 - Set#3	88,67	33,45	-26,5	0,15	0,7	-60	0	51	51		

Para la rotura planar (Fig. 17), se consideró el ángulo de fricción más bajo (Tabla 5), estimado mediante el criterio Barton-Bandis; el análisis indica una probabilidad de falla del 8,33 % asociada al set #1, con 12 planos dentro de la envolvente de falla.

En contraste, la rotura en cuña, generada ente los sets #1 y #3 (Fig. 18), presenta una probabilidad de falla del 4,03 %, con 20 intersecciones que cumplen las condiciones cinemáticas.

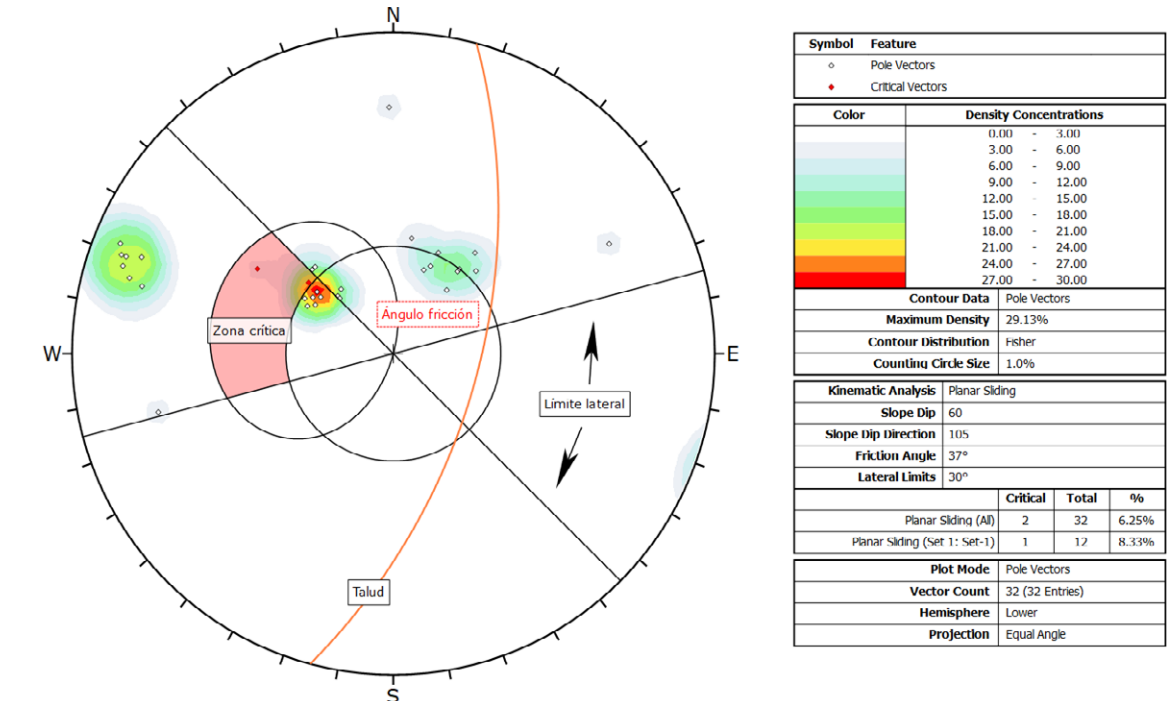


Figura 17: Proyección estereográfica de análisis para falla planar.

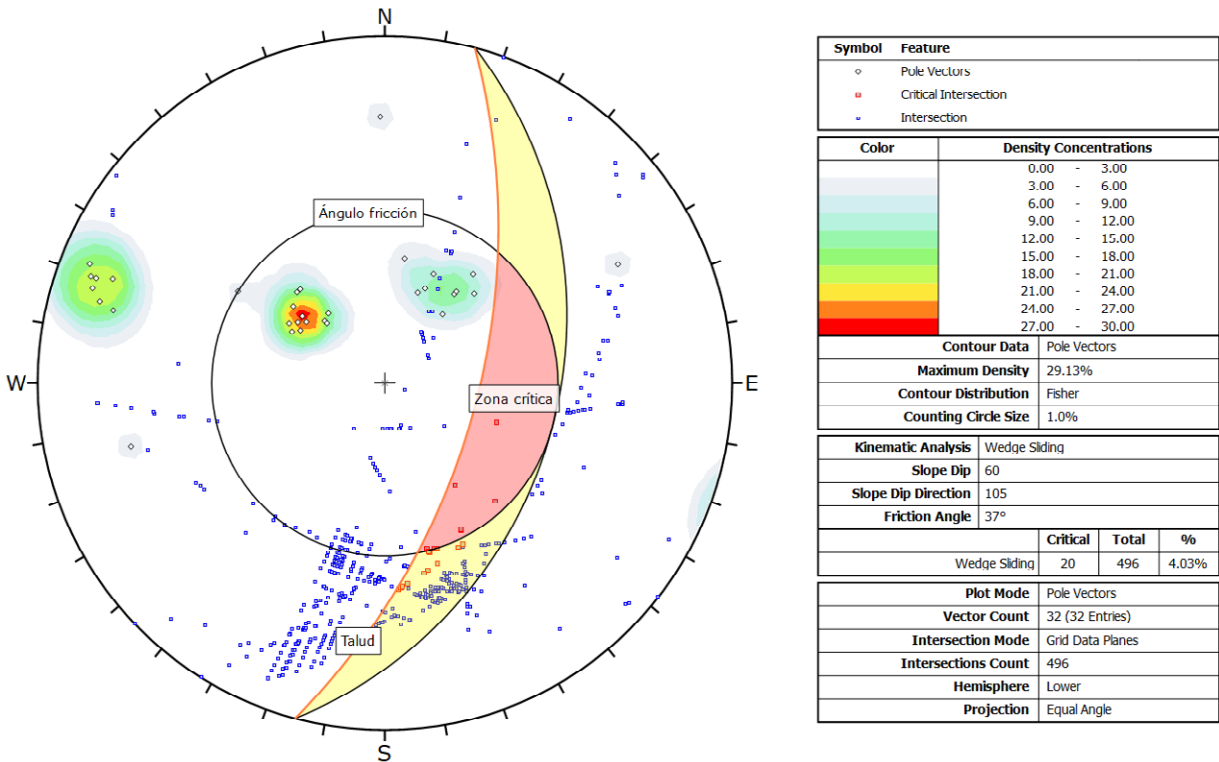


Figura 18: Proyección estereográfica de análisis para falla por cuña.

En el caso del volcamiento, se identifica en el pie del talud, donde la interacción entre sets favorece la formación de bloques potencialmente inestables.

La proyección estereográfica (Fig. 19) indica una probabilidad de volcamiento de 0,4 %,

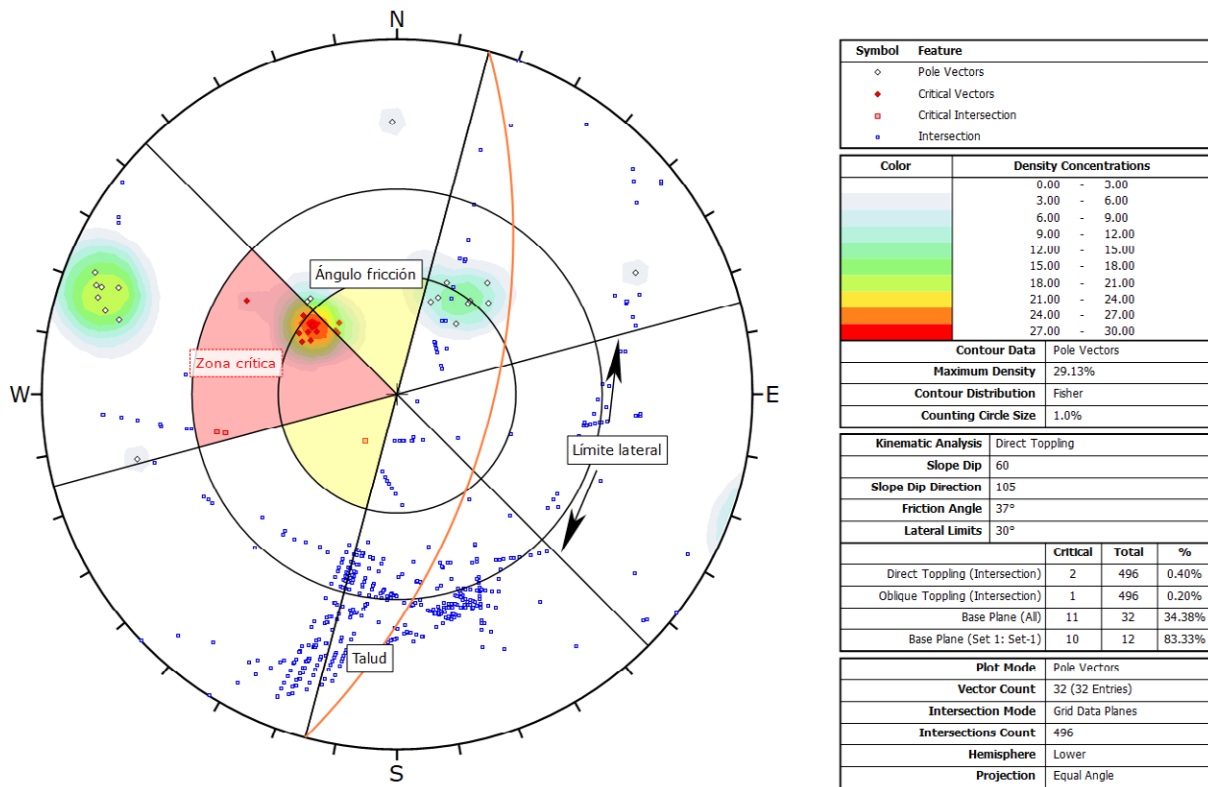


Figura 19: Proyección estereográfica de análisis para falla por volcamiento.

8.2.3. ANÁLISIS POR FALLAS CIRCULARES Y NO CIRCULARES

En la Tabla 7 y la Fig. 20 se presentan los resultados del análisis de estabilidad del talud en estado natural bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, considerando diferentes métodos de equilibrio límite y

tipos de superficie de falla. Por otro lado, la Tabla 8 y la Fig. 21 muestran los resultados obtenidos para el talud modificado.

Tabla 7: Factores de seguridad FS por diferentes métodos de análisis y tipos de falla para geometría original del talud

Método de análisis	Bishop simplificado	Spencer	Jambu corregido	Mongestern-Price	Jambu corregido			Mongestern-Price
Tipo de falla	Circular		Circular		No circular			
Tipo de material	MC*		HB**		HB**	ASF**	HB**	ASF**
FS estático	0,759	0,757	1,724	1,687	1,495	0,955	1,507	0,962
FS pseudoestático	0,504	0,504	1,156	1,139	1,083	0,633	1,089	0,647

*Mohr-Coulomb, ** Hoek-Brown, ***Anisotropic function

Tabla 8: Factores de seguridad FS por diferentes métodos de análisis y tipos de falla para geometría modificada del talud

Método de análisis	Bishop simplificado	Spencer	Jambu corregido	Mongestern-Price	Jambu corregido			Mongestern-Price
Tipo de falla	Circular		Circular		No circular			
Tipo de material	MC*		HB**		HB**	ASF**	HB**	ASF**
FS estático	0,759	0,757	1,836	1,800	1,729	0,967	1,720	0,965
FS pseudoestático	0,504	0,504	1,233	1,215	1,143	0,645	1,156	0,644

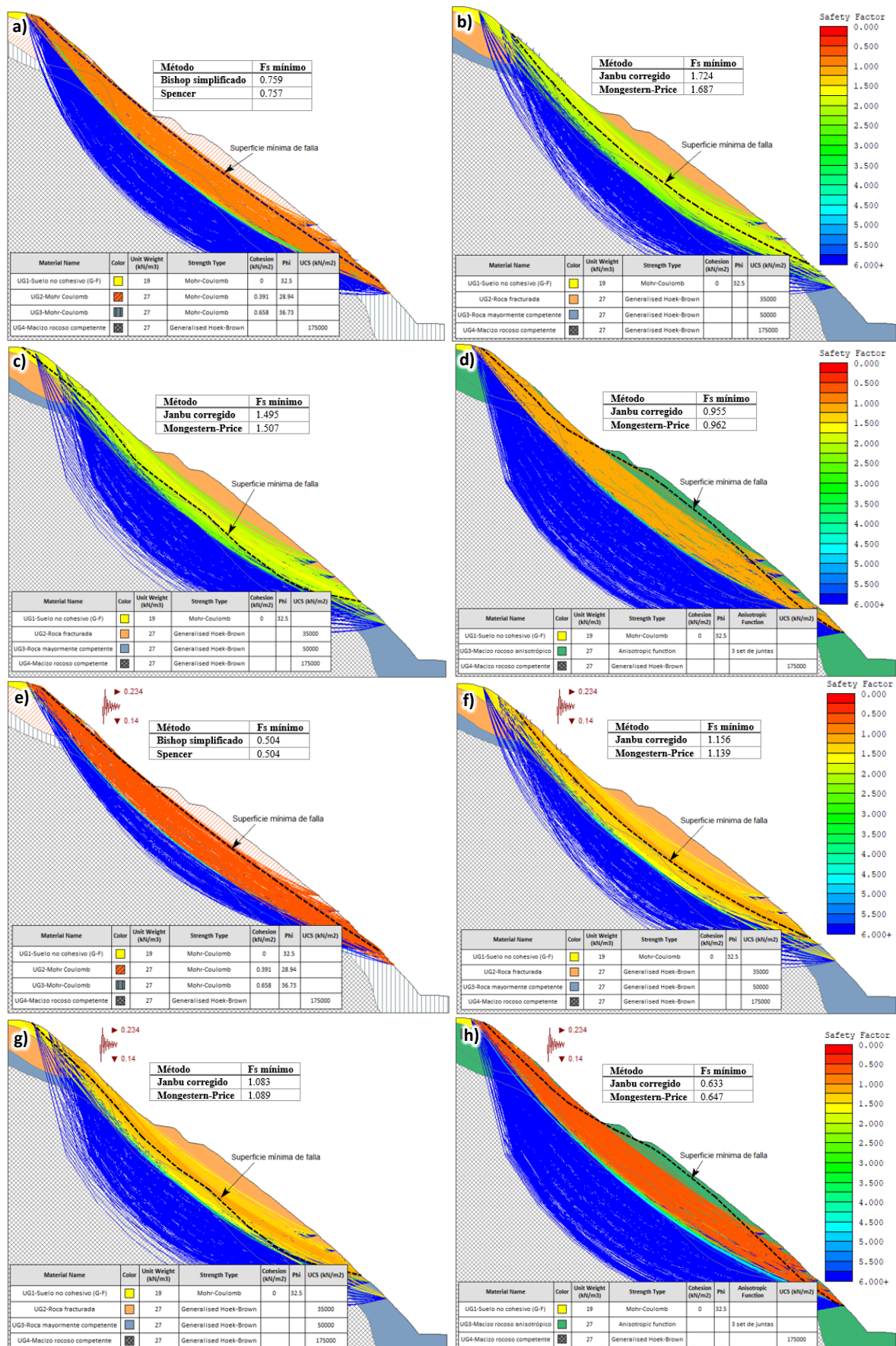
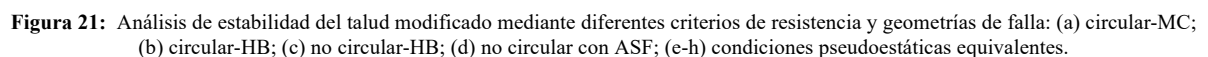


Figura 20: Análisis de estabilidad del talud natural mediante diferentes criterios de resistencia y geometrías de falla: (a) circular-MC; (b) circular-HB; (c) no circular-HB; (d) no circular con ASF; (e-h) condiciones pseudoestáticas equivalentes.



9. DISCUSIÓN

El análisis retrospectivo del deslizamiento de Nangora tuvo como finalidad examinar y aprender de la dinámica del movimiento en masa complejo de la zona. La interpretación de las evidencias de campo devela el evento como un mecanismo de deslizamiento traslacional con un patrón de falla planar, donde materiales eluvio-coluviales de baja cohesión se movilizó sobre un sustrato rocoso fracturado de filitas con planos desfavorables al talud, evolucionando con procesos secundarios de caída de rocas.

Las causas responden a la interacción de factores condicionantes como la litología con un grado avanzado de meteorización. Asimismo, pendientes superiores a 50°, incrementan los esfuerzos cortantes dentro de la masa potencialmente inestable.

Por otro lado, factores detonantes como precipitaciones intensas previas al evento, habría favorecido la saturación progresiva del depósito remanente. No obstante, como se aprecia en la Fig. 22 y 23, el análisis comparativo de la NASA POWER demuestra que la precipitación acumulada previa al evento (114,5 mm) fue sustancialmente inferior al máximo histórico anual registrado (197,5 mm). Esto confirma que el movimiento no requirió de una anomalía hidrometeorológica extrema, en su lugar, se reactivó debido a una condición preexistente: la presencia de grietas de tracción visibles desde el año 2024 (Fig. 3) y la saturación progresiva de los materiales superficiales remanentes.

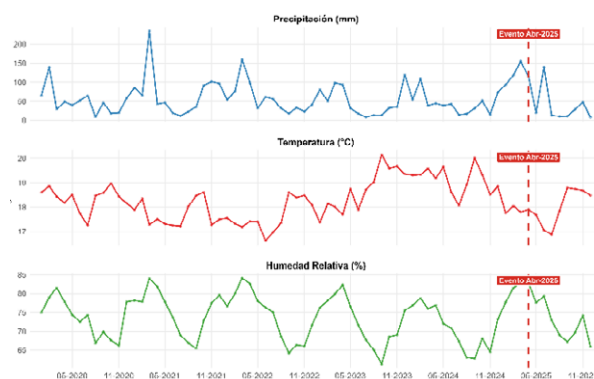


Figura 22: Evolución temporal de precipitación, temperatura y humedad relativa (2020-2026), la línea roja entrecortada representa la fecha del evento. Elaborado a partir de [49].

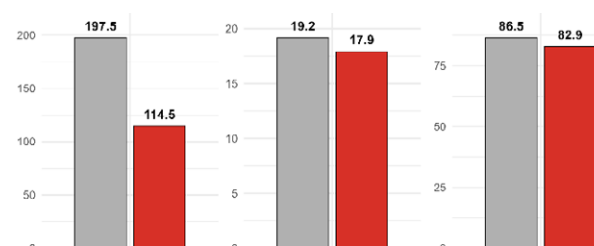


Figura 23: Análisis comparativo de variables climáticas: abril 2025 vs. máximos históricos (1996-2025); Gris: Máx. histórico | Rojo: abril 2025. Elaborado a partir de [49].

El proceso de inestabilidad se mantuvo activo a pesar de los trabajos de terraceo (bermas) ejecutados con anterioridad al evento de 2025. Al respecto, el análisis multitemporal de imágenes aéreas de 2024 (Fig. 3) evidencia que dichas obras constituyeron soluciones parciales; persistiendo en la parte superior del talud acumulaciones de material coluvial suelto y grietas de tracción activas. Esta condición de deformación progresiva se confirmó posteriormente en la ortofoto del 8 de junio de 2025 (Fig. 24), la cual confirma la inestabilidad latente.



Figura 24: Vista en planta, grieta de tracción visible en ortofoto con fecha 08-06-2025.

Los resultados del análisis geomecánico (RMR=58,2; GSI promedio=47) posicionan al macizo rocoso en una categoría de calidad media a pobre, caracterizada por intenso fracturamiento y meteorización avanzada de la roca. La proyección estereográfica confirma que la estabilidad está controlada estructuralmente por un sistema de juntas principal (Set-1: 33/130), cuya intersección con pendientes entre 50° y 60° genera condiciones cinemáticas desfavorables al talud.

Finalmente, los resultados numéricos validan las limitaciones severas de las obras civiles reactivas ejecutadas en la vía Loja-Malacatos. Las bermas y terrazas conformadas por el ex MTOP en el año 2022 actuaron exclusivamente como una reducción geométrica temporal de la pendiente superficial, pero resultaron conceptualmente insuficientes al no controlar las condiciones que gobiernan el mecanismo de falla como la anisotropía de la roca (fracturamiento), intemperismo, y sobre carga de material no cohesivo.

Por el contrario, la incorporación de funciones anisotrópicas (ASF) devela la verdadera condición de inestabilidad latente, reduciendo el factor de seguridad a un valor crítico de 0,64 ante aceleraciones sísmicas. Este valor reduce los límites mínimos de seguridad exigidos por la NEC ($FS \geq 1,25$ para condiciones

temporales y $FS \geq 1,50$ permanentes), confirmando la urgente necesidad de migrar de la modificación geométrica del talud y remoción de material suelto, hacia diseños de ingeniería preventiva.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1. CONCLUSIONES

Las intervenciones previas de estabilización mediante terrazo (bermas) mostraron efectividad limitada debido a que no incorporaron explícitamente el control estructural del macizo rocoso. Estas medidas actuaron principalmente como soluciones superficiales, sin abordar los mecanismos de inestabilidad asociados a la anisotropía estructural y a la degradación progresiva de la resistencia al corte a lo largo de los planos de foliación.

Los resultados obtenidos indican que la inestabilidad del talud en el sector Nangora está fuertemente condicionada por la anisotropía estructural del macizo rocoso. La integración de análisis cinemáticos y modelamiento numérico evidencia que la orientación de la foliación principal (Set-1: 33/130) respecto a la orientación del talud (50° - 60°) generó condiciones cinemáticamente favorables para el desarrollo del deslizamiento.

Como demuestra la modelación en Slide V8.0, el uso de modelos constitutivos isotrópicos estándar (Mohr-Coulomb o Hoek-Brown) sobreestima gravemente la estabilidad del talud ($FS > 1,2$).

En contraste, la incorporación de funciones anisotrópicas (ASF) permitió reproducir condiciones de estabilidad más consistentes con la ocurrencia del evento, obteniéndose un $FS = 0,64$ bajo condiciones sísmicas. Este resultado evidencia que el talud se encuentra en una condición de estabilidad crítica ($FS < 1,0$), lo que denota un estado de inestabilidad latente susceptible de reactivarse y generar nuevos movimientos en masa bajo los mecanismos de ruptura modelados.

La evidencia documental, fotográfica y multitemporal recopilada evidencia la presencia de deformaciones progresivas previas al evento de abril de 2025, lo que sugiere un proceso evolutivo de inestabilidad desarrollado de manera progresiva. Estos resultados resaltan la importancia de incorporar monitoreo geotécnico e instrumentación permanente.

10.2. RECOMENDACIONES

Para futuros diseños de estabilización en el sector Nangora y en zonas con condiciones geológicas y geotécnicas similares, resulta recomendable incorporar modelos numéricos que consideren comportamiento anisotrópico del macizo rocoso mediante funciones anisotrópicas (ASF), complementados con análisis

cinemáticos detallados. Los resultados obtenidos evidencian que los enfoques isotrópicos convencionales pueden subestimar la influencia estructural en la estabilidad del talud.

Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de implementar un sistema de monitoreo geotécnico permanente, que permita establecer umbrales de alerta temprana ante procesos de deformación progresiva.

Asimismo, futuros diseños de estabilización deberían incorporar sistemas de drenaje superficial, incluyendo drenes transversales y subhorizontales, con el objetivo de reducir la infiltración.

De igual manera, las medidas de mitigación en el sector requieren priorizar soluciones de estabilización permanente sustentadas en análisis geológico-geotécnicos y modelos de estabilidad que incorporen control estructural y comportamiento anisotrópico del macizo rocoso. Entre las alternativas potenciales se incluyen sistemas de anclaje, estructuras de contención profunda y mallas de estabilización.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Marques y J. Lukiantchuki, "Evaluation of the stability of a highway slope through numerical modeling", *DYNA*, vol. 84, p. 121, mar. 2017, doi: 10.15446/dyna.v84n200.53850.
- [2] A. O. Oliva-González, A. F. Ruiz-Pozo, R. J. Gallardo-Amaya, y H. Y. Jaramillo, "Landslide risk assessment in slopes and hillsides. Methodology and application in a real case", *DYNA*, vol. 86, núm. 208, pp. 143–152, ene. 2019, doi: 10.15446/dyna.v86n208.72341.
- [3] O. Alonso-Pandavenes, F. J. Torrijo Echarri, y J. Garzón-Roca, "Sustainable Management of Landslides in Ecuador: Leveraging Geophysical Surveys for Effective Risk Reduction", *Sustainability*, vol. 16, núm. 24, 2024, doi: 10.3390/su162410797.
- [4] C. J. van Westen, T. W. J. van Asch, y R. Soeters, "Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult?", *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 65, núm. 2, pp. 167–184, 2006, doi: 10.1007/s10064-005-0023-0.
- [5] SGR, "Mapa temático Nivel de Amanaza por movimientos en masa en Ecuador continental", 2019. [\[link\]](#)
- [6] "MTOP concluyó la estabilización del talud en la vía Loja-Malacatos", *Crónica-Noticias al Día*. [\[link\]](#)
- [7] SNGR, "Informe de situación provincial Loja", Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, SitRep 08, mar. 2025. [\[link\]](#)
- [8] B. Manzaba, "Cierran vía E35 Loja - Malacatos por deslizamiento de gran magnitud", *Teleamazonas*. [\[link\]](#)

- [9] D. Crónica, “Alerta en Nangora: deslizamiento amenaza con colapsar la vía Loja – Malacatos”, DIARIO CRÓNICA. [\[link\]](#)
- [10] Pix4D SA, *Pix4Dmapper*. (2020). Pix4D SA, Lausanne, Switzerland. [\[link\]](#)
- [11] N. Barton y S. Bandis, *Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice*, vol. 182, 1990, doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)90682-C](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90682-C).
- [12] N. Barton y V. Choubey, “The shear strength of rock joints in theory and practice”, *Rock Mech.*, vol. 10, pp. 1–54, dic. 1977, doi: [10.1007/BF01261801](https://doi.org/10.1007/BF01261801).
- [13] Coulson J. H., “Shear strength of flat surfaces in rock”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, pp. 77–105, 1972, doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)92245-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)92245-1).
- [14] M. Romana, “New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes”, en *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works*, International Society of Rock Mechanics, Ed., Salzburg, 1985, pp. 49–53.
- [15] A. Riquelme, R. Tomás, y A. Abellán, “SMRTool beta. A calculator for determining Slope Mass Rating (SMR).” [\[link\]](#)
- [16] R. Tomás, J. Delgado, y J. B. Serón, “Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 44, núm. 7, pp. 1062–1069, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.02.004>.
- [17] M. Romana, “A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating”, en *Rock Testing and Site Characterization*, Pergamon, 1993, pp. 575–600. doi: [10.1016/B978-0-08-042066-0.50029-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042066-0.50029-X).
- [18] E. Hoek y J. W. Bray, *Rock Slope Engineering*, 3rd ed. London: The Institution of Mining and Metallurgy, 1981.
- [19] R. E. Goodman, *Introduction to Rock Mechanics*. Wiley, 1989. [\[link\]](#)
- [20] D. C. Wyllie y C. W. Mah, *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th ed. New York: Spon Press, 2004.
- [21] E. Eberhardt, D. Stead, y J. S. Coggan, “Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 41, núm. 1, pp. 69–87, 2004, doi: [10.1016/S1365-1609\(03\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00076-5).
- [22] Rocscience Inc, *Slide Version 8.0–2D limit equilibrium slope stability analysis*. (2018). Toronto, Ontario, Canada. [\[link\]](#)
- [23] A. W. Bishop, “The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes”, *Géotechnique*, vol. 5, núm. 1, pp. 7–17, mar. 1955, doi: [10.1680/geot.1955.5.1.7](https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7).
- [24] E. Spencer, “A Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces”, *Géotechnique*, vol. 17, núm. 1, pp. 11–26, mar. 1967, doi: [10.1680/geot.1967.17.1.11](https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11).
- [25] N. Janbu, “Slope Stability Computations”, en *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1, H. Singh, Ed., Bangkok: Asian Institute of Technology, 1968, pp. 47–86.
- [26] N. R. Morgenstern y V. E. Price, “The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces”, *Géotechnique*, vol. 15, núm. 1, pp. 79–93, mar. 1965, doi: [10.1680/geot.1965.15.1.79](https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79).
- [27] J. C. Jaeger, “Shear Failure of Anisotropic Rocks”, *Geol. Mag.*, vol. 97, núm. 1, pp. 65–72, 1960, doi: [10.1017/S0016756800061100](https://doi.org/10.1017/S0016756800061100).
- [28] NEC-SE-DS, *Cargas Sísmicas-Diseño sismo resistente*, 2014. [\[link\]](#)
- [29] Google, *Imagen satelital del sector Nangora, Loja–Malacatos, imagen obtenida de Google Earth Pro*. (2024). [\[link\]](#)
- [30] F. Inga, “Lluvias en Loja: deslizamiento en Nangora bloquea vías y afecta cultivos en Malacatos”, *Expreso*. [\[link\]](#)
- [31] B. Manzaba, “Habilitan dos carriles de la vía Loja - Malacatos desde este viernes 18 de julio del 2025”, *Teleamazonas*. [\[link\]](#)
- [32] Y. Flores, “Informe técnico prospección geofísica Nangora, cantón Loja”, Gobierno Provincial de Loja, Loja, Informe técnico Memorando N°: GPL-DR-2025-282-M, abr. 2025.
- [33] J. B. Kennerley, “Geology of Loja Province, Southern Ecuador”, Institute of Geological Sciences, Overseas Division, Report 23, 1973.
- [34] J. A. Aspden, S. H. Harrison, y C. C. Rundle, “New geochronological control for the tectono-magmatic evolution of the metamorphic basement, Cordillera Real and El Oro Province of Ecuador”, *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 6, núm. 1, pp. 77–96, jul. 1992, doi: [10.1016/0895-9811\(92\)90019-U](https://doi.org/10.1016/0895-9811(92)90019-U).
- [35] IEE, “Mosaico de forma del relieve 1:25 000”, 2019. [\[link\]](#)
- [36] J. V. Tamay, “Estructura de cuencas intramontañosas del sur de Ecuador en relación con la tectónica de la Cordillera de los Andes a partir de datos geofísicos y geológicos”, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 2018. [\[link\]](#)
- [37] B. E. Solís Alulima, “Sedimentología y Estratigrafía del Norte de la Cuenca Malacatos – Vilcabamba (Mioceno, Provincia de Loja – Sur de Ecuador)”, Tesis Doctoral, Quito, 2015. [\[link\]](#)
- [38] Z. T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. 1989. [\[link\]](#)
- [39] A. Palmström, “The volumetric joint count—A useful and simple measure of the degree of jointing”, presentado en IVth International

- Congress IAEG, New Delhi, India, 1982, pp. 221–228.
- [40] ISRM, “Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 16, núm. 2, pp. 135–140, abr. 1979, doi: 10.1016/0148-9062(79)90003-7.
 - [41] E. Hoek, P. Marinos, y M. Benissi, “Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation”, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 57, pp. 151–160, sep. 1998, doi: 10.1007/s100640050031.
 - [42] Rocscience Inc, *Dips Version 7.0-graphical and statistical analysis of orientation data*. (2018). Toronto, Ontario, Canada. [\[link\]](#)
 - [43] FINE Software, *GEO5 Material Database: Typical Soil Parameters*. (2020). FINE Software, Prague, Czech Republic. [\[link\]](#)
 - [44] E. Hoek, C. Carranza-Torres, y B. Corkum, “Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition”, *5th North Am. Rock Mech. Symp. 17th Tunneling Assoc. Can.*, pp. 267–271, 2002.
 - [45] E. Hoek, T. G. Carter, y M. S. Diederichs, “Quantification of the geological strength index chart”, presentado en 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, 2013, pp. 1757–1764.
 - [46] E. Hoek, P. Kaiser, y W. F. Bawden, “Support of Underground Excavation in Hard Rock”, ene. 1995, [\[link\]](#)
 - [47] H. Sonmez y R. Ulusay, “Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 36, núm. 6, pp. 743–760, sep. 1999, doi: 10.1016/S0148-9062(99)00043-1.
 - [48] Rocscience Inc, *RocData V 4.014*. (2013). Toronto, Ontario, Canada. [\[link\]](#)
 - [49] NASA POWER, “The NASA Prediction of Worldwide Energy Resources Project”. 2026. [\[link\]](#)