

INFORME TÉCNICO DEL ESTADO ACTUAL DEL MACIZO ROCOSO EN LA ZONA PERIGLACIAR DEL NEVADO VALLUNARAJU

Distrito de Independencia, provincia de Huaraz, departamento de Áncash.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Autores

Ing. Manuel Cosi Fajardo— Profesional en Geología y Geotecnia

Ing. Hilbert Villafane Gómez- Especialista en Hidrología

Ing. Juan de Dios Fernández Vega- Especialista en Geomática en Alta Montaña

Ing. Enver Melgarejo Romero – Profesional en Geomática Ing. Enver Melgarejo Romero - Especialista en Geomática de Alta Montaña

Colaboradores

Ing. Wilmer Tuñoque Zela - Profesional en Ingeniería Civil

Ing. Adriana Caballero Bedriñana - Especialista en Ingeniería Civil

Ing. Angel Salas Colca - Especialista en Geología

Revisores

Dra. Paola Moschella Miloslavich - Directora de la Dirección de Investigación en Glaciares

Ing. Juan Carlos Torres Lázaro - Subdirector de Riesgos Asociados a Glaciares

Editado por

© Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)

Dirección de Investigación en Glaciares

Subdirección de Riesgos Asociados a Glaciares

Sede central: Av. Centenario 2656 - Sector Palmira, Independencia, Huaraz - Áncash - Perú

Teléfono: (043) 643460

1ra edición

Setiembre 2026

Contenido

Resumen.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. ANTECEDENTES.....	6
2.1. Evento de aluvión del 26 de marzo de 2025.....	6
2.2. Evento de aluvión del 28 de abril de 2025.....	6
2.2. Identificación del peligro latente en julio del 2026.....	6
3. OBJETIVOS.....	7
3.1 Objetivo general.....	7
3.2 Objetivos específicos.....	7
4. UBICACIÓN.....	7
4.1. Geográfica.....	8
4.2. Política.....	8
4.3. Hidrográfica.....	8
5. METODOLOGÍA.....	9
5.1 Caracterización geotécnica del macizo rocoso.....	9
5.2 Análisis estructural.....	10
5.4 Análisis del movimiento en masa.....	12
6. ACTIVIDADES REALIZADAS.....	12
6.1. PRE-CAMPO.....	12
6.2 CAMPO.....	18
6.3 POSTCAMPO.....	20
7. RESULTADOS.....	25
7.3. Movimiento en masa.....	28
7.3.1 Modelamiento del desprendimiento de roca.....	28
8. CONCLUSIONES.....	29
9. RECOMENDACIONES.....	29
10. REFERENCIAS.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Ortofotos del área de la laguna A (desaparecida) del 1 de julio del 2026</i>	6
<i>Figura 2: Mapa de ubicación del área de estudio o interés</i>	8
<i>Figura 3: Estimación del GSI para macizos heterogéneos.</i>	9
<i>Figura 4: Afloramiento del macizo rocoso inestable en estudio (Formación Sapotal).</i>	11
<i>Figura 5: Vista en planta de la zona de interés por el potencial desprendimiento.</i>	12
<i>Figura 6: Laguna B condiciones observadas en julio de 2026.</i>	13
<i>Figura 7: Mapa de Isoaceleraciones sísmicas PGA para $T_r = 500$ años.</i>	14
<i>Figura 8: Mapa de Isoaceleraciones sísmicas PGA para $T_r = 1000$ años.</i>	15
<i>Figura 9: Zona de estudio con vectores de desplazamiento (m) a nivel regional.</i>	16
<i>Figura 10: Vista en planta de los puntos referenciales de imágenes registradas con vuelo RPAS.</i>	17
<i>Figura 11: Ubicación de las estaciones geotécnicas.</i>	18
<i>Figura 12: Análisis estructural del talud.</i>	19
<i>Figura 13: Análisis cinemático del talud. A) Rotura tipo planar, B) Rotura tipo cuña.</i>	20
<i>Figura 14: Flujograma del procesamiento de imágenes del RPAS.</i>	22
<i>Figura 15: Ubicación de grietas identificadas en el macizo rocoso.</i>	23
<i>Figura 16: Superficies críticas (en líneas rojas) en el macizo rocoso según método GLE en condiciones pseudo estáticas.</i>	24
<i>Figura 17: Superficie muy crítica del macizo rocoso potencialmente inestable.</i>	25
<i>Figura 18: Modelamiento del potencial desprendimiento o caída de rocas.</i>	26

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Cálculo de valoración RMR</i>	8
<i>Tabla 2. Límites permisibles</i>	10
<i>Tabla 3. Registro de estaciones geotécnicas</i>	18
<i>Tabla 4. Familias de discontinuidades</i>	19
<i>Tabla 5. Resumen de resultados del análisis cinemático</i>	21
<i>Tabla 6. Propiedades de resistencia de las rocas</i>	23
<i>Tabla 7. Resultados del análisis de estabilidad</i>	24

Resumen

El presente informe ha sido elaborado en atención a los compromisos asumidos ante la Plataforma de Defensa Civil Provincial de Huaraz el 13 de julio de 2026, con el fin de complementar el reporte del INAIGEM que informa a las autoridades la evaluación de zonas de riesgo al sur del nevado Vallunaraju.

El objetivo es determinar el peligro por desborde de la laguna al sur del nevado Vallunaraju ante la ocurrencia del desprendimiento del macizo rocoso inestable adyacente.

Para tal efecto, se ha realizado la revisión de la información existente, trabajos de campo y de post campo; mediante la integración de información fotogramétrica (RPAS), evaluación geotécnica de campo y modelamientos tridimensionales (Slide3D) y dinámicos (RAMMS). Se determinó la existencia de una masa rocosa inestable de $828\,467.24\text{ m}^3$ con un Factor de Seguridad (FS) de 1.224 obtenido mediante el Método de Equilibrio Límite Generalizado (GLE).

Ante esta situación se recomienda señalar la zona de peligro de desprendimiento y de aluvión originado por el macizo rocoso al sur del nevado Vallunaraju; además de implementar medidas para la gestión del riesgo glaciar a nivel de la subcuenca del río Casca, tales como: implementar una estación del Centro Nacional de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (CENMGEM); implementar un Sistema de Alerta Temprana (SAT) y realizar simulacros y simulaciones para la preparación de la población ante un aluvión.

1. INTRODUCCIÓN

El INAIGEM, en el marco de sus funciones, realiza la evaluación de peligros asociados a glaciares localizados en las subcuencas de origen glaciar en las cordilleras glaciares del Perú.

El día 13 de julio se ha realizado una reunión de coordinación de la Plataforma de Defensa Civil Provincial de Huaraz, en atención a un documento del INAIGEM donde informa a las autoridades la evaluación de zonas de riesgo al sur del nevado Vallunaraju. Durante la reunión, el INAIGEM expuso sobre la situación actual de la zona crítica del macizo rocoso del sector periglacial del nevado Vallunaraju localizado en el distrito de Independencia, provincia de Huaraz, departamento de Ancash; y se comprometió a realizar un informe técnico complementario de la zona crítica del macizo rocoso en cuestión.

En ese sentido, un equipo de tres especialistas ha realizado la salida de campo el día 3 de agosto para la toma de información necesaria para elaborar el informe técnico, como los son: datos estructurales del macizo rocoso y levantamiento fotogramétrico de la zona en estudio para mejorar nuestro análisis técnico inicial de las zonas críticas identificadas.

2. ANTECEDENTES

En el área de estudio se ha tenido la ocurrencia de caídas de roca el 2025, siendo el evento del 28 de abril del 2025 el que ha originado mayores daños y pérdidas de vidas humanas y económicas dentro de la jurisdicción del distrito de Independencia, provincia de Huaraz, departamento de Ancash; a continuación, se indicará las principales ocurrencias:

2.1. Evento de aluvión del 26 de marzo de 2025

Este evento aluviónico ocurrió a consecuencia del desborde de la laguna A, que consecuentemente impactó sobre la laguna B y el flujo de detritos fluyó aguas abajo hasta detenerse en el fondo del valle Llaca (INAIGEM & INGEMMET, 2025).

2.2. Evento de aluvión del 28 de abril de 2025

A consecuencia de la caída de roca, se originó un evento aluviónico que impactó en la laguna A, y su desborde de agua posteriormente transitó por la laguna B y originó el flujo violento erosionando grandes cantidades de sedimentos. Este evento llegó hasta la confluencia del río Santa, los impactos más importantes fueron la pérdida de 2 vidas humanas, medios de vida y varias infraestructuras (INAIGEM & INGEMMET, 2025).

2.2. Identificación del peligro latente en julio del 2026

El 1 de julio de 2026 se realizó un vuelo fotogramétrico en el sector de la sepultada laguna A y B, cercanas al nevado Vallunaraju. Donde se han identificado dos zonas inestables (Ver figura 1, sector A y sector B) con grietas de más de un metro de longitud (líneas rojas). Esta densidad de agrietamientos evidencia la inestabilidad del macizo rocoso, el cual podría generar grandes desprendimientos de roca de gran volumen el cual podría llegar hasta la laguna B y originar su desborde.

Figura 1: Ortofotos del área de la laguna A (desaparecida) del 1 de julio del 2026



3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar el peligro por desborde de laguna B ante la ocurrencia del desprendimiento del macizo rocoso inestable localizado en la zona periglacial del nevado Vallunaraju.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar el volumen máximo de desprendimiento integrando todas las grietas halladas en el macizo rocoso.
- Modelar el impacto que tendría el desprendimiento del macizo rocoso inestable con relación a la laguna B.

4. UBICACIÓN

El macizo rocoso en estudio o de interés se encuentra ubicado (9.440932°S de latitud, 77.466843°O de longitud) a una altitud de 5 125.73 m s.n.m, en su punto más alto.

4.1. Geográfica

El área de estudio se localiza en las siguientes coordenadas, dentro del Datum WGS 84, Zona L-18 Sur:

Coordenadas UTM

Este: 229,116.40 m;

Norte: 8'955,442.00 m;

Coordenadas Geográficas

Longitud: 77°28'0.62" O

Latitud: 09°26'27.36" S

4.2. Política

El área de estudio se localiza políticamente

UBIGEO:

Distrito : Independencia 020105

Provincia : Huaraz 0201

Departamento : Ancash 02

4.3. Hidrográfica

El área de estudio se localiza geográficamente:

Clasificación Strahler

Nombre

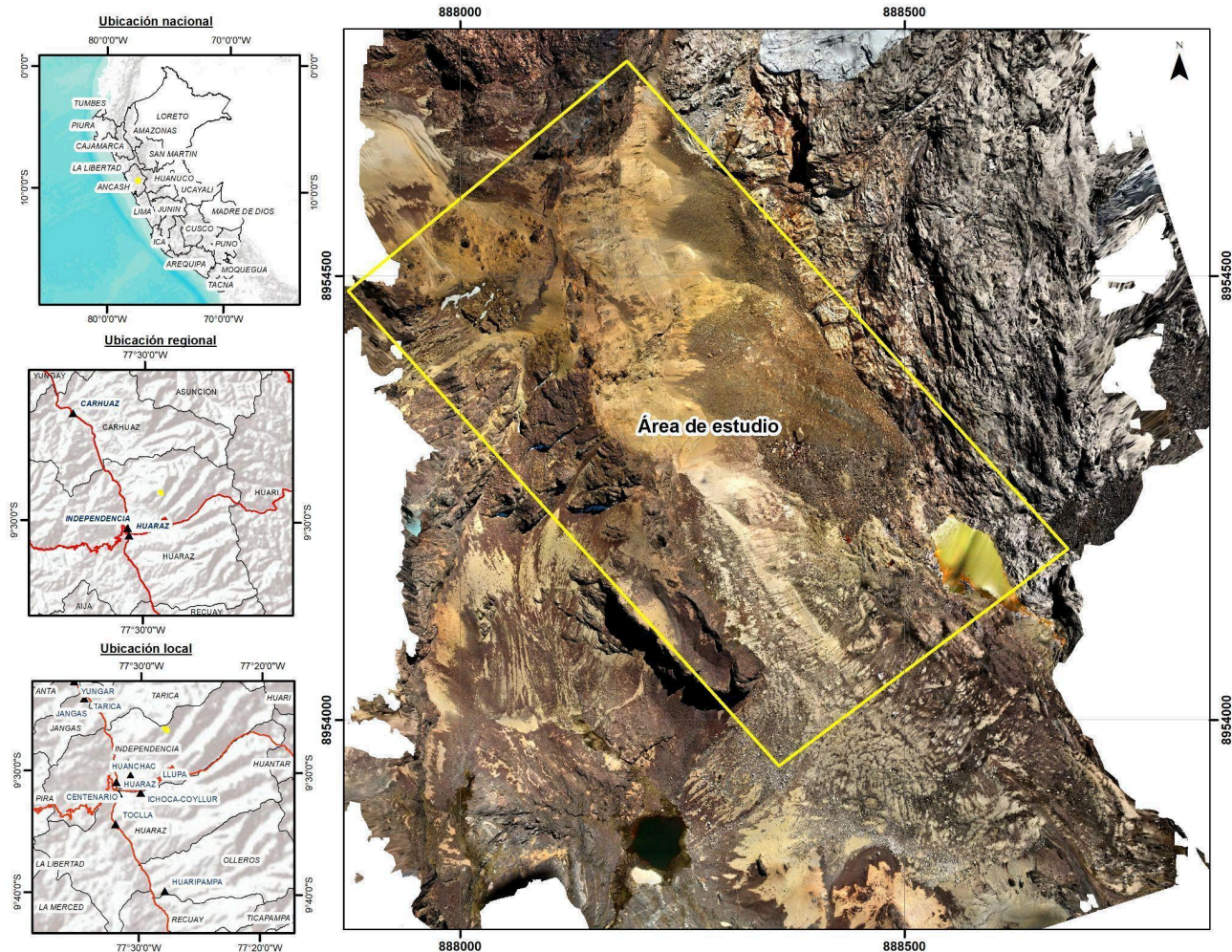
Subcuenca : Casca

Cuenca : Santa

Vertiente : Pacifico



Figura 2: Mapa de ubicación del área de estudio



5. METODOLOGÍA

5.1 Caracterización geotécnica del macizo rocoso

La caracterización geotécnica del macizo rocoso se realizó de acuerdo con sus características físicas, mecánicas, litológicas y de competencia; realizando la evaluación bajo tres sistemas de clasificación geomecánica del macizo rocoso, a saber:

5.1.1 Clasificación RMR de Bieniawski (1989)

Esta clasificación es uno de los más usados para determinar la calidad de roca denominado índice RMR (Rock Mass Rating), el cual indica la calidad del macizo rocoso en cada dominio estructural a partir de la sumatoria de una serie de parámetros.

Tabla 1. Cálculo de valoración RMR

Factor	Signo	Descripción del parámetro	Clasificación	Valuación
1.	(+)	Resistencia a la compresión simple de la roca inalterada	Básica	0 a 15
2.	(+)	RQD (existe un sistema basado en este mismo parámetro)		3 a 20
3.	(+)	Espaciamiento de las discontinuidades (fisuras, diaclasas)		5 a 20
4.	(+)	Estado de las discontinuidades		0 a 30
5.	(+)	Presencia de agua subterránea		0 a 15

Fuente: Bieniawski (1989).

5.1.2 Clasificación S.M.R. Slope Mass Rating (Romana 1985-1996)

Este índice de clasificación corresponde a una adaptación de la clasificación RMR para taludes, introduciendo factores en función de la orientación de las discontinuidades (F1, F2, F3), además de un factor de excavación (F4); obteniendo de esta manera una buena concordancia con la estabilidad real del macizo rocoso.

$$SMR = RMR_{basico} + (F1 * F2 * F3) + F4$$

5.1.3 Índice de Resistencia Geológica GSI (Geological Strength Index)

Es un sistema de caracterización en base a la descripción del macizo rocoso a nivel estructural (fracturamiento) y de las condiciones presentes en su superficie (discontinuidades). Considerando que el talud en evaluación corresponde a una intercalación de areniscas y lutitas, la determinación del GSI se hace a partir de una tabla de estimación para macizos heterogéneos (flysch).

Figura 3: Estimación del GSI para macizos heterogéneos.

GSI PARA MACISOS HETEROGENEOS FLYSH		CONDICIONES DE SUPERFICIE EN LAS DISCONTINUIDADES (planos de foliación predominantes)				
COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA		Superficies muy rugosas, superficies no meteorizadas, frescas	Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y aferradas	Superficies con espejos de falla, con alto grado de meteorización con rellenos compactos o rellenos de fragmentos	Superficies con espejos de falla, con alto grado de meteorización con relleno de arcilla suave
	A. El espesor de la capa de arenisca. El efecto del recubrimiento pelítico sobre los planos de las capas es minimizado por el efecto de confinamiento del macizo rocoso.	70	60	A		
	B. Arenisca con intercalaciones de limolita		50	B	C	
	C. Arenisca y limolita en iguales cantidades.		40		D	E
	D. Limolita con estratos de arenisca con estratos de arcillolita					
	E. Limolita y arcillolita con estratos de arenisca					
	F. Tectónicamente deformado, intensamente foliado/fallado, material arcilloso cizallado de limolita y arcillolita con fragmentos de arenisca deformadas formando			30	F	
	G. Arcillolitas y limolitas inalteradas con o sin arenisca.				20	
	H. Limolita o arcillolita tectónicamente deformada formando una estructura caótica con paquetes de arcilla. Delgados estratos de arenisca transformada en pequeñas				G	H 10

Fuente: Adaptada de Hoek (2006).

5.2 Análisis estructural

El análisis estructural se realiza en base al cartografiado y/o mapeo estructural del macizo rocoso realizado mediante las estaciones geotécnicas con datos estructurales (buzamiento y dirección de buzamiento de las principales discontinuidades), así como las características físicas que presentan. Estos datos estructurales obtenidos en campo son representados en una proyección estereográfica para la identificación de las principales familias de discontinuidades, mediante diagramas como la concentración de polos, contornos y los gráficos de rosetas.

5.3 Análisis de estabilidad del macizo rocoso

5.3.1 Análisis cinemático de taludes

El análisis cinemático, que es puramente geométrico, examina los modos posibles de falla de un talud en los macizos rocosos, considerando la orientación de las discontinuidades, del talud y la superficie superior del talud, lo cual junto con la fricción determinan con certeza qué modos de falla posiblemente pueden ocurrir (Kliche, 1999).

Una vez que el tipo de falla haya sido identificado en el estereograma, el mismo diagrama se puede utilizar para examinar la dirección en la que el bloque se deslizará (o fallará), dando también las condiciones de estabilidad. Este procedimiento se conoce como análisis cinemático, el cual se evidencia en el estereograma.

5.3.2 Análisis de estabilidad en 3D

El análisis de estabilidad tridimensional se realiza utilizando el software Slide3 (Rocscience), el cual emplea el Método de Equilibrio Límite (MEL) para evaluar la estabilidad de taludes mediante un enfoque completamente tridimensional, incorporando la geometría completa del macizo rocoso, permitiendo representar de manera más realista las condiciones topográficas, la distribución espacial de los materiales y la influencia de las superficies de contacto.

En su análisis el software Slide3 genera automáticamente un gran número de superficies de falla tridimensionales mediante algoritmos de búsqueda, evaluando para cada una de ellas el equilibrio entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes. Para cada superficie analizada se calcula el Factor de Seguridad (FS), definido como la relación entre la resistencia disponible del material y los esfuerzos que inducen el movimiento en masa. La superficie con el menor factor de seguridad corresponde al mecanismo de falla más crítico y constituye la condición de estabilidad del modelo.

Criterios de aceptabilidad

Los valores de FS dependen de la estratigrafía, la resistencia de los materiales, la presión del agua de los poros y la carga (Dam Safety Guidelines, 2007). Siendo los límites permisibles para condiciones estáticas y pseudo estáticas según la Norma E.050 "Suelos y Cimentaciones" los siguientes:

Tabla 2. Límites permisibles para el FS

Condición de carga	FS mínimo
Estática	1.50
Pseudo estática	1.25

Aspecto sísmico

Respecto al análisis pseudoestático se considera que la masa involucrada en la falla está sometida a una aceleración horizontal igual a un coeficiente sísmico multiplicado por la aceleración de la gravedad. Siendo que el área de estudio se encuentra ubicado en la zona 3 del mapa de zonificación Sísmica del Perú, de acuerdo con la Norma Técnica de Edificación "E.030 Diseño Sismorresistente", esta presenta una aceleración pico de 0.35 g para la zona de estudio.

5.4 Análisis del movimiento en masa

Posterior a la identificación y caracterización de la zona inestable del macizo rocoso en el ámbito de estudio, se realizó el análisis dinámico del posible desprendimiento y alcance en el contexto de posible impacto y desborde de la laguna B. Para este análisis se empleó el modelo RAMMS para simular el desprendimiento de rocas y escombros en condición saturada.

6. ACTIVIDADES REALIZADAS

6.1. PRE-CAMPO

6.1.1. Información geológica

El cartografiado geológico tomado como base para el presente estudio, corresponde al realizado por INAIGEM en el año 2025. El afloramiento rocoso en la margen derecha de las lagunas A (desaparecida) y B aflora en estructuras “roof pendant” (bloque colgado o suspendido por la interacción de la roca encajonante con una masa ígnea plutónica en ascenso, asimilación e intrusión), este proceso geológico ha generado un metamorfismo de contacto y un cambio en el comportamiento geomecánico que afectó las rocas de la Formación Sapotal, el cual, en superficie se manifestó a través de fracturas, discontinuidades y foliaciones. La Formación Sapotal está constituido litológicamente por areniscas de grano medio a fino color gris intercaladas con niveles de lutitas negras en estratos medianos de 0.1 a 0.4 m de espesor, conformando un basamento rocoso muy fracturado y fuertemente meteorizados, mostrándose con aspecto fragmentado y craquelado, el cual las convierten en zonas altamente susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa (INAIGEM & INGEMMET, 2025).

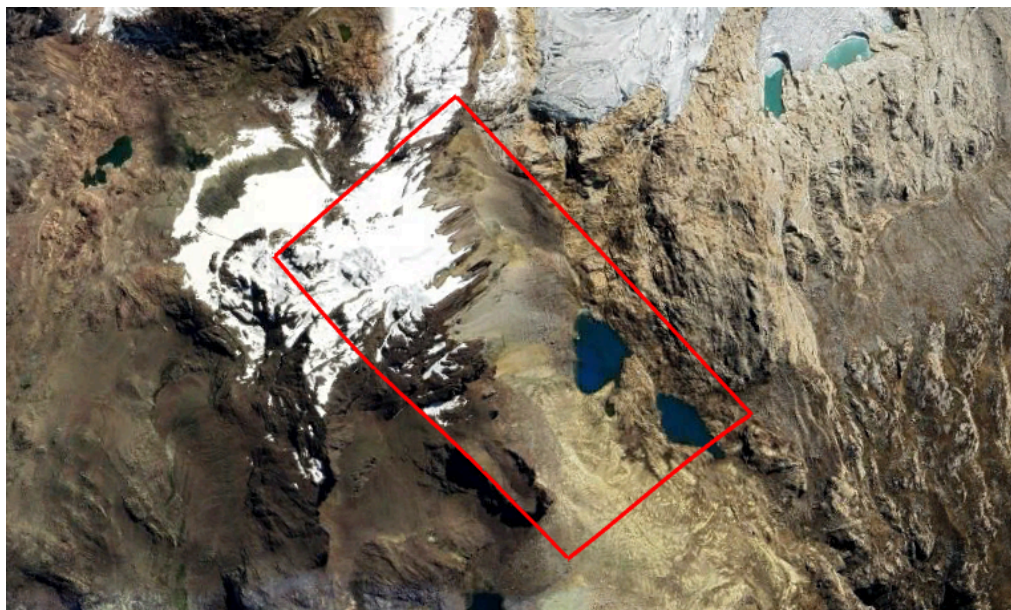
Figura 4: Afloramiento del macizo rocoso inestable en estudio (Formación Sapotal).



6.1.2. Información fotogramétrica

Se preparó la información respecto a la zona de interés, donde el propósito es registrar e identificar potenciales zonas susceptibles que impacten hacia la parte baja. Para ello se ha identificado la zona a desarrollar el vuelo RPAS ubicado en la zona frontal del glaciar Vallunaraju según se observa en la siguiente figura:

Figura 5: Vista en planta de la zona de interés por el potencial desprendimiento.



Fuente: Google Earth (2024).

El espacio superficial de interés cubre 29 hectáreas donde se obtuvieron fotografías y videos del estado situacional de la zona para posterior análisis.

6.1.3. Información hidrológica

La laguna B (código: 1376958-2) cuenta con un volumen de 3 750 m³, una profundidad máxima de 1.55 m, largo máximo de 144 m, ancho máximo de 77 m y un área de 5 894 m² (Autoridad Nacional del Agua, 2025). La descarga de la laguna B es aproximadamente de 17.90 l/s (mediciones realizadas en 2021). El aporte de sedimentos en esta laguna fue importante durante y posterior al evento del 28 de abril del 2025, lo que influyó en la profundidad máxima y el volumen total de dicha laguna.



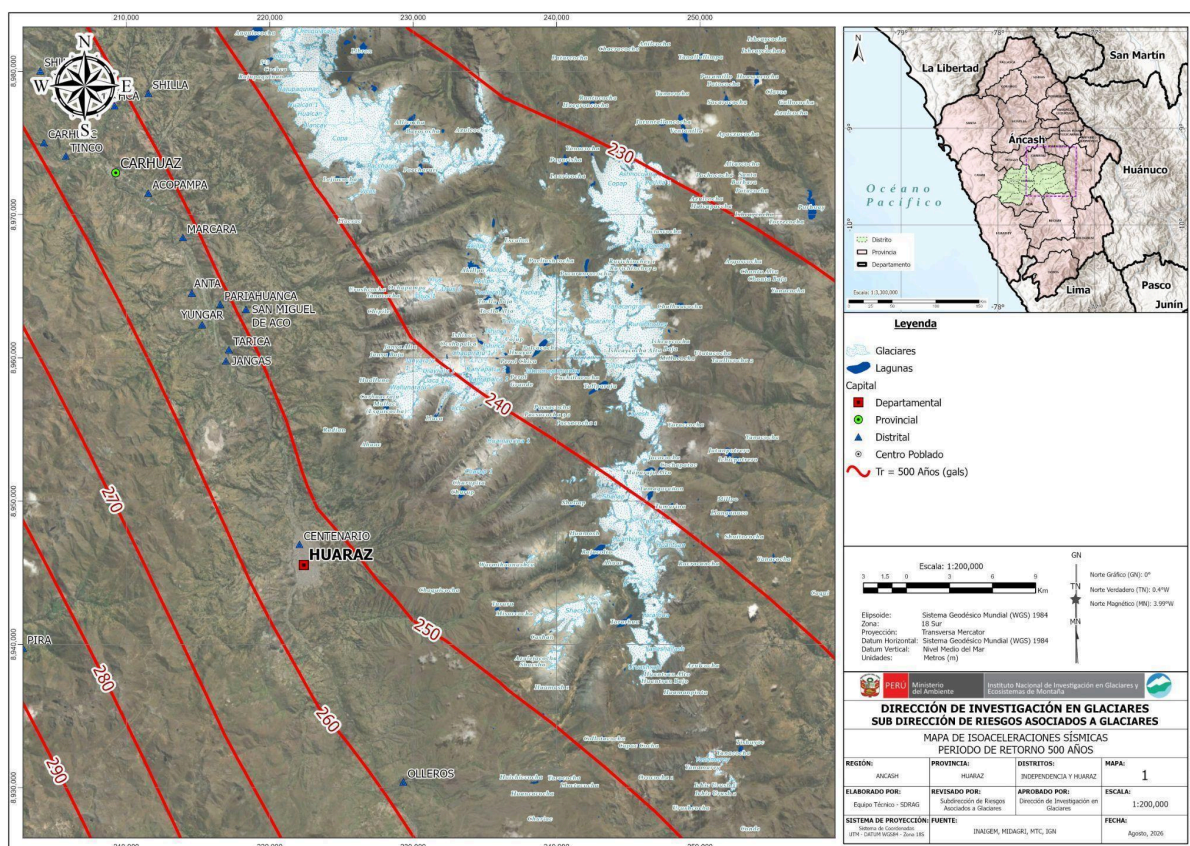
Figura 6: Laguna B condiciones observadas en julio de 2026.



6.1.4. Información sísmica

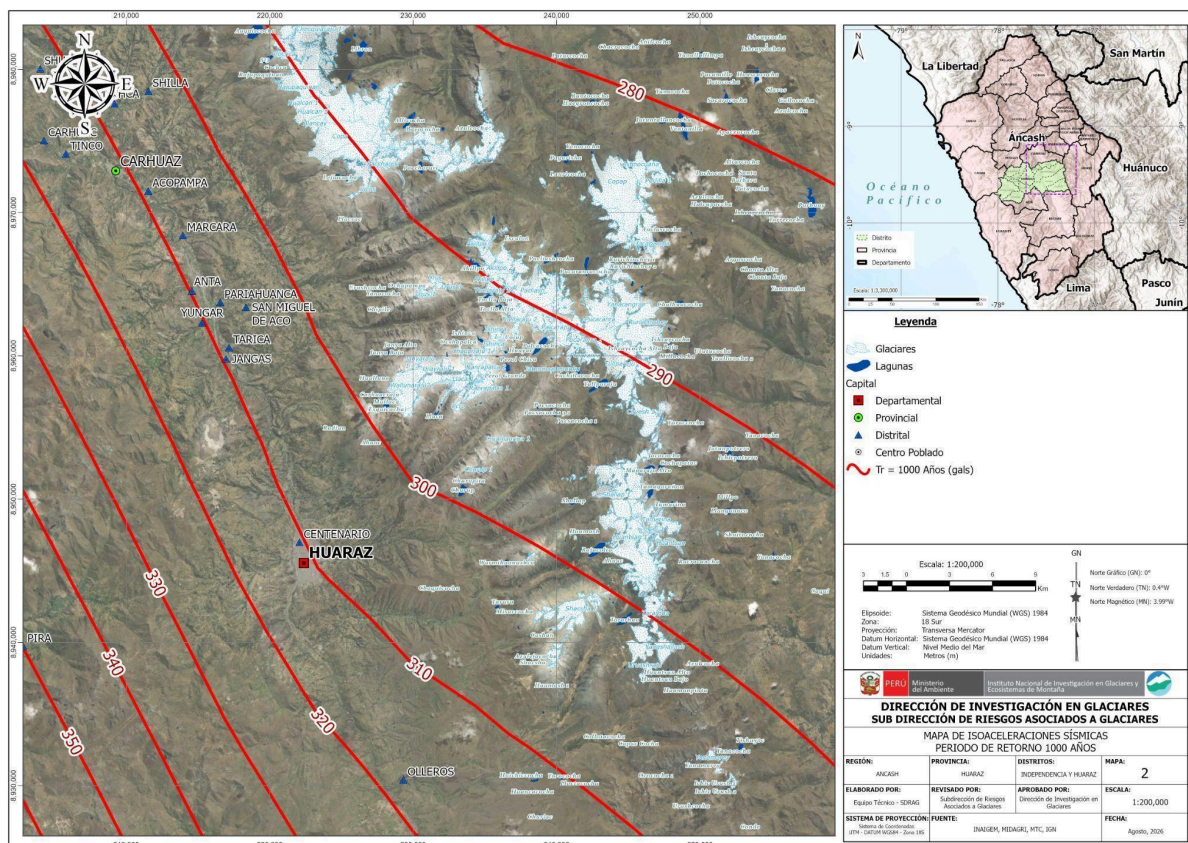
Se ha revisado la información sísmica de isoaceleraciones (IGP, 2014) la cual contiene los siguientes valores para un periodo de retorno (T_r) de 500 años, la Laguna B de la UH Casca se encuentra entre las isolíneas de 240 y 250 gals, equivalentes aproximadamente a 0.245 – 0.255 g, lo que representa una demanda sísmica importante para la evaluación de la estabilidad de los taludes que rodean a dicha laguna. Bajo este escenario, la ocurrencia de un sismo puede incrementar las fuerzas inerciales actuantes sobre las masas potencialmente inestables y reducir el factor de seguridad respecto a la condición estática, particularmente en sectores conformados por materiales poco consolidados y/o fracturados o meteorizados como sucede en el macizo rocoso evaluado, con pendientes pronunciadas o condiciones de saturación ante el escenario de eventos ENSO.

Figura 7: Mapa de Isoaceleraciones sísmicas PGA para $T_r = 500$ años.



Para un periodo de retorno (T_r) de 1000 años, la Laguna B se ubica entre las isolíneas de 290 y 300 gals, correspondientes aproximadamente a 0.296 – 0.306 g. Este incremento de la aceleración respecto al escenario de 500 años representa una mayor demanda sísmica sobre los taludes y, consecuentemente, una condición más desfavorable para su estabilidad. La acción sísmica podría producir una reducción adicional del factor de seguridad y favorecer el desarrollo de deformaciones permanentes en aquellos sectores que presenten condiciones geotécnicas deficientes, pueden ser exacerbados por lluvias intensas.

Figura 8: Mapa de Isoaceleraciones sísmicas PGA para $T_r = 1000$ años.

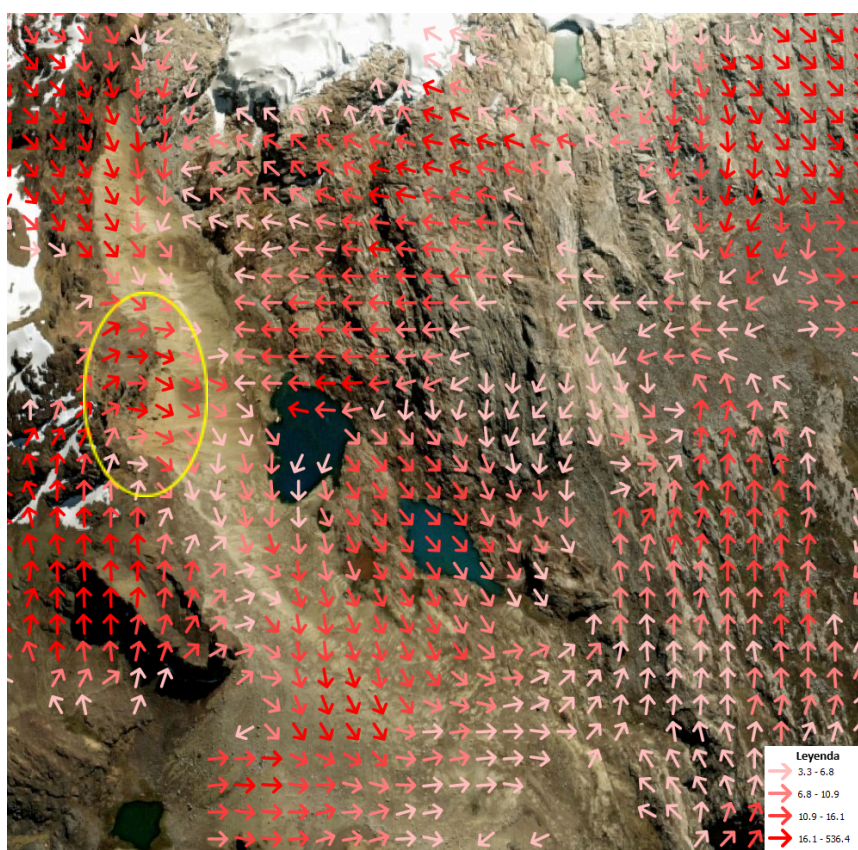


6.1.5. Información sobre desplazamientos regionales

La información correspondiente a la dirección y magnitud del desplazamiento se obtuvo mediante la comparación multitemporal de imágenes satelitales Sentinel-2A, utilizando la banda 8 (NIR) con una resolución espacial de 10 m por píxel a una escala de análisis 1 en 25,000, adquiridas entre diciembre de 2025 y junio de 2026. El análisis permitió identificar un movimiento predominante en dirección hacia la laguna B, con un azimuth comprendido entre 22° y 29°, asociado al desplazamiento progresivo de material erosionado a lo largo del talud.

La estimación del desplazamiento se realizó mediante el programa autoRIFT (Lei et al., 2021), el cual permite determinar el movimiento superficial mediante la correlación y comparación píxel a píxel entre dos escenas adquiridas en fechas distintas. Los resultados muestran desplazamientos máximos del orden de 1 a 2 píxeles en los sectores superiores o picos del talud, mientras que en los sectores medios se estimaron desplazamientos cercanos a 0.5 píxeles.

Figura 9: Zona de estudio con vectores de desplazamiento (m) a nivel regional.



Nota: la zona en círculo amarillo nos indica vectores activos de desplazamiento en metros (m) a nivel regional mediante el análisis de imágenes satelitales, cuyos resultados coinciden con la dinámica del macizo rocoso el cual forma parte del área periglacial del nevado Vallunaraju.

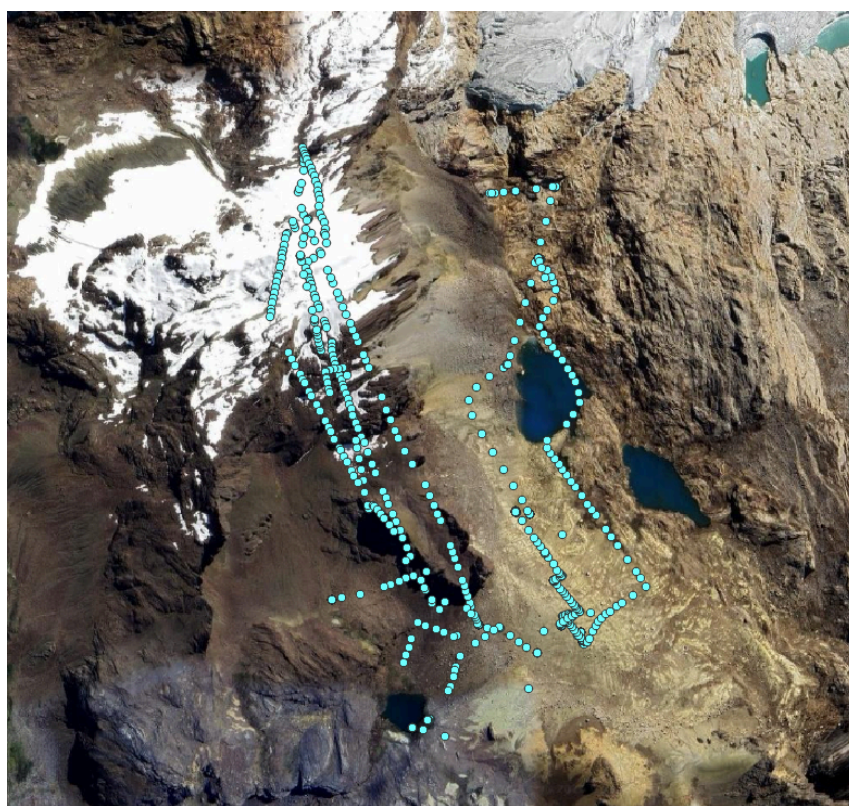
6.2 CAMPO

6.2.1 Levantamiento fotogramétrico

Se constataron las condiciones meteorológicas, así como de seguridad física del personal y equipos para la adecuada recolección de información fotogramétrica. Las condiciones meteorológicas del sector presentan fuertes ráfagas de viento con velocidades entre los 10 a 12 m/s, es así que se esperó una ventana de tiempo que permita realizar los vuelos fotogramétricos y de inspección.

Bajo estas consideraciones se han registrado imágenes y en video la zona potencial de desprendimiento que podría afectar hacia la parte baja e incluso impactar hacia la laguna y ocasionar potencial desborde por la carga de materiales que podrían depositarse.

Figura 10: Vista en planta de los puntos referenciales de imágenes registradas con vuelo RPAS.



Nota: Los puntos representan las imágenes que se registraron en el vuelo RPAS enfocado a identificar potenciales grietas que podrían desprenderse y afectar hacia la parte baja e impactar a los cuerpos de agua, a su vez se realizó el registro de la zona en video para el entendimiento del panorama que representa la zona.

Cabe aclarar que esta actividad permitió identificar que los posteriores vuelos sean desarrollados con equipos mejor acondicionados para la zona e implementados con sensores de mayor precisión; en ese sentido los productos generados mediante vuelo RPAS serán aplicados a nivel de identificación de zonas susceptibles para tomar acciones preventivas, tal es el caso que posteriores campañas se realizarán con equipos RPAS más adecuados y con una resistencia al viento superior a los 12 m/s para poder registrar informaciones que serán aplicados a modelamientos más precisos.

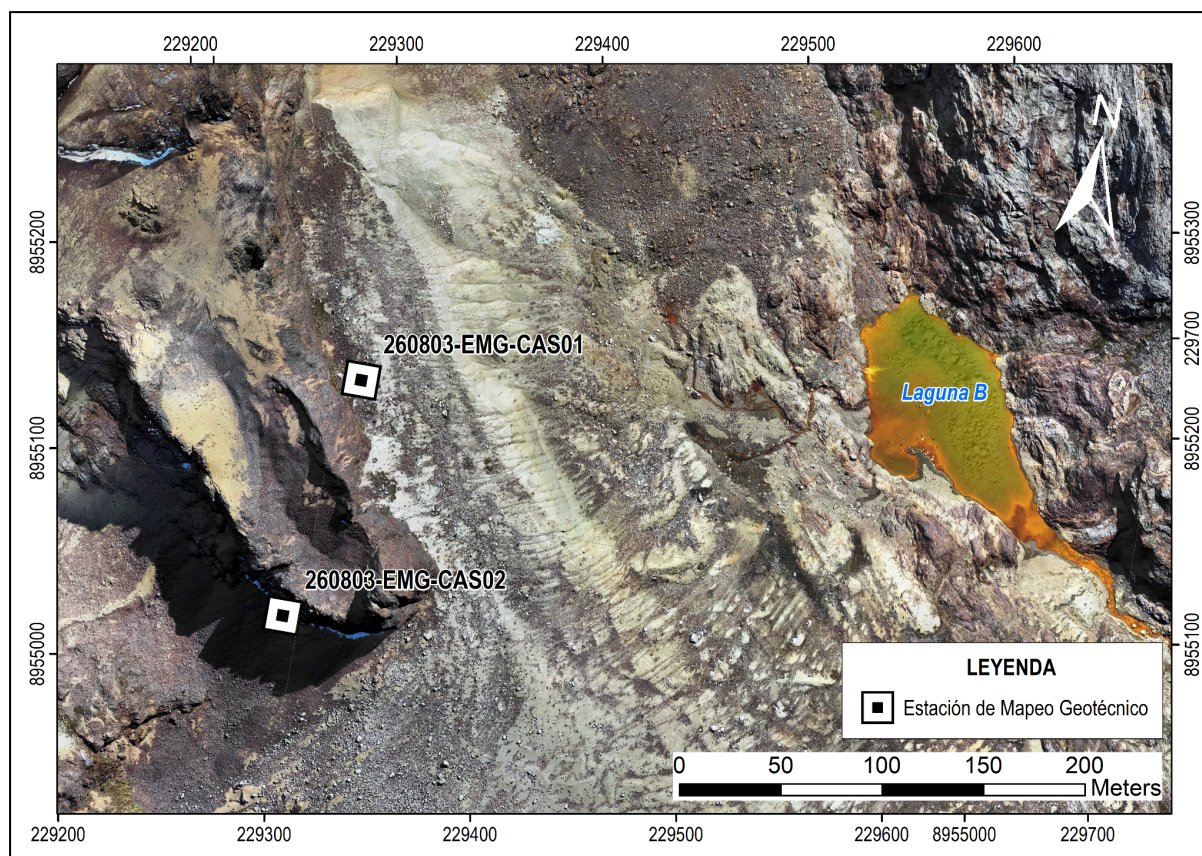
6.2.2 Estaciones geotécnicas

El mapeo estructural del macizo rocoso, se realizó en base a la recopilación in situ de los datos estructurales para dos (2) estaciones geotécnicas, ubicados en la margen derecha de las lagunas A y B. Los datos recopilados indican la orientación de las discontinuidades, así como las principales características que estas presentan.

Tabla 3. Registro de estaciones geotécnicas

N°	Estación Geotécnica	Coordenadas UTM		Altitud (m s.n.m.)	Litología
		Este (m)	Norte (m)		
1	260803-EMG-CAS01	229,310	8,955,159	4,908	Intercalación de areniscas y lutitas
2	260803-EMG-CAS01	229,292	8,955,038	4,879	Intercalación de areniscas y lutitas

Figura 11: Ubicación de las estaciones geotécnicas.



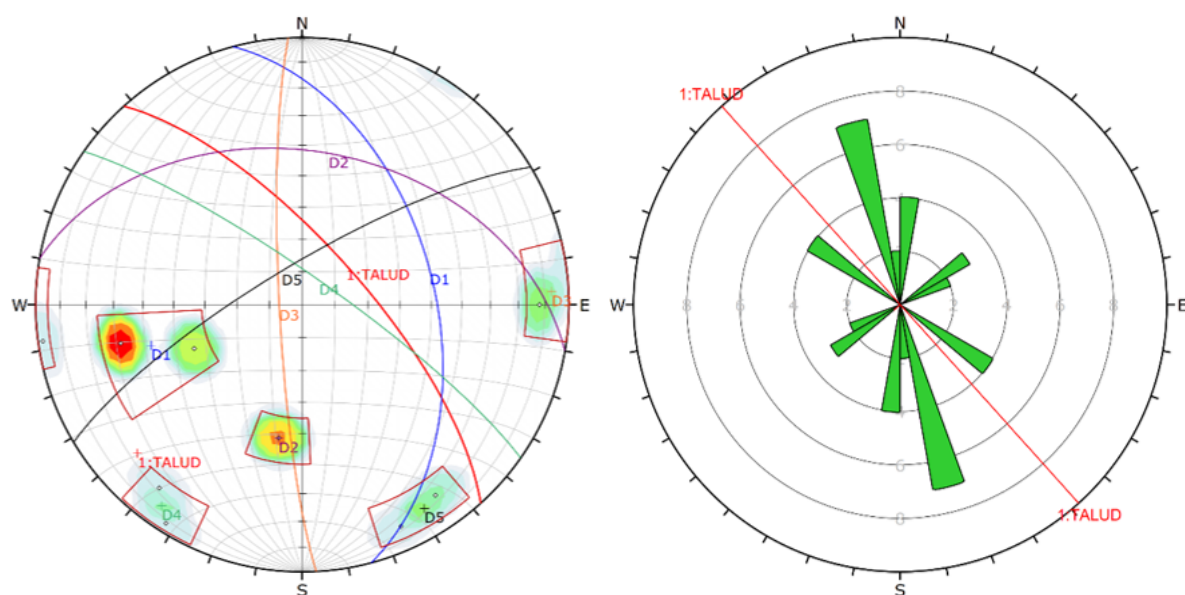
6.3 POSTCAMPO

6.3.1 Análisis geológico-geotécnico

6.3.1.1 Análisis Estructural

El análisis estructural local realizado en la zona inestable de la margen derecha de las lagunas A (desaparecida) y B, correspondiente a un afloramiento rocoso de naturaleza sedimentaria constituida por areniscas y lutitas de la Formación Sapotal ubicada cerca al nevado Vallunaraju, se realizó tomando como base la información obtenida en la estación geotécnica 260803-EMG-CAS01, punto más cercano al área evaluada, con datos de buzamiento y dirección de buzamiento del talud de 72°/048° respectivamente.

Figura 12: Análisis estructural del talud.



Identificándose que el afloramiento rocoso presenta cinco (5) principales familias de diaclasas, las cuales tienen orientaciones preferentes de NW-SE (siendo concordantes con la orientación de la falla regional de la Cordillera Blanca). Los datos estructurales identificados se muestran a detalle en la Tabla 4.

Tabla 4. Familias de discontinuidades

Estación Geotécnica	Familia de Diaclasas	Datos Estructurales	
		Dip	Dip Direction
260803-EMG-CAS01	D1	49	075
	D2	42	010
	D3	83	267
	D4	81	035
	D5	78	329

6.3.1.2 Clasificación Geotécnica

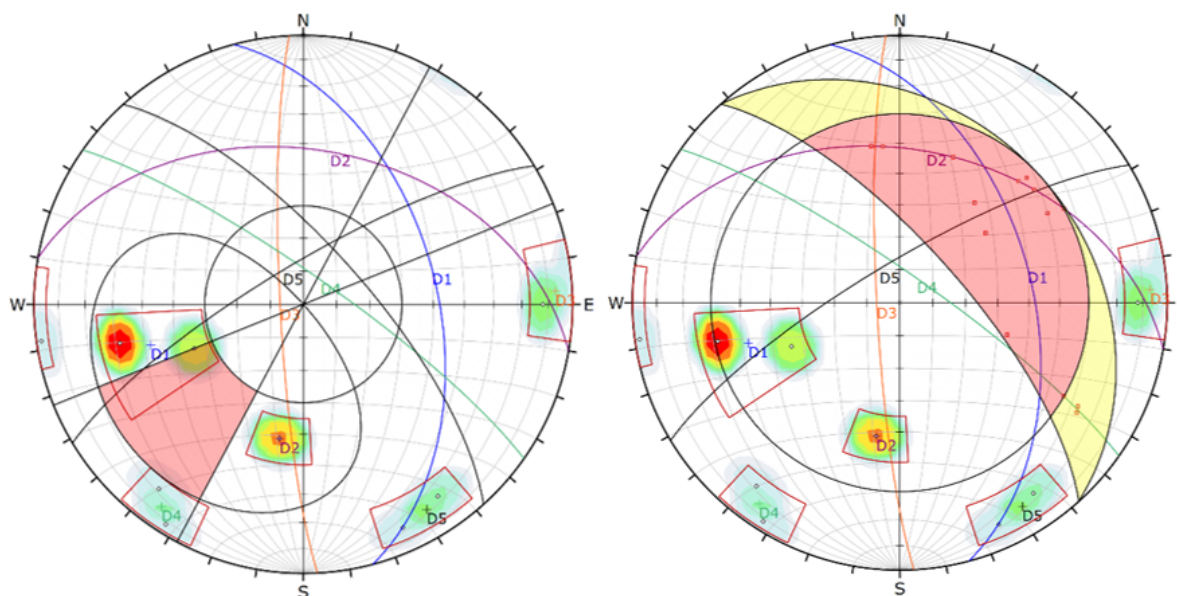
El afloramiento rocoso que conforma el talud, corresponde a rocas sedimentarias de calidad REGULAR (III-B) según el sistema de Clasificación Geomecánica RMR de Bieniawski 89, conformado litológicamente por una intercalación de rocas sedimentarias tipo arenisca de grano medio a fino y lutitas gris oscuras. Dicha unidad rocosa presenta cinco principales familias de discontinuidades, cuya persistencia es variable llegando hasta los 14 m, así mismo dichos planos se encuentran de ligera a fuertemente meteorizados, son rugosos, con un espaciamiento menor a 1 m, aberturas hasta los 60 mm, con relleno de arcilla y roca triturada, sin presencia de agua.

Asimismo, según el sistema de clasificación SMR, el cual considera el RMR básico y factores de corrección, dicho talud es de clase IV, siendo un talud inestable con juntas grandes que condicionan la probabilidad de rotura.

6.3.1.3 Análisis Cinemático de taludes

La identificación de las principales familias de discontinuidades en el afloramiento rocoso, con la proyección del talud a evaluar, permite realizar el análisis de estabilidad de dicho talud mediante el análisis cinemático para roturas tipo planar, cuña y vuelco. A su vez se consideró para la arenisca, el cual conforma la mayor parte de la Formación Sapotal, el valor del ángulo de fricción de 30° (Hoek y Bray, 1999), siendo este un valor promedio para rocas sedimentarias blandas. Obteniendo con el análisis cinemático los siguientes resultados:

Figura 13: Análisis cinemático del talud. A) Rotura tipo planar, B) Rotura tipo cuña.



Según los resultados obtenidos, se identificó la probabilidad de: 1) rotura planar, siendo que los polos de la familia D1 se encuentran dentro en la zona crítica de rotura; y 2) rotura por cuña, donde la intersección de las familias D1-D2, D1-D4, D1-D5, D2-D3 y D2-D5 con el plano del talud, se ubican en la zona crítica de rotura.

Tabla 5. Resumen de resultados del análisis cinemático

Ventana Estructural	Tipo de Rotura		
	Planar	Cuña	Por vuelco
Talud natural en la margen derecha de las lagunas A y B	SI	SI	NO

Cabe precisar que dicho análisis corresponde al punto de evaluación de la estación geotécnica 260803-EMG-CAS01, siendo que dicho afloramiento se encuentra meteorizado y afectado por un intenso plegamiento la probabilidad de rotura puede variar según la zona de análisis, pudiendo ser más crítica.

6.3.2. Análisis del movimiento en masa

6.3.2.1 Modelamiento del desprendimiento de roca

El ajuste de los parámetros de fricción del modelo RAMMS, se realizó tomando de referencia el evento de 26 de marzo del 2025, el proceso geodinámico observado esta fecha fue una caída de rocas en condición saturada, seguido de un flujo de detritos que llegó a impactar a la laguna A, que posteriormente originó un desborde parcial (INAIGEM & INGEMMET, 2025). Los parámetros empleados han sido $\mu = 0.3$ y $\xi = 200 \text{ m/s}^2$ los cuales tienen un mejor desempeño similar al evento observado (ver figura 14). Además, se empleó la densidad de la mezcla de 2000 kg/m^3 . El volumen de desprendimiento fue considerado el valor de $101 \pm 2 \times 10^3 \text{ m}^3$ de macizo rocoso (Cusicanqui et al, 2026).

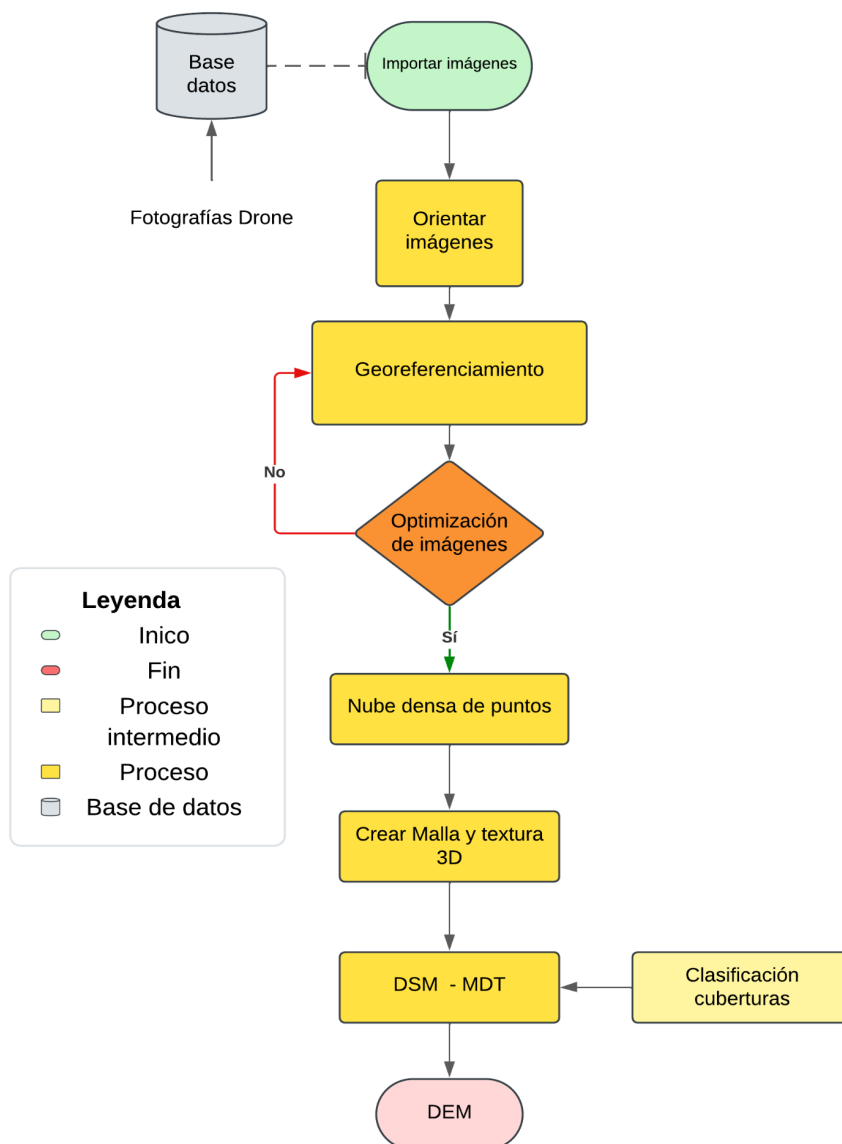
6.3.3 Procesamiento fotogramétrico

Mediante el programa Agisoft se realizó el procesamiento de las fotografías tomadas con el drone, para ello se importó las imágenes, posteriormente se orientó las imágenes. El proceso de orientación consiste en alinear las fotos, encontrando la posición de las cámaras y su respectiva orientación de cada foto para lo que lee el posicionamiento geográfico (coordenadas) y genera una nube de paso. Con las imágenes orientadas estas se encuentran en coordenadas geográficas por lo cual es necesario transformarlas al sistema métrico, para nuestro sector de estudio la proyección UTM corresponde a la zona 18s (WGS 84). Realizado el proceso de transformación de coordenadas geográficas al sistema métrico UTM se implementa la optimización de cámaras para ello se ajustan los parámetros f , c_x , c_y , k_1 , k_2 , k_3 (Coeficientes de distorsión radial, p_1 y p_2 (Coeficientes de distorsión tangencial). Donde “ f ” corresponde a longitud focal y “ c_x ” y “ c_y ” son las coordenadas de intersección entre el eje óptico y el plano del sensor.

Optimizadas las imágenes se genera la nube de puntos densa, este procedimiento tiene como objetivo generar información tridimensional que permita una posterior obtención de un modelo digital de superficie en este caso luego de generar los puntos densos estos son clasificados a fin de eliminar/depurar aquellas superficies que corresponden a cuerpos creados por el hombre (autos,

puentes, viviendas, etc.). Finalmente, con los puntos clasificados se crea la malla de puntos y texturas para obtener un modelo digital de elevaciones y su respectivo ortomosaico.

Figura 14: Flujograma del procesamiento de imágenes del RPAS.



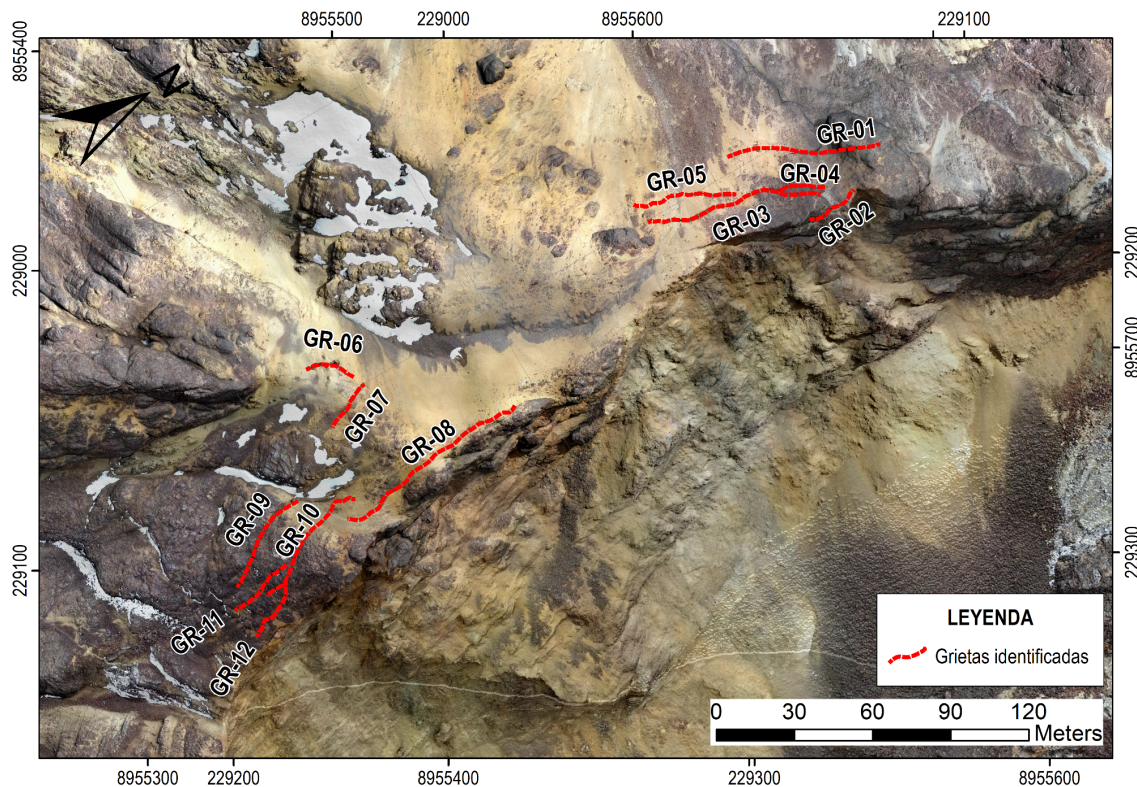
7. RESULTADOS

7.1 Análisis de estabilidad de taludes en 3D

El análisis de estabilidad tridimensional (3D) realizado en el talud objeto de estudio, ha tomado en cuenta las siguientes condiciones para su análisis en condiciones estáticas y pseudoestáticas (factor sísmico), sin tener un control estructural in situ en todas las grietas identificadas:

- Se considerará como escenario crítico al movimiento de una masa de rocas limitada por una superficie de rotura, la cual es simulada en el software numérico Slide 3D.
- El Modelo de Elevación Digital (DEM) tiene 0.4 m de resolución espacial.
- El basamento rocoso presenta 12 grietas, las cuales fueron identificadas a partir del ortomosaico.

Figura 15: Ubicación de grietas identificadas en el macizo rocoso.



- Los parámetros físicos y de resistencia del afloramiento rocoso que conforma el talud, se obtienen a partir de información bibliográfica y los datos recopilados en la estación geotécnica, siendo los parámetros utilizados los siguientes:

Tabla 6. Propiedades de resistencia de las rocas

Unidad geológica	Estación geotécnica	γ_t (kN/m ³)	Modelo de rotura	UCS (MPa)	GSI	mi
Js-sa	260803-EMG-CA S01	20 ⁽¹⁾	Hoek-Brown	50 ⁽²⁾	20	14

Fuente: (1) Manual de estabilidad de taludes (Hoek y Bray, 1999). (2) Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (Hoek, E., & Brown, E.T., 1997)

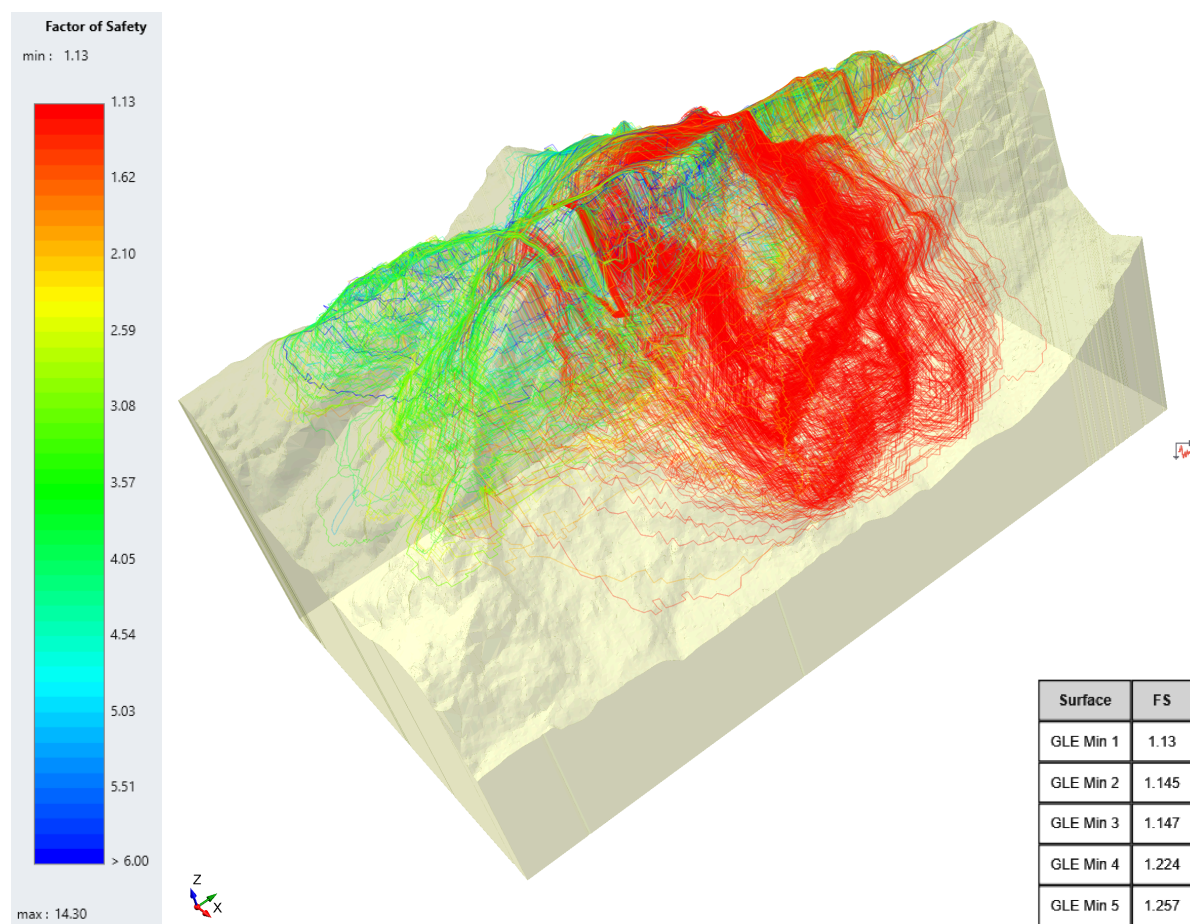
- Para el análisis pseudoestático se utilizará como coeficiente el 50% de la aceleración pico (PGA) para un periodo de retorno de $T_r = 500$ años, resultando un valor de $k_h = 0.175$.

El análisis de estabilidad 3D da como resultados valores de FS menores a 1.50 y 1.25 en condiciones estáticas y pseudoestáticas respectivamente (Tabla 7); lo cual indica que dicho talud presenta condiciones de estabilidad desfavorables y una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa, tipo derrumbe de rocas.

Tabla 7. Resultados del análisis de estabilidad

Condición Estática				Condición Pseudo Estática			
Método Bishop	Método Spencer	Método Janbu	Método GLE / Morgenstern-Price	Método Bishop	Método Spencer	Método Janbu	Método GLE / Morgenstern-Price
1.239	1.288	1.245	1.475	1.237	1.205	1.178	1.224

Figura 16: Superficies críticas (en líneas rojas) en el macizo rocoso según método GLE en condiciones pseudo estáticas.



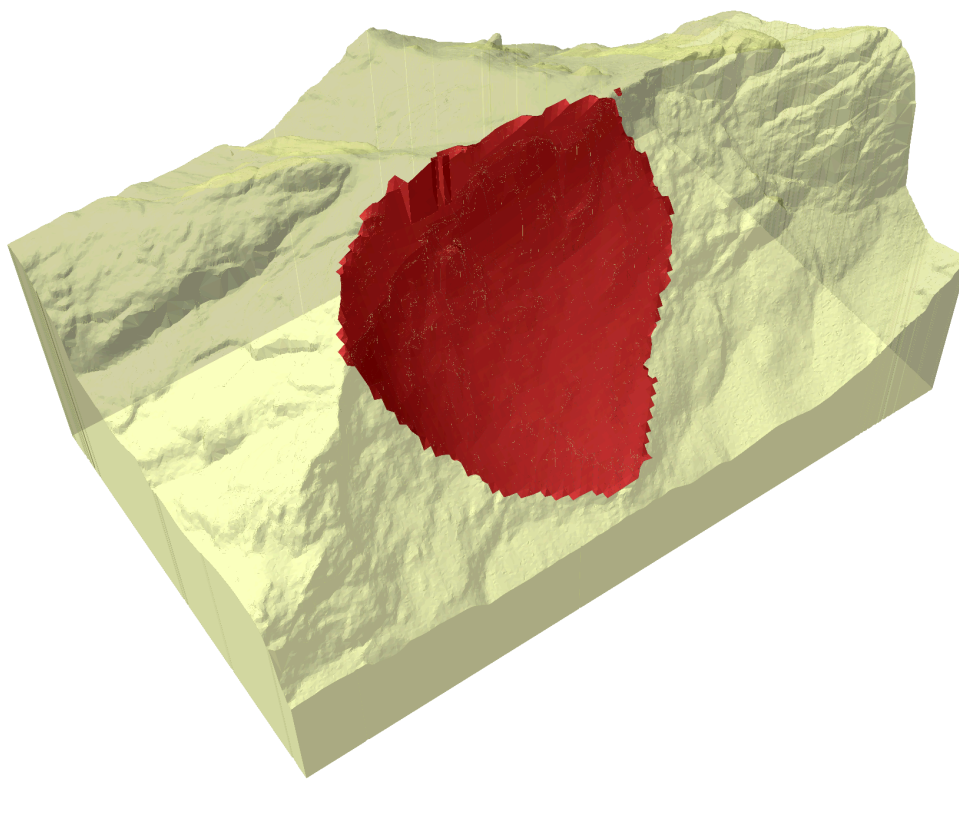
Considerando los resultados obtenidos, se identificó como zona crítica al talud en evaluación, el cual presenta condiciones que favorecen su inestabilidad, entre las que destacan: (1) la pendiente pronunciada del talud, siendo mayor a 65° ; (2) el intenso fracturamiento y meteorización del macizo rocoso; (3) la intercalación litológica entre areniscas y lutitas, siendo esta última una capa de material

blando que se comporta como zonas de debilidad; y (4) el intenso plegamiento por el que ha sido afectado, lo cual ocasiona una variación constante según la posición de sus discontinuidades.

7.2 Estimación del volumen de derrumbe de rocas

El análisis de estabilidad tridimensional permitió identificar y cuantificar las masas de roca potencialmente inestables presentes en el talud, cuyos volúmenes superan los $30 \times 10^3 \text{ m}^3$ para los diferentes escenarios identificados. El mayor volumen estimado corresponde al calculado mediante el método GLE bajo condiciones pseudo estáticas, siendo de **828,467.24 m³**, considerado como el escenario de mayor volumen potencialmente inestable.

Figura 17: Superficie muy crítica del macizo rocoso potencialmente inestable.



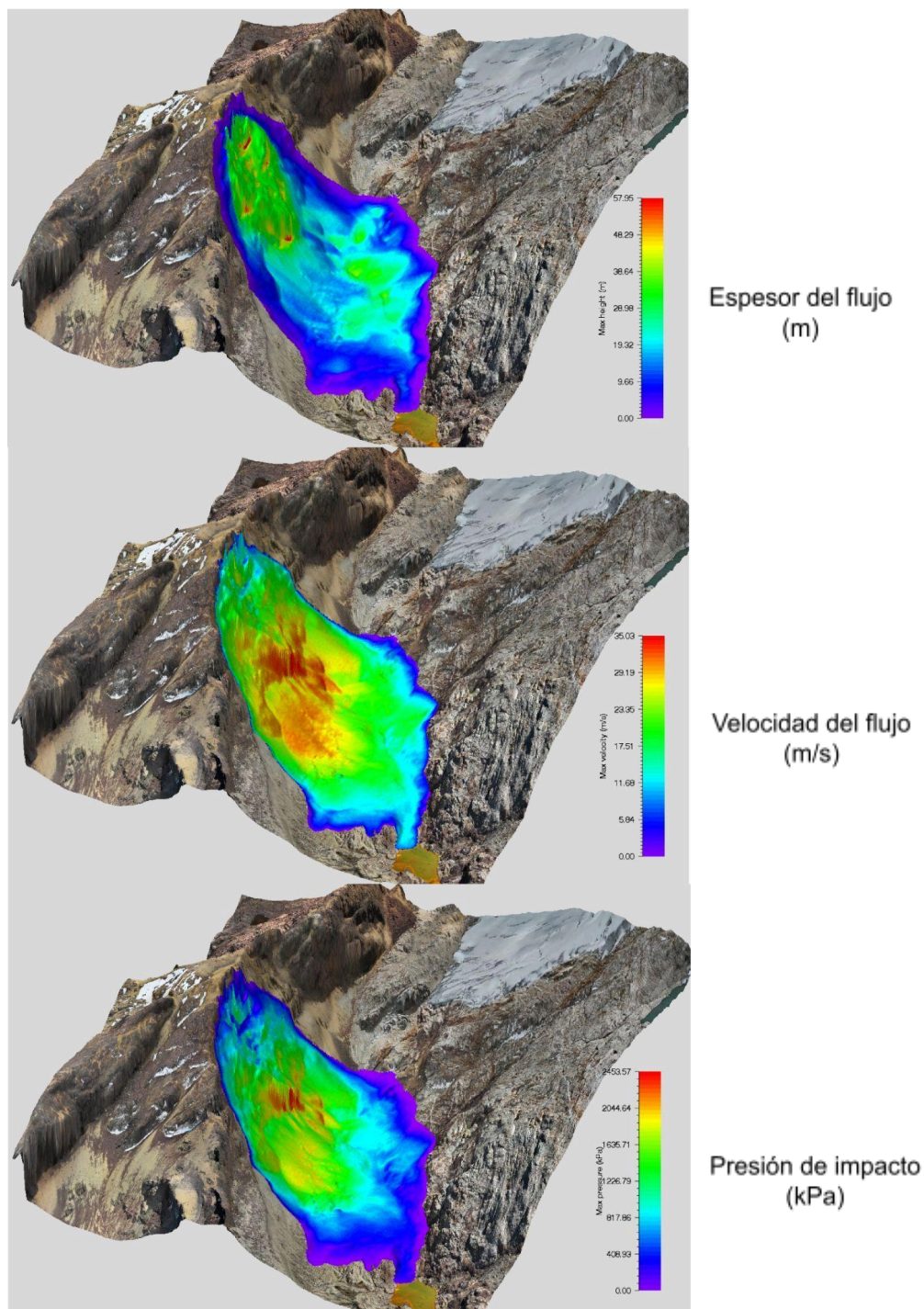
A partir de esta superficie crítica de $37,997.17 \text{ m}^2$ se tiene un $FS = 1.224$, se obtuvo un volumen de $828,467.24 \text{ m}^3$, mediante el método Equilibrio Límite Generalizado (GLE) bajo condiciones pseudo estáticas.

7.3. Movimiento en masa

7.3.1 Modelamiento del desprendimiento de roca

Los resultados del modelamiento dinámico del desprendimiento y/o caída de rocas con un volumen de 828,467 m³ muestra el impacto en la laguna B (Ver figura 18). Los resultados también muestran que la velocidad de impacto es de 4.3 a 8.6 m/s, un espesor de flujo de 2 m y una presión de impacto de 148 kPa. La figura 18 muestra el espesor de flujo en metros, la velocidad en m/s y presión de impacto en kPa.

Figura 18: Modelamiento del potencial desprendimiento o caída de rocas.



8. CONCLUSIONES

- El mayor volumen potencialmente inestable de desprendimiento de roca del macizo rocoso al sur del nevado Vallunaraju es de 828,467.24 m³, considerando la intervención de 12 grietas identificadas superficialmente (con una estación de control estructural in situ) y estimándose una superficie de falla con una extensión de 37,997.17 m².
- Los resultados del modelamiento del comportamiento del mayor volumen potencialmente inestable de desprendimiento de roca muestran un impacto sobre la laguna B, con velocidad de impacto entre 4.3 a 8.6 m/s, espesor de flujo promedio de 2 m y presión de impacto en 148 kPa.
- El escenario crítico de desprendimiento de roca inestable tiene el potencial de impactar sobre la laguna B, cuyo volumen actual se ha reducido, de manera que se podría generar un aluvión de menor magnitud que alcance la quebrada Llaca. En este escenario la infraestructura expuesta comprende la carretera a la laguna Llaca y las tuberías de abastecimiento de agua. Además, se podría incrementar el embalse reciente en la quebrada Llaca.
- Se confirma el peligro latente de desprendimiento de roca y aluvión de menor magnitud por desborde de la laguna B. Adicionalmente, a nivel de la subcuenca Casca, se mantienen las conclusiones de peligro de aluvión de mayor magnitud por desborde de la laguna Llaca o de las lagunas en contacto con el glaciar Vallunaraju identificado en la “Evaluación del peligro de aluvión por desborde de laguna glaciar en la subcuenca Casca”¹.

9. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados del análisis del estado actual del macizo rocoso en la zona periglacial al sur del nevado Vallunaraju, se recomienda:

- Señalizar la zona de peligro por desprendimiento de roca y la zona de peligro de aluvión por desborde la laguna B, instalando paneles de advertencia en el tramo vulnerable de la carretera de acceso hacia la laguna Llaca, al igual que en el sendero de trekking, a fin de salvaguardar la integridad de los visitantes y/o transeúntes.
- Profundizar el canal de desfogue de las lagunas C y D para la reducción controlada del nivel de agua, cuyos trabajos se deben realizar sin el uso de explosivos por ser una zona restringida dentro del Parque Nacional de Huascarán.
- Remover el material del depósito aluvional que genera el represamiento del cauce en la quebrada Llaca. Dado que la zona se encuentra susceptible a recibir nuevos aportes de masa ante un posible nuevo aluvión, la acumulación adicional de detritos retendría un volumen de mayor agua, generando un peligro secundario.

¹ Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12748/668>

A nivel de la subcuenca Casca, se mantienen las recomendaciones para la gestión del riesgo glaciar detalladas en la “Evaluación del peligro de aluvión por desborde de laguna glaciar en la subcuenca Casca”², entre ellas cabe destacar:

- Implementar una estación de monitoreo en tiempo real del peligro de desborde de la laguna Llaca y de las lagunas en contacto con el glaciar Vallunaraju, como parte del Centro Nacional de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (CENMGEM).
- Implementar un Sistema de Alerta Temprana (SAT) por parte de la Municipalidad distrital de Independencia en coordinación con la Municipalidad Provincial de Huaraz y el Gobierno Regional de Ancash.
- Realizar simulacros y simulaciones en la subcuenca del río Casca con la implementación de los mapas de zonas seguras y rutas de evacuación ante aluviones por parte de la Municipalidad distrital de Independencia con la finalidad de sensibilizar y concientizar a la población ante el peligro latente en dicha zona.

10. REFERENCIAS

Autoridad Nacional del Agua. (2025, 7 de mayo). Mapa Batimétrico de la laguna 1376958-2 [Mapa].

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

Canadian Dam Association (2007). *Dam Safety Guidelines*.

Cusicanqui, D., Loarte, E., Gómez, W. et al. Small event, big impact: insights from Vallunaraju cascade event on April 28, 2025. *npj Nat. Hazards* 3, 51 (2026).
<https://doi.org/10.1038/s44304-026-00229-0>

INAIGEM & INGEMMET. (2025) *Inspección técnica del aluvión en la subcuenca Casca debido al desborde de lagunas glaciares el 28 de abril de 2025*.
<https://hdl.handle.net/20.500.12748/633>.

Instituto Geofísico del Perú (IGP). Re-evaluación del Peligro Sísmico probabilístico para el Perú. 2014.

Kliche, C. A. (1999). *Rock slope stability. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*.

Lei, Y., Gardner, A. and Agram, P. (2021). Autonomous Repeat Image Feature Tracking (autoRIFT) and Its Application for Tracking Ice Displacement. *Remote Sensing*, 13(4), p.749.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente*. Reglamento Nacional de Edificaciones. Resolución Ministerial N.º 355-2018-VIVIENDA.

² Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12748/668>