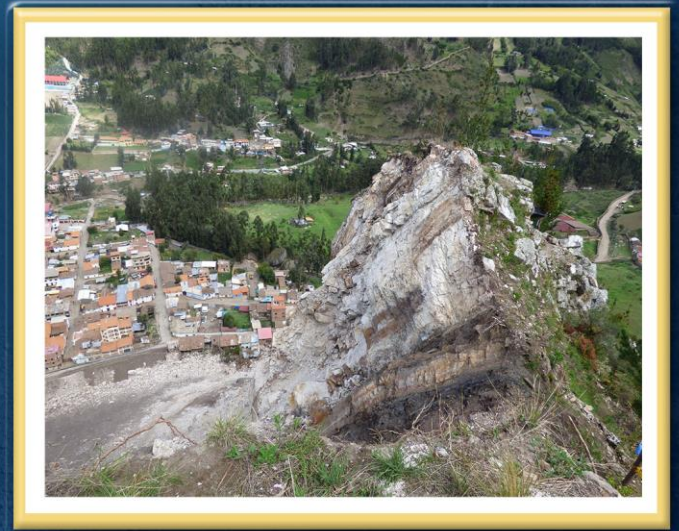


DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7371

EVALUACIÓN INGENIERO - GEOLÓGICA EN EL CERRO CRUZ DE SHALLAPA

Departamento Áncash
Provincia Huari
Distrito Chavín de Huántar



ABRIL
2023

EVALUACIÓN INGENIERO – GEOLÓGICA EN EL CERRO CRUZ DE SHALLAPA

Distritos Chavín de Huántar, provincia Huari, departamento Áncash

Elaborado por la Dirección
de Geología Ambiental y
Riesgo Geológico del
Ingemmet

Equipo de investigación:

Guisela Choquenaira Garate

Richard Huayta Pacco

Mauricio Núñez Peredo

Gonzalo Luna Guillen

Ely Ccorimanya Challco

Lionel Fidel Smoll

Revisión externa:

Compañía Minera Antamina S.A.

Referencia bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2023). Evaluación ingeniero – geológica en el cerro Cruz de Shallapa. Distrito Chavín de Huántar; provincia Huari; departamento Áncash. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7371, 68 p.

ÍNDICE

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Objetivos del estudio	6
1.2. Alcances	6
1.3. Antecedentes y trabajos anteriores	6
1.4. Aspectos generales	7
1.4.1. Ubicación	7
1.4.2. Accesibilidad	9
1.4.3. Población	9
1.4.4. Clima.....	9
2. DEFINICIONES.....	10
3. ASPECTOS GEOLÓGICOS	11
3.1. Contexto estructural	14
4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	15
4.1. Índice Topográfico de Humedad	15
5. ACTUALIZACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS.....	17
5.1. Derrumbe del cerro Cruz de Shallapa	17
5.2. Deslizamiento antiguo en proceso de reactivación en el cerro Cruz de Shallapa	17
6. INVESTIGACIONES GEOMECAÑICAS BÁSICAS	18
6.1. Caracterización de la masa rocosa	18
6.2. Clasificación geomecánica de la masa rocosa	21
6.3. Zonificación geomecánica	22
6.4. Resistencia de la roca	22
7. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD	23
7.1. Identificación de los modos de falla	26
7.1.1. Análisis por rotura tipo cuña	26
7.2. Selección y utilización de los métodos de cálculo.....	27
7.3. Condiciones de análisis	27
7.4. Análisis de estabilidad	28
7.5. Evaluación de los factores de influencia	28
7.6. Evaluación de resultados	29
8. MODELAMIENTO DE CAÍDA DE ROCAS.....	33
8.1. Análisis de datos	33
8.2. Resultados.....	34
9. ALTERNATIVAS DE MANEJO DEL PROBLEMA	39
9.1. Problemática.....	39
9.2. Manejo del problema	39

10.	CONCLUSIONES.....	43
11.	RECOMENDACIONES.....	44
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	46
	ANEXO 1: REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	49
	ANEXO 2: MAPAS.....	54
	ANEXO 3: PERFILES GEOLÓGICOS.....	59
	ANEXO 4: PROPUESTAS PARA ESTABILIZAR LA LADERA DEL CERRO SHALLAPA	63

RESUMEN

El presente informe es el resultado del estudio ingeniero-geológico, realizado en el cerro Cruz de Shallapa, perteneciente a la jurisdicción distrital de Chavín de Huántar; en la provincia Huari, departamento Áncash. Con este trabajo, el Ingemmet, cumple con una de sus funciones que consiste en brindar asistencia técnica en peligros geológicos, para los tres niveles de gobierno.

El 30 de junio del 2022, en la ladera noreste del cerro Cruz de Shallapa ocurrió un movimiento en masa tipo derrumbe que movilizó aproximadamente 58 mil m³ de rocas y detritos. Afectó un área aproximada de 2.5 Ha; 42 viviendas destruidas, pérdida de 2.07 Ha de cultivo, 450 m de canal de riego, entre otros daños a la propiedad.

En el contexto geológico, la deformación tectónica - estructural del área, de dirección NO-NE, con la presencia de plegamientos (anticlinales y sinclinales), lineamientos, fallas y la zona de contacto entre las formaciones Chimú (Ki-Chi) y Oyón (Ki-Oy); han condicionado el intenso fracturamiento de las rocas, favoreciendo de esa manera, la ocurrencia del derrumbe en el cerro Cruz de Shallapa.

Morfológicamente, el área posee una topografía accidentada, definido por relieves modelados en rocas sedimentarias de las formaciones Oyón y Chimú, conformada por areniscas cuarzosas grises a blancas, de grano fino a medio, intercaladas con limoarcillitas negras y grises, y niveles de carbón; dispuestos en dirección norte-sur, e inclinadas de 30° a 85° (muy fuerte a muy escarpada), lo que contribuyó en el desarrollo del evento.

Para la caracterización del macizo rocoso se realizó el mapeo geomecánico considerando cinco estaciones, distribuidas en la corona y flancos del derrumbe; donde la masa rocosa en conjunto (areniscas intercaladas con lutitas y limolitas), de acuerdo a los criterios de clasificación geomecánica vigentes muestra la calidad del macizo rocoso como baja, por lo que requieren trabajos de corrección y protección. Así mismo, según la evaluación de las condiciones de estabilidad, a nivel global, el cerro Cruz de Shallapa presenta una probabilidad del 60% de rotura tipo cuña entre el talud y las familias de discontinuidades 2 y 3.

En el análisis de estabilidad de taludes, se calculó un factor de seguridad estático y seudoestático, tomando en cuenta las propiedades de la roca (cohesión y ángulo de fricción), las características geométricas del talud y las tres litologías con sus respectivas propiedades mecánicas y físicas. Para condiciones estáticas, los resultados obtenidos muestran valores entre 0.65 y 1.07; mientras que para condiciones pseudoestático muestran valores inferiores a 1.

El modelo de caídas de rocas realizado con el software RAMMS-Rockfall muestra que los bloques desprendidos desde la parte alta del cerro Shallapa, pueden sobrepasar el muro de contención (arrimado de rocas) de aproximadamente 5 m de altura, lo que afectaría alrededor de 10 viviendas ubicadas en la calle Wiracocha. Así mismo, la trayectoria de algunos bloques llegaría a impactar en los Jr. Tupac Yupanqui y Mayta Capac, sin afectación directa al Centro Arqueológico de Chavín de Huántar.

En ese contexto, el manejo del problema propuesto en el presente estudio para la estabilización definitiva del talud en el cerro Cruz de Shallapa, contempla realizar un soil nailing (claveteado de rocas y/o suelos) desde la cabecera hasta el pie del talud – Jirón Wiracocha, malla electrosoldada y shotcrete definitivo. Así mismo, en la parte media - baja implementar un sistema de banquetas con concreto ciclópeo. Finalmente, colocar una viga de apoyo y drenes distribuidos uniformemente. En este tema, es importante que los especialistas, de acuerdo a las técnicas existentes, determinen la extensión del procedimiento.

1. INTRODUCCIÓN

El Ingemmet, ente técnico-científico desarrolla a través de los proyectos de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR) la “Evaluación de peligros geológicos a nivel nacional (ACT. 11)”, contribuye de esta forma con entidades gubernamentales en los tres niveles de gobierno mediante el reconocimiento, caracterización y diagnóstico del peligro geológico en zonas que tengan elementos vulnerables.

Dentro del convenio de Cooperación Interinstitucional entre **La Compañía Minera Antamina S.A.** e **INGEMMET**, con la finalidad de fortalecer la cultura de prevención, así como la cooperación técnica y proyectos de investigación o asesoría especializada compatible con las funciones y competencias de ambas partes, se realizó la evaluación ingeniero geológica en el Cerro Cruz de Shallapa, del 8 al 15 de febrero del presente año.

El trabajo involucra el análisis ingeniero geológico y geotécnico, con miras a las recomendaciones de intervención en los problemas de estabilización del cerro Cruz de Shallapa que compromete la seguridad física de un sector del distrito de Chavín de Huántar.

Este informe se pone a consideración de la Municipalidad Distrital de Chavín de Huántar y entidades encargadas en la gestión del riesgo de desastres, donde se proporcionan resultados de la evaluación y recomendaciones para la mitigación y reducción del riesgo, a fin de que sea un instrumento técnico para la toma de decisiones.

1.1. Objetivos del estudio

Realizar la evaluación ingeniero geológica del cerro Cruz de Shallapa y su entorno, incluyendo la identificación de rasgos estructurales y mecanismos de movimiento del sitio; así como la caracterización geomecánica del macizo rocoso comprometido en el derrumbe.

1.2. Alcances

El estudio permitirá conocer las características geomecánicas del macizo rocoso, con miras a presentar las recomendaciones de intervención para su estabilización.

1.2.1. Investigaciones básicas

- Caracterización litológica y estructural de la masa rocosa involucrada, en base a un mapeo detallado.
- Evaluación de las propiedades físico - mecánicas de la roca, mediante ensayos in-situ, toma de muestras para los respectivos análisis de laboratorio y técnicas alternativas disponibles.
- Determinar la calidad de la masa rocosa involucrada en el talud del área de estudio (Clasificación Geomecánica).
- Zonificación geomecánica del área de estudio.
- Evaluación de los factores detonantes que influyen sobre la estabilidad (precipitaciones pluviales, sismos, actividad antrópica, entre otros)

1.3. Antecedentes y trabajos anteriores

Entre los principales estudios realizados a nivel local y regional en el distrito de Chavín de Huántar, se tienen los siguientes informes técnicos:

- A. Informe técnico A7280. “Evaluación de peligro geológico en el cerro Cruz de Shallapa, y su influencia en la localidad de Chavín de Huántar” (Choquenaira, G. y Núñez, J. 2022). Describe el derrumbe suscitado el 30 de junio del 2022, en la ladera noreste del cerro Cruz de Shallapa, el cual movilizó rocas y detritos involucrando un volumen de 58 mil m³, afectó un área de 2.5 ha; 42 viviendas destruidas, 2.07 ha de pérdida de terrenos de cultivo, 450 m del canal de riego, entre otros daños a la propiedad, por lo cual se considera como **Zona Crítica**.
- B. Informe técnico. Movimientos en masa en la cuenca del río Huachecsa, Chavín de Huántar (Fidel, S., et al 2007). Describe la cartografía de peligros geológicos a escala 1:25 000, donde identificaron deslizamientos, derrumbes en la ladera noreste del cerro Cruz de Shallapa (figura 1), Así mismo, identificaron flujos de detritos que afectaron la localidad de Chavín de Huántar y el centro Arqueológico del mismo nombre, presentando hasta tres eventos de gran magnitud.
- C. Boletín N° 38, serie C: Riesgos Geológicos en la Región Áncash, realizado por Zavala, B. et al 2009; mencionan que el aluvión del 17 de enero de 1945, afectó parcialmente al complejo arqueológico de Chavín de Huántar y ocasionó 400 muertos. Este sector es considerado como de alta susceptibilidad a movimientos en masa y como zona crítica a peligros geológicos.

El estudio también realiza un análisis de susceptibilidad a movimientos en masa presentado en un mapa a escala 1: 250 000, donde el cerro Cruz de Shallapa y la localidad de Chavín de Huántar, se encuentran en zona de susceptibilidad Muy Alta. Entendiéndose, la susceptibilidad a movimientos en masa como la propensión que tiene una determinada zona a ser afectada por un determinado proceso geológico (movimiento en masa), expresado en grados cualitativos y relativos.

- D. Informe técnico. Primer reporte “Zonas críticas por peligro geológico y geohidrológico en la región Áncash” (Zavala, 2007), determinó que el valle del río Mosna hasta la localidad de Puchca como **Zona Crítica (44)**, debido a la peligrosidad que representa ante la ocurrencia de derrumbes, deslizamientos y flujo de detritos, con evidencia de aluviones históricos en el valle.

1.4. Aspectos generales

1.4.1. Ubicación

El área evaluada se encuentra en el cerro Cruz de Shallapa, en la margen izquierda de los ríos Mosna y Huachecsa, a 9.5 km, al suroeste del distrito de San Marcos. Políticamente, pertenece al distrito de Chavín de Huántar, provincia de Huari, departamento de Áncash (figura 2); en las siguientes coordenadas UTM (WGS84 – Zona 18 s) (tabla 1):

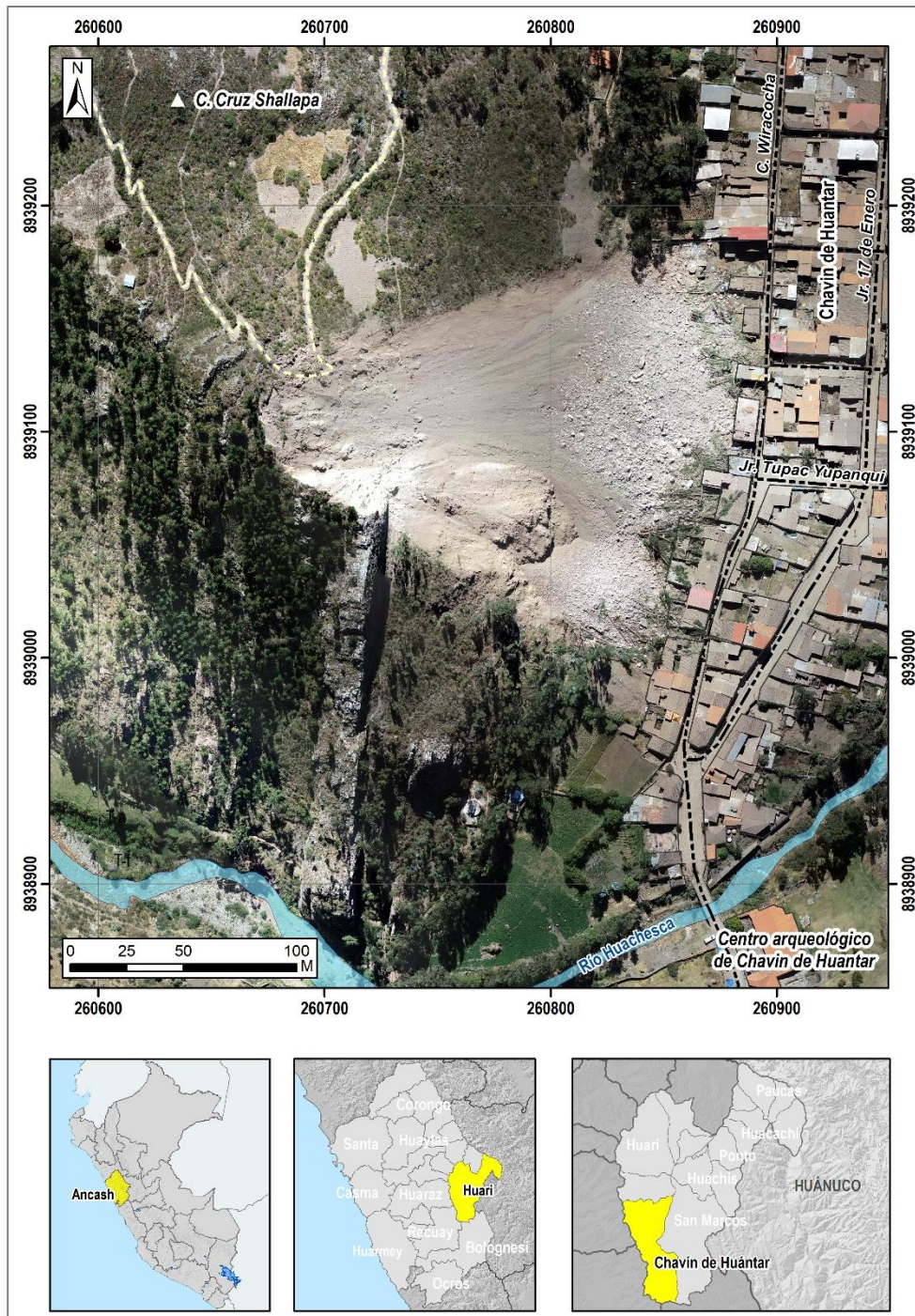


Figura 1. Mapa de ubicación del área evaluada.

Tabla 1. Coordenadas del área evaluada

N°	UTM - WGS84 - Zona 18L		Geográficas	
	Este	Norte	Latitud	Longitud
1	260500	8939450	-9.587360°	-77.182109°
2	261050	8939450	-9.587392°	-77.177101°
3	261050	8938900	-9.592363°	-77.177132°
4	260500	8938900	-9.592331°	-77.182141°
COORDENADA CENTRAL DE LA ZONA EVALUADA O EVENTO PRINCIPAL				
C	260775	8939253	-9.589147°	-77.179616°

1.4.2. Accesibilidad

Se accede por vía terrestre desde la ciudad de Lima (Ingemmet-sede central), mediante la siguiente ruta (cuadro 1):

Cuadro 1. Rutas y accesos al área evaluada.

Ruta	Tipo de vía	Distancia (km)	Tiempo estimado
Lima – Catac	Carretera asfaltada	367	6h 18 minutos
Catac – Chavín de Huántar	Carretera asfaltada	67.2	1h 21 minutos

1.4.3. Población

Según Censo 2017 de vivienda y población (INEI), la distribución poblacional en el distrito de Chavín de Huántar asciende a 2384 Habitantes y 881 viviendas censadas, sin embargo, en el poblado de Chavín de Huántar alberga una población de 800 habitantes y 600 viviendas (cuadro 2).

Cuadro 2. Distribución poblacional del distrito de Chavín de Huántar.

DISTRITOS	SECTORES	POBLACIÓN	VIVIENDA
CHAVIN DE HUANTAR	Chavín de Huántar	800	600

1.4.4. Clima

El tipo climático de la zona, según la clasificación de Kopen, corresponde a un clima “templado moderado lluvioso”, con inviernos secos, la temperatura máxima varía entre 16° a 20°, las mínimas varían entre 4° y 8°, siendo la temperatura media anual de 18°. La precipitación anual entre en el periodo septiembre – mayo varía entre 1200 a 1400 mm (Fuente: SENAMHI).

2. DEFINICIONES

En el presente glosario se describe según los términos establecidos en el Proyecto Multinacional Andino - Movimientos en Masa GEMMA, del PMA: GCA:

AGRIETAMIENTO: Abertura profunda del suelo causada por esfuerzos de tensión o de compresión sobre masas de suelo o roca, o por desecación de materiales arcillosos.

CORONA: Zona adyacente arriba del escarpe principal de un deslizamiento que prácticamente no ha sufrido desplazamiento ladera abajo. Sobre ella suelen presentarse algunas grietas paralelas o semi paralelas conocidas como grietas de tensión o de tracción.

DERRUMBE: Desplome de una masa de roca, suelo o ambos por gravedad, sin presentar una superficie o plano definido de ruptura, y más bien una zona irregular. Se producen por lluvias intensas, erosión fluvial; rocas muy meteorizadas y fracturadas.

ESCARPE: sin.: escarpa. Superficie vertical o semi vertical que se forma en macizos rocosos o de depósitos de suelo debido a procesos denudativos (erosión, movimientos en masa, socavación), o a la actividad tectónica. En el caso de deslizamientos se refiere a un rasgo morfométrico de ellos.

FRACTURA: Corresponde a una estructura de discontinuidad menor en la cual hay separación por tensión, pero sin movimiento tangencial entre los cuerpos que se separan.

METEORIZACIÓN: Se designa así a toda alteración que modifican las características físicas y químicas de las rocas y suelos. La meteorización puede ser física, química y biológica. Los suelos residuales se forman por la meteorización in situ de las rocas subyacentes.

RETROGRESIVO: Tipo de actividad de un movimiento en masa, en el cual la superficie de falla se extiende en la dirección opuesta al movimiento del material desplazado (Cruden y Varnes, 1996).

TALUD: Superficie artificial inclinada de un terreno que se forma al cortar una ladera, o al construir obras como por ejemplo un terraplén.

VUELCO: Movimiento en masa en el cual hay una rotación generalmente hacia delante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas.

ZONAS CRÍTICAS: Son zonas o áreas con peligros potenciales de acuerdo a la vulnerabilidad asociada (infraestructura y centros poblados), que muestran una recurrencia, en algunos casos, entre periódica y excepcional. Algunas pueden presentarse durante la ocurrencia de lluvias excepcionales y puede ser necesario considerarlas dentro de los planes o políticas nacionales, regionales y/o locales sobre prevención y atención de desastres.

3. ASPECTOS GEOLÓGICOS

El análisis ingeniero - geológico realizado en las laderas del cerro Cruz de Shallapa, se desarrolló en base a la información obtenida en campo y la Carta Geológica del cuadrángulo de Recuay – hoja 20-i, (Cobbing et al., 1996), a escala 1/100 000, donde se presentan rocas sedimentarias del cretácico y depósitos coluviales, deluviales y aluviales del Cuaternario, éstos últimos a través de la cartografía y en base a la interpretación de imágenes satelitales, fotografías aéreas se completa en el mapa geológico, presentado en el mapa 1: Anexo 2.

La gran deformación tectónica - estructural del área, de dirección NO-NE, con la presencia de plegamientos (anticlinales y sinclinales), lineamientos, fallas y la zona de contacto entre las formaciones Chimú ((Ki-Chi) y Oyón (Ki-Oy); han condicionado el intenso fracturamiento de las rocas. Con la información obtenida podemos definir que la estratificación tiene tendencia norte - sur, con un cambio de inclinación hacia NW, lo cual indica que estamos en el eje de un anticlinal tumbado, con inclinaciones que varían de 65° a 85° en la cara libre del derrumbe. Sin embargo, más al norte los estratos presentan una inclinación promedio de 30° en contra de la pendiente.

Localmente, el derrumbe del cerro Shallapa involucra dos unidades geológicas, la primera y más antigua (Fm. Oyón) constituida por bancos delgados de areniscas cuarzosas grises a veces blancas, de grano fino a medio, ocasionalmente gruesas; se intercalan con limoarcillitas negras y grises y niveles de carbón. La parte superior, conformada por bancos de areniscas cuarzosas son más frecuentes, gruesas y se intercalan con niveles de carbón en paquetes de hasta 1.5 m y son explotados artesanalmente. Estas rocas se encuentran muy fracturadas, perturbadas y desintegradas (figura 2). Además, los niveles carbonosos y la mala competencia geomecánica de estos materiales la hacen muy susceptible a formar nuevos movimientos en masa, como deslizamientos y /o derrumbes.

Suprayaciendo a la Formación Oyón, se tienen rocas de la Formación Chimú (figura 3), compuesta por bancos medianos a gruesos, de areniscas cuarzosas blancas de grano fino a medio, intercaladas con limoarcillitas carbonosas y niveles discretos de carbón. Hacia la parte superior está compuesta por bancos gruesos de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, frecuentemente con laminaciones sesgadas y horizontales. Se presenta moderadamente meteorizadas y de mediano a muy fracturadas, con 3 familias principales de discontinuidades, generando bloques sueltos entre 0.2 m a 1.5 m. De acuerdo a sus características ingeniero – geológicas, en conjunto, se considera como roca de mala calidad geotécnica (fotografía 1).

Por otro lado, también se tienen depósitos coluviales y coluvio-deluviales, el primero corresponde a fragmentos de roca sedimentaria transportados por acción de la gravedad al pie del cerro Shallapa, compuestos por bloques angulosos de hasta 2.5 m, gravas, arenas, limos -arcillas.

El depósito coluvio deluvial se localiza adyacente al derrumbe del cerro Shallapa, de forma caótica originada por la ocurrencia de eventos antiguos y depositada por acción de la gravedad y acción de las aguas de escorrentía. Están compuestos por fragmentos líticos, angulosos a subangulosos con diámetros que varían de 0.02 a 0.15 m envueltos en una matriz de arenas medias a gruesas con contenidos de limos y arcillas.

Presentan mediana cohesión, plasticidad media, son inestables, de malas características geotécnicas y se consideran suelos no competentes, susceptibles a la generación de movimientos en masa. Por las evidencias que presentan se cataloga este depósito como una zona inestable.

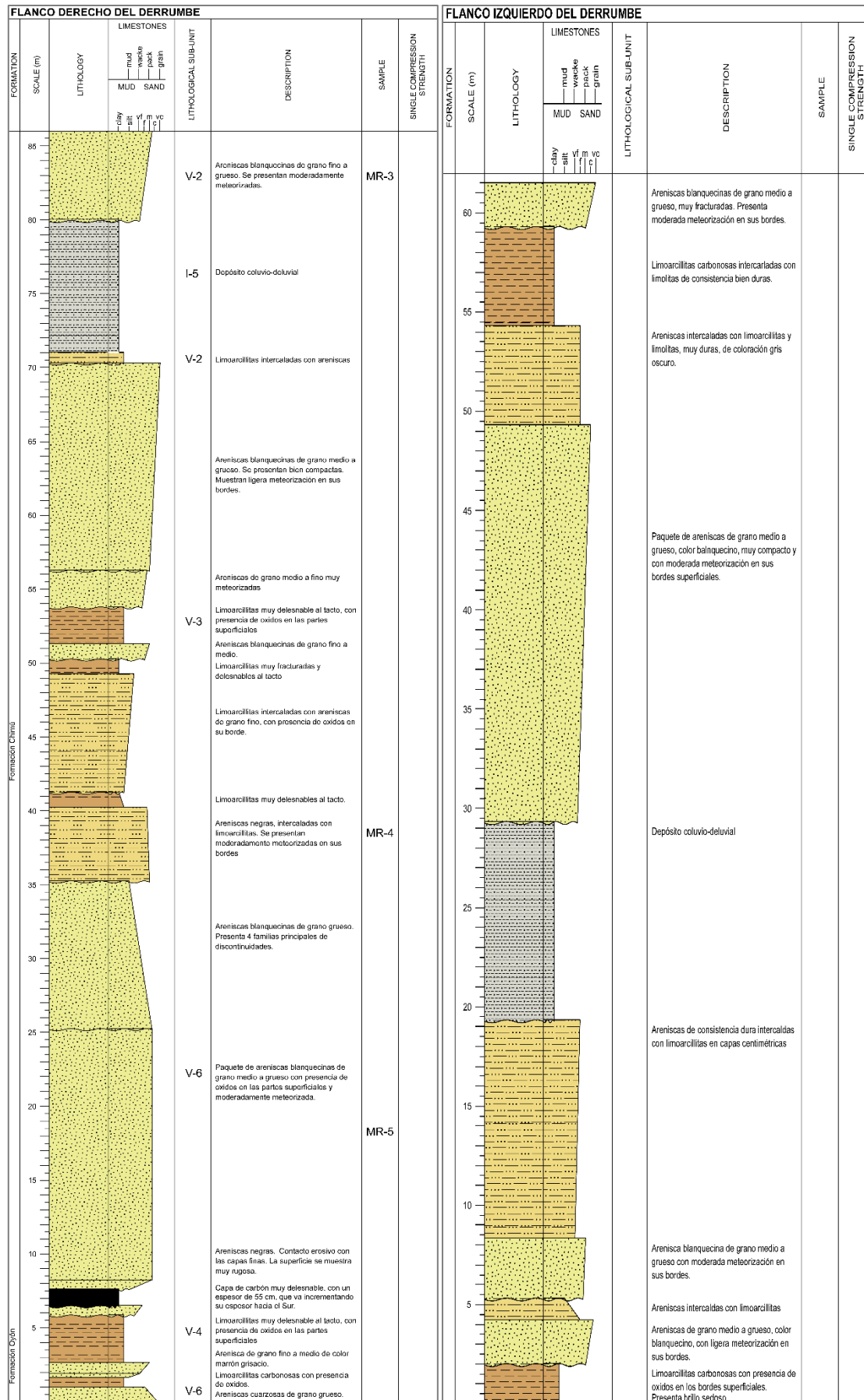


Figura 2. Columnas estratigráficas levantadas en el flanco derecho e izquierdo del derrumbe del cerro Shallapa.

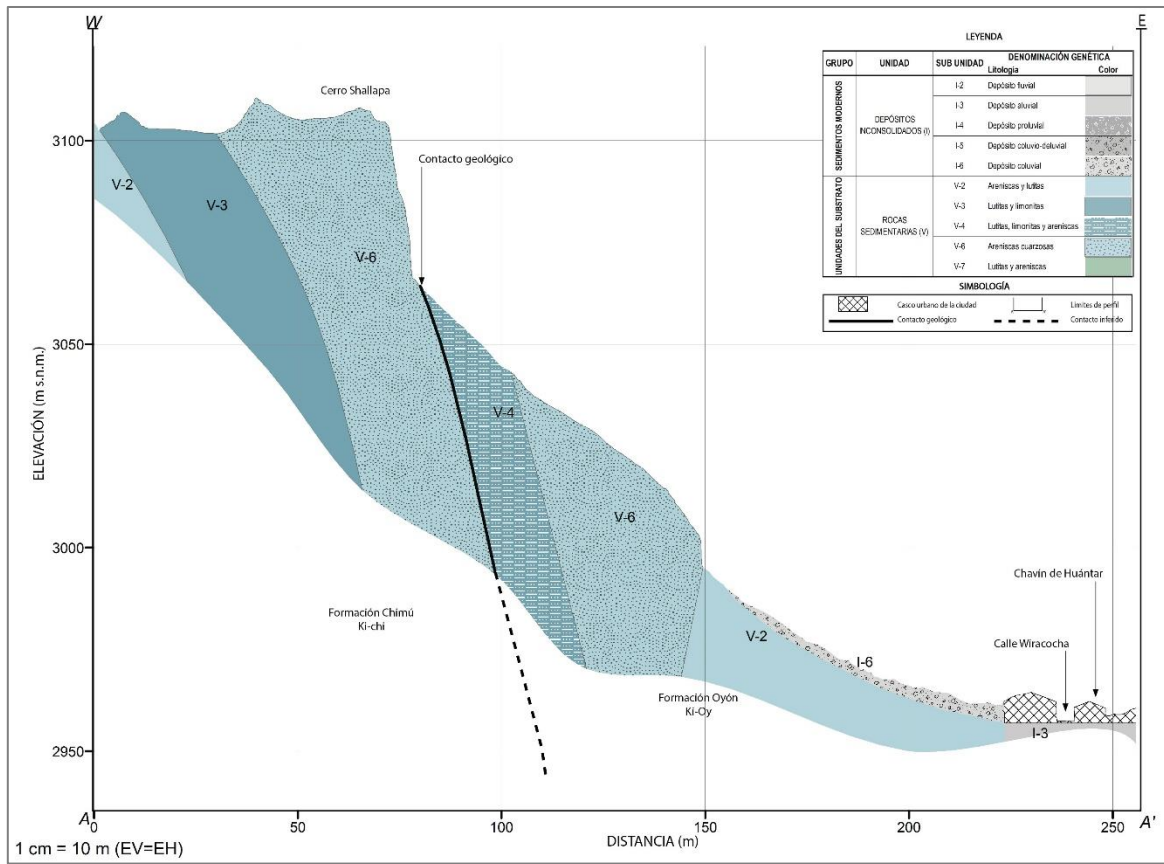


Figura 3. Perfil litológico correspondiente al flanco derecho del derrumbe del cerro Shallapa.



Fotografía 1. Areniscas intercaladas con lutitas y limolitas muy fracturadas.

3.1. Contexto estructural

Estructuralmente el área paralela al cerro Shallapa se encuentra en una cuenca Jurásica-Cretácica conformada principalmente por unidades geológicas de edad Cretácico-Temprano como la Formación Chicama y Grupo Goyllarisquiza (Formación Chimú).

La zona de transición entre pliegues y fallas corresponde a secuencias pelíticas del Jurásico Superior, secuencias pelíticas y siliciclasticas del Cretácico Inferior (Formación Oyón y Grupo Goyllarisquiza respectivamente- Formación Chimú), unidas del Batolito de la Cordillera Blanca y depósitos glaciares. Y finalmente la zona rígida y con fallas de gran extensión.

La zona plegada, fallada y sobreescorrida; se localiza al este del cuadrángulo de Recuay. Los plegamientos (sinclinales y anticlinales) tienen orientaciones andinas NO-NE (rumbo andino) y pueden abarcar grandes kilómetros; ocurren tanto en niveles pelíticos del Grupo Chicama (Jurásico superior) y Oyón (cretácico inferior); como en las secuencias siliciclasticas del Grupo Goyllarisquiza (Cretácico inferior) y son evidencia de una compresión NE-SO muy intensa. Muchos de los pliegues se encuentran cortados por fallas verticales y/o normales de rumbo trasandino que pone en contacto secuencias cretácicas y paleógenas.

Las fuerzas distensiva y comprensiva de estas fallas habrían modelado la gran variedad de estructuras geológicas presentes de manera local en el área de estudio, generando así plegamientos (anticlinorios) y condicionando el grado de fracturamiento de las rocas (figura 4).

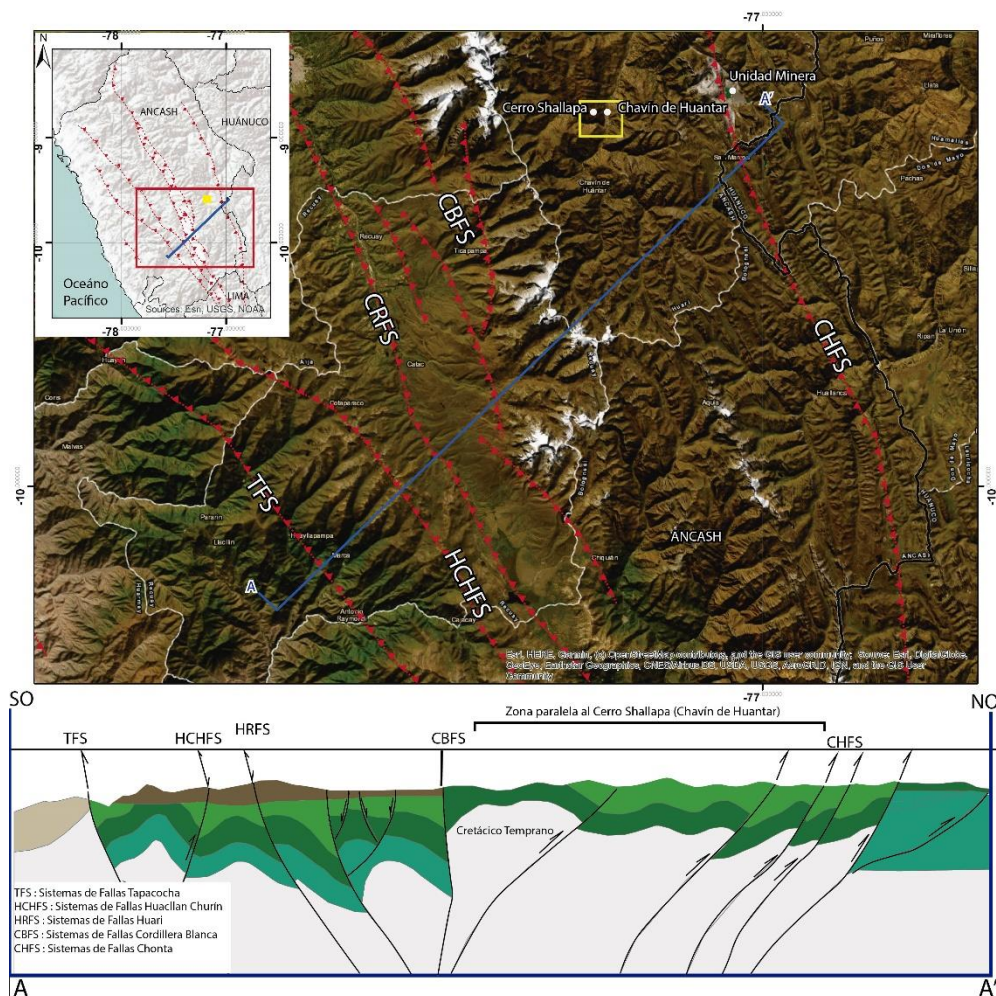


Figura 4. Principales fallas regionales con influencia las condiciones estructurales del área de inspección. Tomado de Romero, 2008.

4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

El área posee una topografía accidentada, definida por relieves modelados en rocas sedimentarias de las formaciones Oyón y Chimú, conformada por areniscas cuarzosas, intercaladas con lutitas y limo arcillitas de color negro, con laderas de pendientes que varían de 30° a 85°, consideradas de muy fuerte a muy escarpada, lo que coadyuvó en la ocurrencia del derrumbe.

Localmente, la ladera noreste del cerro Cruz de Shallapa, presenta una morfología abrupta debido a la presencia de eventos antiguos, que configuraron el actual relieve.

En el anexo 02, se presenta las pendientes del actual relieve donde se produjo el derrumbe del 30 de junio en el cerro Cruz de Shallapa, elaborado en base al modelo de elevación digital de 0.07 m de resolución, obtenido a través de fotogrametría (Dron). Se presentan con mayor predominio laderas con pendientes muy fuertes (25°-45°) a escarpadas (>45°), con un cambio abrupto a terrenos de pendientes moderadas (5°-15°) a ligeramente inclinado (1°-5°), en esta última zona se encuentra asentadas las viviendas de la localidad de Chavín de Huántar.

Actualmente, la cara del derrumbe posee una pendiente promedio de 35°, mientras que el afloramiento sub verticalizado que circunscribe a la localidad de Chavín de Huántar, presenta pendientes que varían de 65° a 85°.

Así también, se tienen acumulaciones en la ladera adyacente al cerro Shallapa, originadas por procesos de movimientos en masa antiguos y recientes, de composición litológica homogénea; con materiales inconsolidados a ligeramente consolidados, de corto a mediano recorrido. Su morfología es usualmente convexa y su disposición es semicircular a elongada en relación con la zona de arranque o despegue del movimiento en masa.

4.1. Índice Topográfico de Humedad

El índice topográfico de humedad (TWI) permite identificar los lugares potenciales donde se concentra la humedad o las zonas de acumulación de aguas de escorrentía superficial.

La obtención de este indicador fue realizada mediante una secuencia de análisis de modelos digitales de terreno (MDT) de alta resolución y precisión (obtenido de la fotogrametría del dron) y procesados en SAGA GIS.

Es así, que en la zona del derrumbe (figura 5) se observa la mayor cantidad de acumulación de agua, que discurren desde la zona de arranque y en varias direcciones, hasta el cuerpo del derrumbe; lo que sugiere que, en incrementos de precipitaciones pluviales, la posibilidad de un incremento de la inestabilidad y producirse nuevos desprendimientos es alta.

De la misma forma, las zonas de deslizamientos antiguos (margen izquierdo del derrumbe), muestran una importante cantidad de drenajes, que discurren ladera abajo en temporada de lluvias intensas. Esta área es muy importante ya que se presentan grietas tensionales debido al movimiento lento del deslizamiento producto de la gravedad. Se debe realizar obras de drenajes y/o sellado de grietas para evitar que la infiltración genere la reactivación de deslizamientos en la zona.

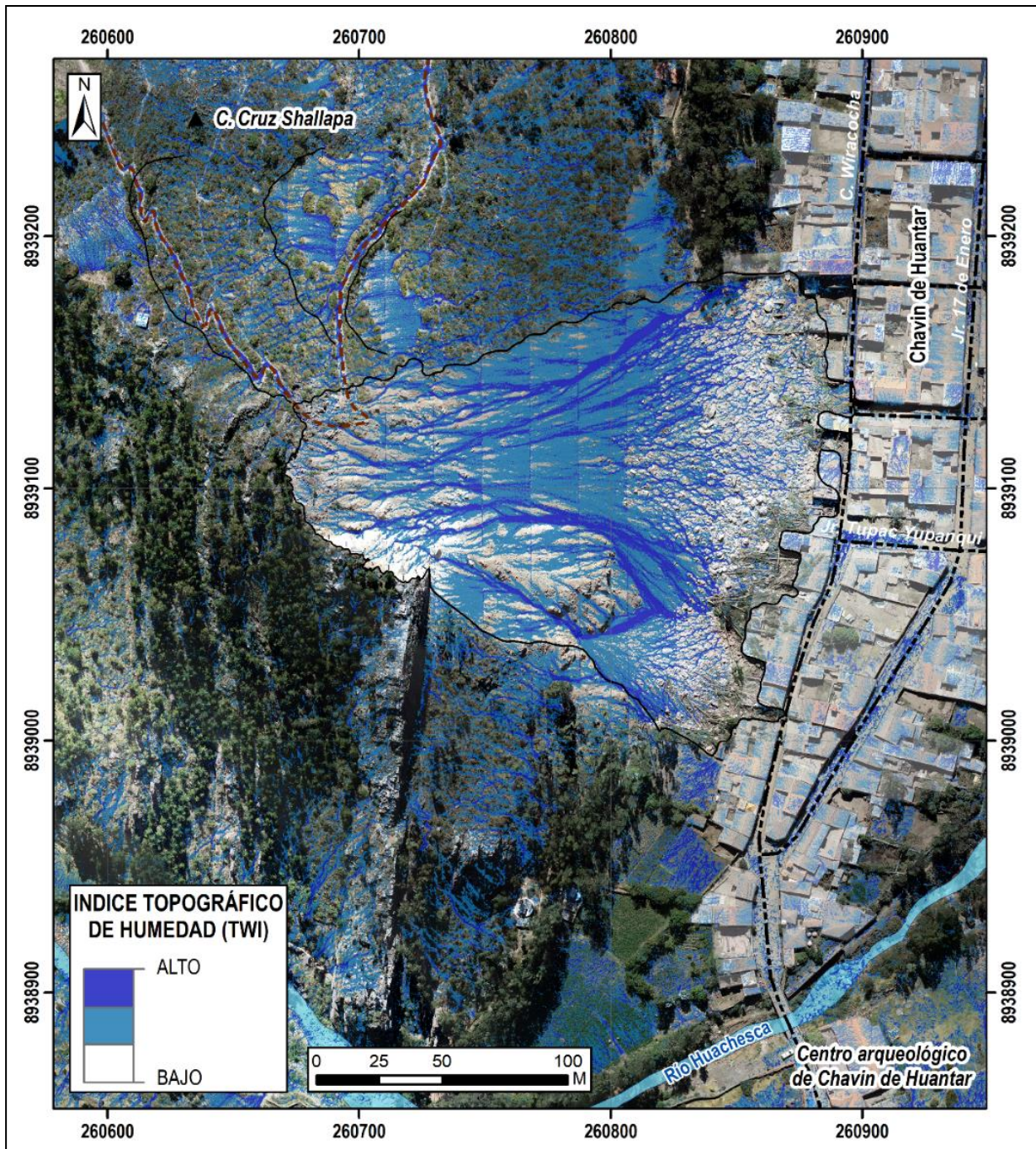


Figura 5: Mapa de la acumulación de agua (TWI) en el derrumbe del cerro Cruz Shallapa y alrededores.

5. ACTUALIZACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS

5.1. Derrumbe del cerro Cruz de Shallapa

El 30 de junio del 2022, en el cerro Shallapa se produjo un derrumbe (anexo 2), que movilizó aproximadamente 58 mil m³ de rocas y detritos y afectó un área aproximada de 2.5 Ha. Presenta un ancho promedio de 106 m y una distancia entre la zona de arranque y pie del derrumbe de 215 m. Dejando 42 viviendas destruidas, pérdida de 2.07 Ha de cultivo, 450 m de canal de riego. El evento continua activo y latente, muestra de ello son las constantes caídas de rocas (bloques de hasta 1.0 m) y material suelto.

En la corona del derrumbe aún se tiene material suelto inestable, con bloques de hasta 1.4 m, los cuales continuarán cayendo cuesta abajo, de producirse desprendimientos de estos bloques podría impactar contra las viviendas asentadas entre la calle Wiracocha y Jr. 17 de enero. Así también, parte del material dispuesto en el flanco izquierdo se desplazó cuesta abajo; sin embargo, aún se evidencia bloques, con diámetros de hasta 1.6 m, que también podrían ceder cuesta abajo, con muchas probabilidades de sobrepasar el muro de contención (arrimado de rocas), ubicado al pie del derrumbe.

En la zona media del derrumbe, la protuberancia rocosa fracturada (areniscas intercaladas con lutitas y limolitas) que desvió el depósito hacia el sureste, presenta de moderada a alta meteorización, con presencia de óxidos en las capas de lutitas limolitas; muy susceptible a la ocurrencia de un nuevo derrumbe.

Por otro lado, el deslizamiento adyacente al derrumbe se reactivó, evidenciado por los múltiples agrietamientos longitudinales y transversales. En el año 2022 se observó aperturas de hasta 60 cm producidos en el camino de herradura (ancho 1.5 m), a la actualidad las grietas incrementaron en ancho y profundidad, observándose 50 cm de este último.

Es importante mencionar que, en la zona posterior del derrumbe, con dirección a la quebrada Huachecsa, las laderas presentan ligeros movimientos, que se evidencian por la inclinación de los árboles, típicas de zonas de movimientos activos de laderas.

5.2. Deslizamiento antiguo en proceso de reactivación en el cerro Cruz de Shallapa

Adyacente al derrumbe se observó deslizamiento reactivado, su escarpe principal no se observa por estar erosionado y cubierto de vegetación, solamente se aprecia la cicatriz del escarpe principal.

En el cuerpo del deslizamiento se observó escarpes secundarios con saltos de hasta 1.5 m, cubiertos de vegetación. También se apreció lomeríos u ondulaciones que son propias del movimiento antiguo.

La forma de este deslizamiento es de forma de herradura y de forma alargada, estrechándose aguas abajo.

El material del deslizamiento está conformado por bloques (10%), grava (20%), arenas (40%) y limo-arcilla (30%).

6. INVESTIGACIONES GEOMECÁNICAS BÁSICAS

Las investigaciones geomecánicas se componen de estaciones geomecánicas, análisis de laboratorio de muestras de suelo y de rocas. Mediante este método se realizaron mediciones sistemáticas de las discontinuidades, en 5 puntos abreviados EG, que juntos abarcan un área de 400 m² aproximadamente. A fin de tener un análisis global se resumen en el cuadro 3 la orientación del talud del cerro Cruz de Shallapa.

Cuadro 3. Datos de la ladera del cerro Cruz de Shallapa.

NRO. ESTACIÓN	TALUD DIP / DIP DIR
EG	72 / 95

6.1. Caracterización de la masa rocosa

Se realizó la caracterización del macizo rocoso a partir de los 3 puntos desarrollados a continuación.

6.1.1. Registro de datos

Se registraron datos para la caracterización de la masa rocosa a partir del mapeo geotécnico de campo, este se llevó a cabo utilizando el "método directo por celdas de detalle" cada celda abarca un área de 3 a 5m². Los parámetros de observación y medición fueron obtenidos en formatos de registro diseñados por el equipo de INGEMMET, adecuándolos a las normas sugeridas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM). Estos parámetros fueron: tipo de roca, tipo de discontinuidad, orientación espaciada, persistencia, terminación, apertura, rugosidad, tipo de relleno, espesor del relleno, meteorización y presencia de agua.

Cada celda a detalle constituye una estación geomecánica de medición (EG), obteniendo un total de 5 estaciones repartidas en la corona y la base del talud, además de norte a sur que corresponden a los bordes del deslizamiento. Con estas estaciones se ha tratado de cubrir los sectores comprometidos con las inestabilidades.

6.1.2. Distribución de discontinuidades

El procesamiento de los datos se realizó mediante técnicas de proyección estereográfica equiangulares y equiareales, utilizando la versión avanzada del programa de cómputo DIPS (1989), elaborado por M.S. Diederichs y E. Hoek del Grupo de Ingeniería de rocas del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Toronto (Canadá).

Es importante recalcar lo predominante de la rotura tipo cuña, esto se debe al fracturamiento del macizo rocoso y la disposición de las familias (figura 6 y fotografía 2).



Figura 6: Vista de rotura tipo cuña en la ladera del cerro Cruz de Shallapa.



Fotografía 2: Vista de rotura tipo cuña en la ladera del cerro Cruz de Shallapa.

6.1.3. Características estructurales

En general las juntas del macizo rocoso en el cerro Shallapa son continuas, onduladas, medianamente rugosas a ligeramente rugosas; rellenas con arcilla y material orgánico; presentan evidencias de agua (Húmedo). Además, son persistentes a subpersistentes, separadas a medianamente separadas (espaciado), abiertas superficialmente, algo húmedas, con relleno de arcilla y materia orgánica.

A continuación, se expone el cuadro 4 de clasificación de la ISRM, en nuestro caso el macizo de la figura 7 presenta una clasificación tabular.

Cuadro 4. Clasificación en función de forma y tamaño.

Clase	Tipo	Descripción
I	Masivo	Pocas discontinuidades o con espaciado muy grande
II	Cúbico	Bloques aproximadamente equidimensionales
III	Tabular	Bloques con una dimensión considerablemente menor que las otras dos
IV	Columnar	Bloques con una dimensión considerablemente mayor que las otras dos
V	Irregular	Grandes variaciones en el tamaño y forma de los bloques
VI	Triturado	Macizo rocoso muy fracturado

Fuente: ISRM 1981.



Figura 7: En la cara del macizo se observa el paralelismo de la estratificación con la cara del talud.

6.2. Clasificación geomecánica de la masa rocosa

Con la información lito-estructural y la caracterización de la masa rocosa, se ha clasificado al macizo involucrado en las diferentes celdas de detalle del mapeo geotécnico utilizando los Criterios de Clasificación Geomecánica de Bieniawski (RMR: Rock Mass Rating 1989) y el SMR (RMR ajustado a taludes). Bieniawski 1989 y Romana 1985, entre otros.

Los valores de resistencia compresiva de la roca intacta, fueron determinados con el método indirecto usando el martillo de geólogo (ISRM 1981) y el esclerómetro tipo N. Los valores del índice de calidad (RQD) fueron determinados mediante el registro lineal con las ecuaciones Aydin y Basu, 2005, del Potro y Hurlimann, 2009, Deere y Miller, 1966, Aufmuth, 1973 y Beverly et al., 1979 con ellas se tienen los datos de UCS (MPa), modulo elástico (GPa), y ángulo de rozamiento interno. Teniendo como parámetro de entrada principal, la frecuencia de fracturamiento por metro cubico (Jv).

En el cuadro 5 se presenta la distribución de calidades en el cerro Cruz de Shallapa; se ha tratado de compatibilizar los valores de RMR con los del SMR, los resultados de la zonificación de calidades nos permiten deducir que estas están relacionadas directamente con el derrumbe y agrietamiento de la zona.

Cuadro 5. Resumen de las estaciones geomecánicas.

NRO. ESTACIÓN	TALUD DIP / DIR	RMR TOTAL	SMR CORREGIDO	CALIDAD SMR	DESCRIPCIÓN
EG I	72 /95	42,6	23,7	II	MALA
EG II	72 /95	48,4	37,8	II	MALA
EG III	72 /95	40,0	38,9	III	MALA
EG IV	72 /95	40,7	32,7	III	MALA
EG V	72 /95	39,3	35,2	III	MALA

Fuente: SMR= RMR Modificado para taludes rocosos (Romana 1985).

La clasificación que más se ajusta a la realidad es la del RMR corregido (SMR), en ella tenemos la distribución porcentual siguiente en el área de estudio.

6.3. Zonificación geomecánica

En general los valores porcentuales de la calidad del macizo rocoso son los siguientes:

- Roca de mala calidad (IV): 100%

Los resultados obtenidos solo son válidos para la zona de estudio.

Es necesario mencionar que la alternancia de materiales rocosos de diferente composición y estructura en el talud (areniscas cuarzosas intercaladas con limoarcillitas negras, lutitas, además de niveles de carbón) se manifiesta en distintos grados de alteración, resistencia y comportamiento mecánico. Además, en un mismo tipo de roca como la arenisca, su resistencia alta a media (que influye en su calidad) disminuye debido al intenso fracturamiento (formando bloques medios a pequeños o tabulares. Figura 7), como se aprecia en la cercanía de zonas del derrumbe.

6.4. Resistencia de la roca

En relación a la resistencia de la roca intacta, uno de los parámetros más importantes de su comportamiento mecánico, es la resistencia compresiva uniaxial (σ_c). Los valores de σ_c fueron estimados mediante ensayos in-situ de impacto con el martillo Schmidt de dureza, según las normas sugeridas por la ISRM.

En los cuadros 6 y 7, se presenta un resumen de los resultados obtenidos, considerando los principales tipos de rocas por rangos y promedios para los diferentes tipos de roca (areniscas, lutitas y lomoacrillitas).

Cuadro 6. Resumen de los valores correlacionados del esclerómetro tipo N, para areniscas cuarzosas.

NRO. ESTACIÓN	TALUD DIP / DIP DIR	Resultado de Esclerómetro		UCS (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	ϕ
		Rn	RI			
EG I	72 /95	29	23	56	30	32
EG II	72 /95	42	35	99	47	29
EG III	72 /95	32	26	63	33	38
EG IV	72 /95	34	28	70	36	32
EG V	72 /95	37	30	78	40	39

Donde ϕ corresponde al ángulo de rozamiento interno, los valores del UCS (Mpa), modulo elástico (GPa) respectivamente.

Cuadro 7. Resumen de los valores correlacionados del esclerómetro tipo N, limoarcillitas negras y lutitas

NRO. ESTACIÓN	TALUD DIP / DIR	UCS (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	ϕ
EG	72 /95	7.5 ⁽¹⁾	0,8	35

(1) Método indirecto con martillo de geólogo, según Gonzales de Vallejo (2002) y Rahn (1986) y Walthan (1999).

7. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD

Para la evaluación de las condiciones de estabilidad se expone un análisis global del cerro Cruz de Shallapa, en el siguiente cuadro se presentan resúmenes de las características mecánicas de las rocas en función de los ensayos realizados en campo.

En los cuadros 8 y 9 podemos observar el RQD (%) promedio del macizo rocoso, de arenisca cuarzosa y lutitas intercaladas con limolitas. Según la media de rebotes del esclerómetro se presenta el cuadro 11, donde tenemos promedio de rebotes corregidos, UCS (MPa), modulo elástico (GPa) y ϕ (°).

Cuadro 8. Promedio de λ_h , J_v y RQD (%) en areniscas cuarzosas.

NRO. ESTACIÓN	TALUD DIP / DIR	λ_h	RQD %
EG	72 /95	12,81	61,65

Cuadro 9. Promedio de λ_h , J_v y RQD (%) en limoarcillitas negras y lutitas.

NRO. ESTACIÓN	TALUD DIP / DIR	λ_h	RQD %
EG	72 /95	33	15,86

Cuadro 10. Correlación de esclerómetro, UCS (MPa), modulo elástico (GPa), ϕ (°) en areniscas cuarzosas.

NRO. ESTACIÓN	TALUD DIP / DIR	Resultado de Esclerometro		UCS (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	ϕ
		Rn	RI			
EG	72 /95	34,2	27,9	71,5	36,4	33,4


En función del UCS (MPa), podemos definir la resistencia del macizo rocoso con el cuadro 11 de Deere y Miller (1996).

Cuadro 11. Clasificación de la resistencia de la roca inalterada.

Descripción	Resistencia a la compresión uniaxial			Ejemplos de roca característica
	Lbf/pulg ²	Kgf/cm ²	Mpa	
Resistencia muy baja	150 - 3500	10 - 250	1 - 25	Yeso, sal de roca
Resistencia baja	3500 - 7500	250 - 500	25 - 50	Carbón, limolita, esquistos
Resistencia media	7500 - 15000	500 - 1000	50 - 100	Arenisca, pizarra, lutita
Resistencia alta	15000 - 30000	1000 - 2000	100 - 200	Mármol, granito, gneis
Resistencia muy alta	> 30000	> 2000	> 200	Cuarcita, gabro, basalto

Fuente: Deere y Miller (1996).

De los cuadros se deduce una resistencia media del macizo rocoso, lo cual se ratifica con la estación geomecánica global presentada a continuación:

	FORMATO	Código : M2.1-F-079
	CLASIFICACIÓN GEOMECAÁNICA	Versión : 00 Fecha aprob. : 22/11/2021 Página : 1 de 1

Sector: CERRO CRUZ DE SHALLAPA

Ubicación: ESTACIÓN GEOMECAÁNICA

POR: MAURICIO NUÑEZ

FECHA: 28/02/2023

HOJA: 1 de 1

N° ESTACIÓN	ORIENTACIÓN DE LA CARA		TRAMO		VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R. 1989)												
	DIP DIRECTION	DIP	DESDE	HASTA	PARÁMETRO					RANGO DE VALORES					VALOR		
1	95	72															
TIPO DE ROCA					FRECUENCIA FRACTURA												
A		%	B		%	N° Fract. / ml.											
Arenisca		80	Lutita		20	20											
TIPO	ORIENTACIÓN		RELLENO		COMENTARIOS												
ESTRUC.	DIP DIRECTION	DIP	ESPACIAMIENTO		TIPO	ESPESOR											
S	93	83	0,06-0,2		A	7 mm											
J	94	72	0,06-0,2		A	5 mm											
J	143	75	0,02-0,06		A	0,5 mm											
J	354	65	0,06-0,2		-	-											
					R. COMPRES. UNIAXIAL (MPa)					>250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1) <1(0)	1	7	
					RQD %					90-100 (20)	75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	2	3	
					ESPACIAMIENTO (m)					>2 (20)	0,6-2 (15)	0,2-0,6 (10)	0,06-0,2 (8)	<0,06 (5)	3	8	
					CONDICIÓN DE JUNTAS												
					PERSISTENCIA (1)					<1m long. (6)	1-3 m Long. (4)	3-10m (2)	10-20 m (1)	>20 m (0)	4A	2	
					ABERTURA (2)					Cerrada (6)	<0,1mm apert. (5)	0,1-1,0mm (4)	1-5 mm (1)	>5 mm (0)	4B	0	
					RUGOSIDAD (3)					Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig.rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	4C	3	
					RELLENO (4)					Limpia (6)	Duro <5mm (4)	Duro>5mm (2)	Suave <5 mm (1)	Suave >5 mm (0)	4D	1	
					ALTERACIÓN (5)					Sana (6)	Lig.Alterada. (5)	Mod.Alterada. (3)	Muy Alterada. (2)	Descompuesta (0)	4E	2	
					AGUA SUBTERRÁNEA					Seco (15)	Humedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	5	10	
												VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 5)			=	36	
												CLASE DE MACIZO ROCOSO					
					RMR					100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	IV		
					DESCRIPCIÓN					I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA			

GRADO	ÍNDICE DE RESISTENCIAS IDENTIFICACIÓN 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 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

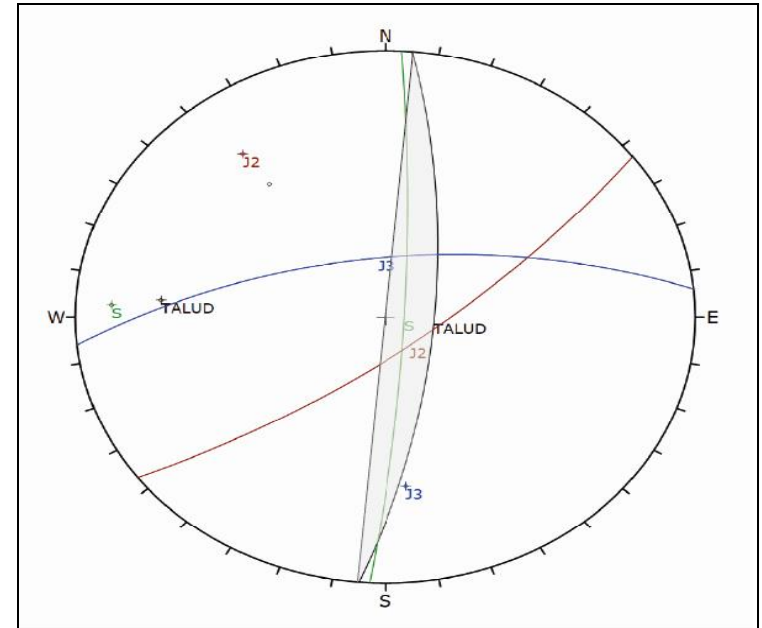
ABREVIACION DE TIPO DE ROCA			
Ar	Arenisca de grano fino niveles sanos con niveles fracturados	Lt	Lutita

ABREVIACION DE TIPO DE ESTRUCTURAS			
J	Diaclasis		
Fn	Falla		
S1	Esquistosidad		
S	Estratificación		

ABREVIACION DE TIPO DE RELLENO			
A	Arcilla	S	Arena
G	Grava	B	Brecha
Q	Cuarzo	C	Calcita
Y	Yeso	O	Óxido

ESPACIADO (mm)	
Extremadamente juntas	< 20
Muy juntas	20 - 60
Juntas	60 - 200
Moderadamente juntas	200 - 600
Separadas	600 - 2000
Muy separadas	2000 - 6000
Extremadam. Separadas	> 6000

GRADO (ISRM)	ÍNDICE DE ALTERACIÓN DESCRIPCIÓN
I SANA	No aparecen signos de meteorización
II ALGO METEOR.	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III METEORIZADA	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV MUY METEOR.	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V COMPLETAM. METEOR.	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se ha conserva intacta la estructura original del macizo rocoso.
VI SUELO RESID.	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo rocoso y la fábrica del material.



7.1. Identificación de los modos de falla

El tipo de estructura “S” hace referencia a la estratificación y “J” hace referencia a las juntas o familias. Con ello se exponen los análisis cinemáticos más críticos para EG (cuadro 12).

Cuadro 12. Resumen de características en discontinuidades EG.

	Color	Buzamiento	Dirección de Buzamiento	Tipo
Buzamientos y dirección de buzamientos promedio				
1m	■	72	95	TALUD
3m	■	83	93	S
5m	■	75	143	J2
6m	■	60	354	J3

7.1.1. Análisis por rotura tipo cuña

En la figura 8 se observa el análisis con una probabilidad de ocurrencia de 60% respecto del talud y las familias 2 y 3; además de la familia S (estratificación) que funciona como fractura de tracción.

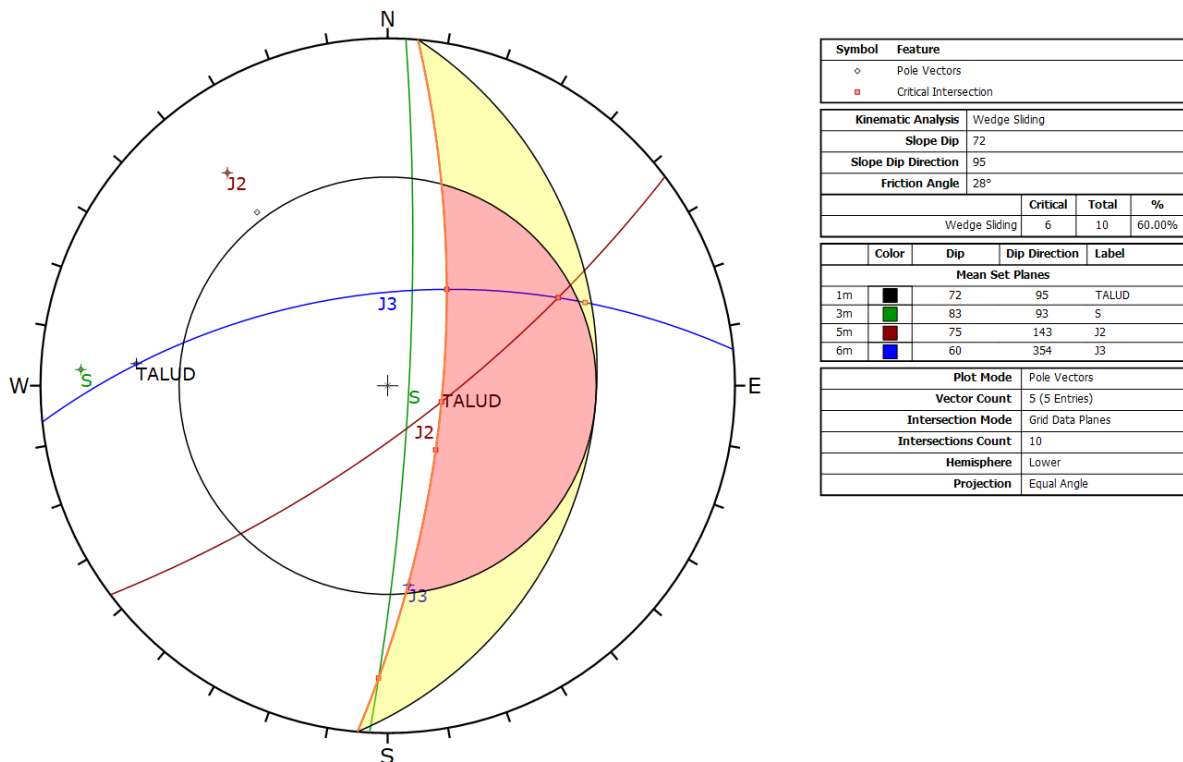


Figura 8. Análisis de rotura por cuña EG.

7.2. Selección y utilización de los métodos de cálculo

Considerando la influencia de la calidad de la masa rocosa, la falla de los taludes estará regida por las rocas de menor calidad, que según el mapeo geotécnico el valor del RMR corregido es mayor de 42 y SMR mayor a 23. Cuando se dan estas condiciones de calidad de la masa rocosa, el modo de falla principal es el debilitamiento estructuralmente controlado (arreglo estructural). Las observaciones de campo evidencian estos modos de falla. Por tanto, para los análisis de la estabilidad de los taludes de los diferentes sectores o zonas geomecánicas del área de inestabilidad, se utilizó como método de cálculo principal el modo de falla controlado por el arreglo estructural.

Para el análisis de la estabilidad de los taludes en general, se ha adoptado el uso del programa de cómputo Slide2. Este es un programa de estabilidad de taludes de equilibrio límite 2D para evaluar el factor de seguridad o probabilidad de falla, de superficies de falla circulares o no circulares en taludes de suelo o roca. Así mismo, analiza la estabilidad de las superficies de deslizamiento utilizando métodos de equilibrio límite de corte vertical o no vertical. También incluye el análisis de filtración de agua subterránea de elementos finitos integrado en el programa, tanto para condiciones de estado estacionario como transitorias.

7.3. Condiciones de análisis

Para los diferentes análisis de estabilidad, se han realizado diversas ventanas geomecánicas en los taludes como la corona y pie del derrumbe, así como también en los bordes o flancos que van en dirección norte - sur. En cada subsector de análisis se han considerado los diferentes dominios estructurales establecidos para ambos taludes, con sus propiedades de resistencia al corte que han sido establecidos de acuerdo a lo señalado en posteriores cuadros 13, 14 y 15. Por lo que se establecen claramente 3 litologías con sus respectivas propiedades mecánicas y físicas.

Cuadro 13. Resumen de características propiedades físico mecánicas en la arenisca.

Arenisca		
Peso específico	26	kN/m ³
UCS	50000	Kpa
GSI	37	
mi	13	
D	0,7	

Cuadro 14. Resumen de características propiedades físico-mecánicas en la arenisca fracturada intercalada con lutita.

Arenisca con lutita		
Peso específico	26	kN/m ³
UCS	30000	Kpa
GSI	33	
mi	12	
D	0,7	

Cuadro 15. Resumen de características propiedades físico-mecánicas en la lutita intercalada con limolitas.

Lutita con limolita		
Peso específico	26	kN/m ³
UCS	7500	Kpa
GSI	25	
mi	6	
D	0,7	

7.4. Análisis de estabilidad

En principio los análisis fueron orientados a verificar la estabilidad de los taludes por sub sectores, definido por dominios estructurales, definidos en la campaña geotécnica a fin de verificar la estabilidad de la ladera noreste del Cerro Cruz de Shallapa. En todos los casos, se evaluó con un factor pseudo estático sensitivo.

Para evaluar el problema de inestabilidad hubo la necesidad de realizar una serie de análisis, basado en los resultados del análisis cinemático y el análisis retrospectivo, los mismos que comprendieron los siguientes casos:

Caso 1: Situación actual de la estabilidad de los taludes en condiciones drenadas.

Caso 2: Refuerzo del talud con elementos de sostenimiento en condiciones drenadas y considerando sismos.

El primer caso constituye una evaluación de la estabilidad basada en los resultados del análisis cinemático a fin de obtener resultados cuantitativos de la estabilidad para la situación actual. El Caso 2 constituye la evaluación de la alternativa de estabilización mediante el empleo de elementos de sostenimiento.

Si bien es cierto que el método empleado en el Caso 2 no es el único, el empleo de otros métodos de estabilización como descarga parcial o echado del talud no se han considerado por los problemas obvios que representaría usar voladura de rocas.

Los resultados de estos análisis son presentados en el capítulo 9, en base a resultados finales de una serie de corridas con el programa Slide2: Este es un software de análisis de Estabilidad de Taludes en 2D que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad¹.

7.5. Evaluación de los factores de influencia

Los factores antes de tratar el tema sobre las posibles alternativas de mejoramiento de las condiciones de estabilidad de los taludes de cerro Cruz de Shallapa, es necesario identificar los posibles factores de influencia sobre la inestabilidad.

Los factores de influencia que estuvieron presentes en el problema de inestabilidad fueron: las condiciones geomecánicas estructurales adversas de las zonas inestables, ya que el cerro Cruz de Shallapa hace parte de un anticlinal y esa disposición estructural es naturalmente perjudicial para la estabilidad del mismo, el efecto de la gravedad agudizado por lo empinado

¹ <https://www.icog.es/TyT/index.php/2016/10/slide-la-mejor-aplicacion-estabilidad-taludes/>

del talud, la composición litológica en específico, los niveles de lutita y vetas de carbón mineral que conllevan a una menor capacidad mecánica y física global, además de una posible capacidad al paso y retención de agua en este nivel, debido al intenso fracturamiento.

En relación a las condiciones geomecánicas de la masa rocosa, esta área presenta características estructurales muy desfavorables, debido a la presencia del paralelismo entre la estratificación con la cara del talud y el arreglo estructural de los sistemas principales de discontinuidades, creando una perturbación en la ladera con desprendimientos tipo “cuña”. Generando una masa rocosa de mala calidad según el SMR.

Para las condiciones geomecánicas indicadas y la presencia de taludes muy empinados (65° a 85°), ha hecho que se acentúe el efecto gravitatorio para crear la inestabilidad. Los análisis realizados han mostrado que se habrían conseguido taludes estables estableciendo como máximo ángulos de 60°.

7.6. Evaluación de resultados

En las condiciones mencionadas se realizó el análisis de estabilidad, la fase inicial contempla el análisis en modo estático, así también se muestran los perfiles analizados en Slide2. Los resultados de ello se muestran, como resumen, en el siguiente cuadro 16.

El criterio de resolución escogido es el modelo generalizado de Hoek-Brown ya que es un macizo intensamente fracturado, con más de 4 familias principales, el macizo debe ser estudiado desde un enfoque de isotropía.

Cuadro 16. Resumen de factor de seguridad de los perfiles determinados en campaña geotécnica del cerro Cruz de Shallapa.

PERFIL		A - A´	B - B´	C - C´
FACTOR DE SEGURIDAD (F.S.)	Estático	1.07	1.07	1.07
FACTOR DE SEGURIDAD (F.S.)	Pseudo-estático	0.79	0.74	0.71

Las zonas críticas hacen referencia a algunas zonas puntuales en el talud que presentan un factor de seguridad (F.S.) menor, con influencia en la ladera.

CASO 1: Situación actual de la estabilidad de los taludes en condiciones drenadas, el análisis estático y pseudo-estático con un coeficiente sísmico de 0.25 horizontal y vertical (FLBC Ingenieros SAC, 2022). A continuación, los resultados de zonas críticas (figuras del 9 al 14).

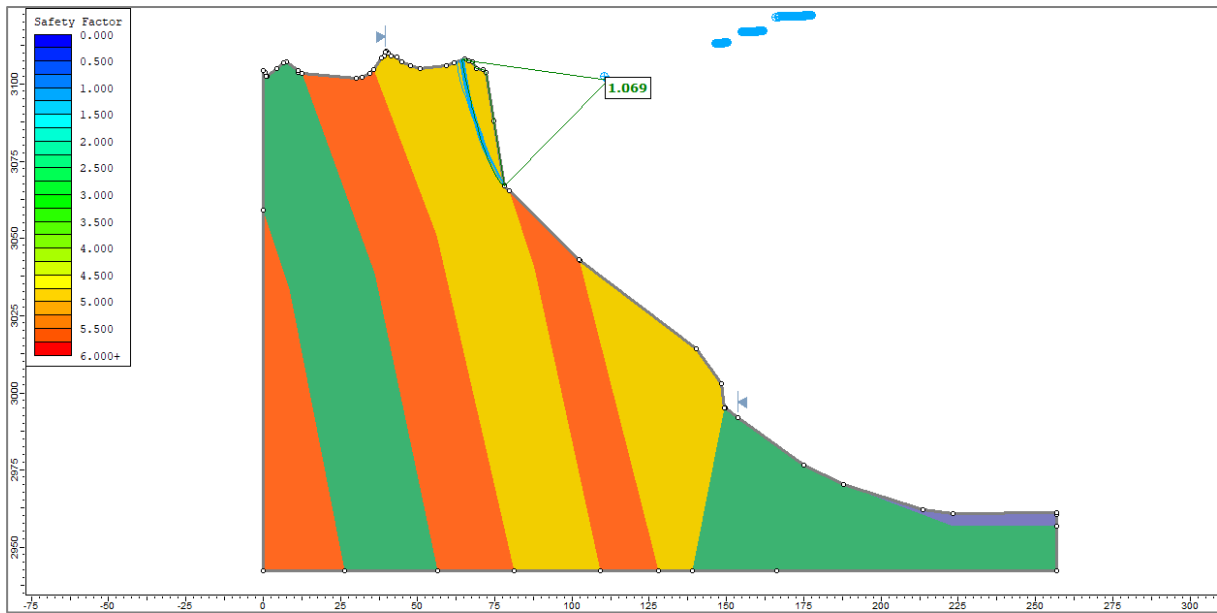


Figura 9. Desarrollo de los F.S. del perfil A-A' en condiciones estáticas.

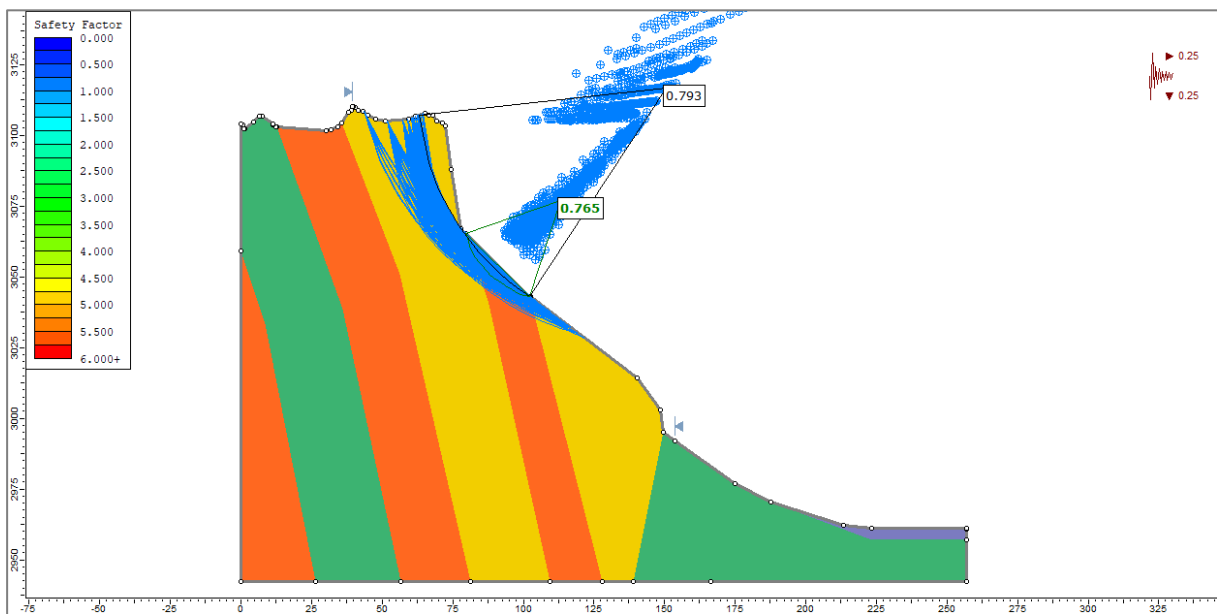


Figura 10. Desarrollo de los F.S. del perfil A-A' en condiciones pseudo-estáticas.

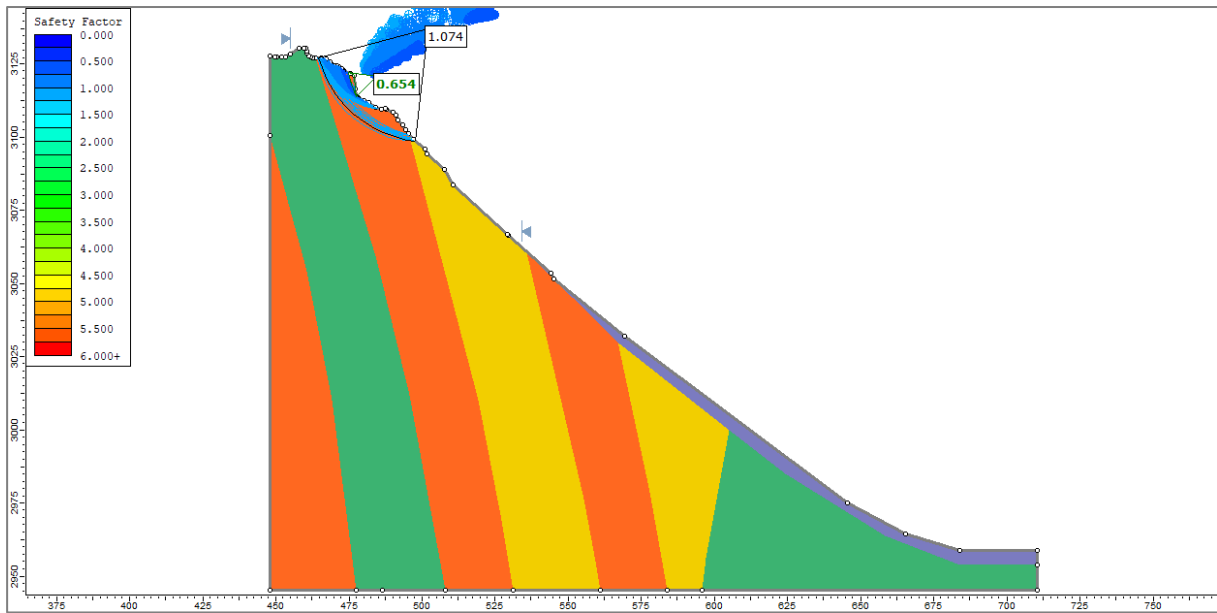


Figura 11. Desarrollo de los F.S. del perfil B-B' en condiciones estáticas.

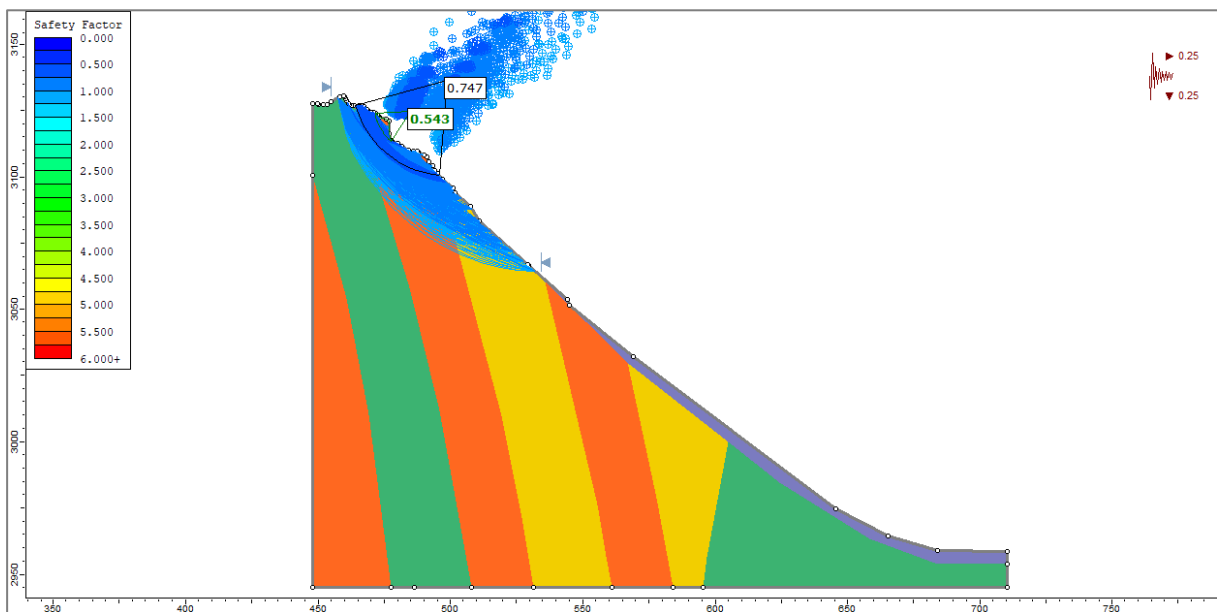


Figura 12. Desarrollo de los F.S. del perfil B-B' en condiciones pseudo-estáticas.

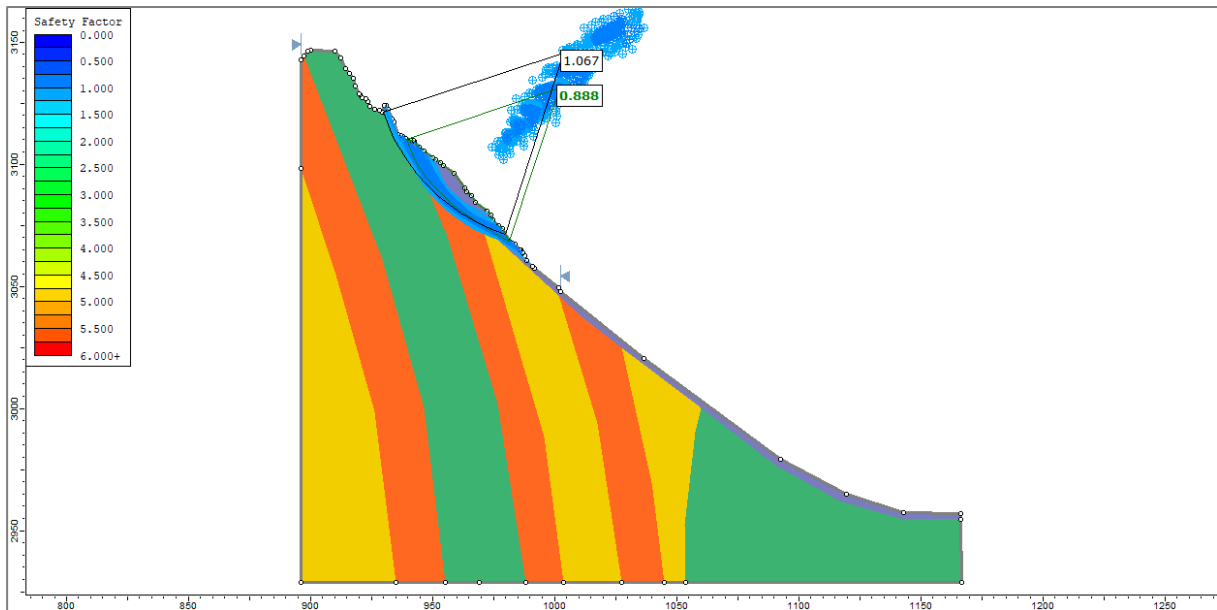


Figura 13. Desarrollo de los F.S. del perfil C-C' en condiciones estáticas.

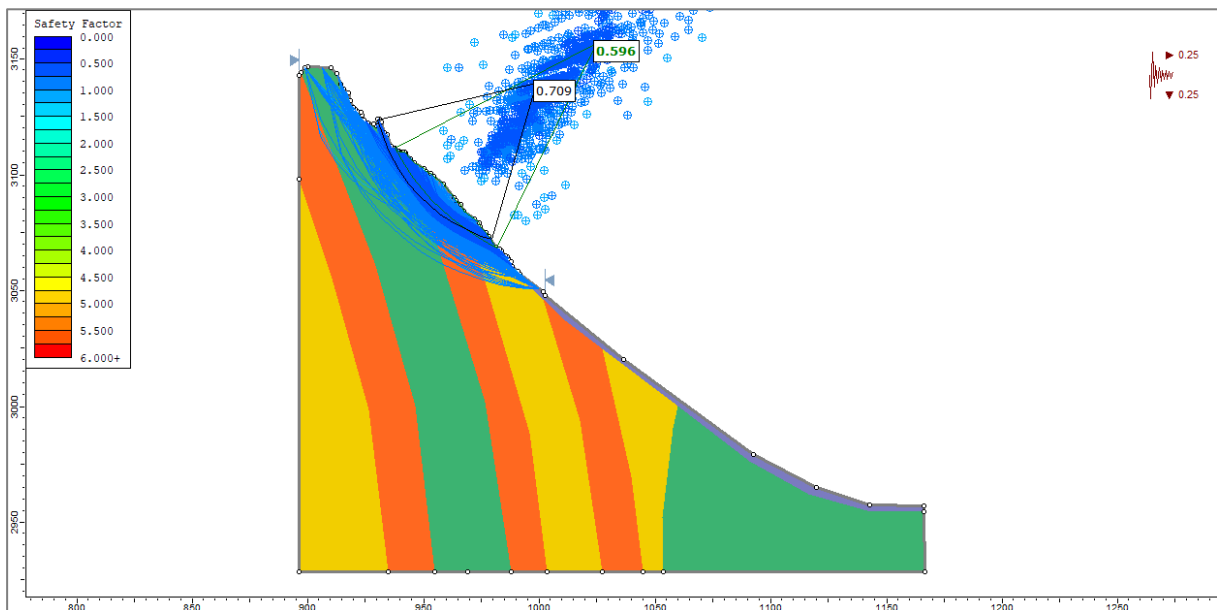


Figura 14. Desarrollo de los F.S. del perfil C-C' en condiciones pseudo-estáticas.

Para las condiciones seudo estáticas, es importante mencionar la presencia de la falla activa de la Cordillera Blanca, localizada a 18 km, aproximadamente, al oeste de Chavín de Huantar, en el flanco Occidental de la Cordillera Blanca.

8. MODELAMIENTO DE CAÍDA DE ROCAS

Para realizar el modelamiento de caídas de rocas en el cerro Cruz de Shallapa, se utilizó el modelo RockFall de RAMMS, ya que es un programa completo, versátil y particularmente enfocado en evaluar la caída de bloques. Los resultados obtenidos son más precisos ya que es posible modificar más parámetros como la densidad, volumen, la forma de los bloques, la dureza de la superficie, los puntos de origen, etc. También tiene la capacidad de representar los resultados en dos o tres dimensiones desde el programa o exportarlos a un SIG para visualizarlos de mejor manera en conjunto con otros datos (Salinas. S, 2021).

Fue posible modificar la forma, tamaño y masa de la roca a simular. Se creó 38 puntos alrededor de la corona (figura 15), considerando las características más aproximadas a la realidad, para que de esta forma fuera posible, no sólo obtener datos a partir de la superficie, sino también del comportamiento del bloque durante su caída.

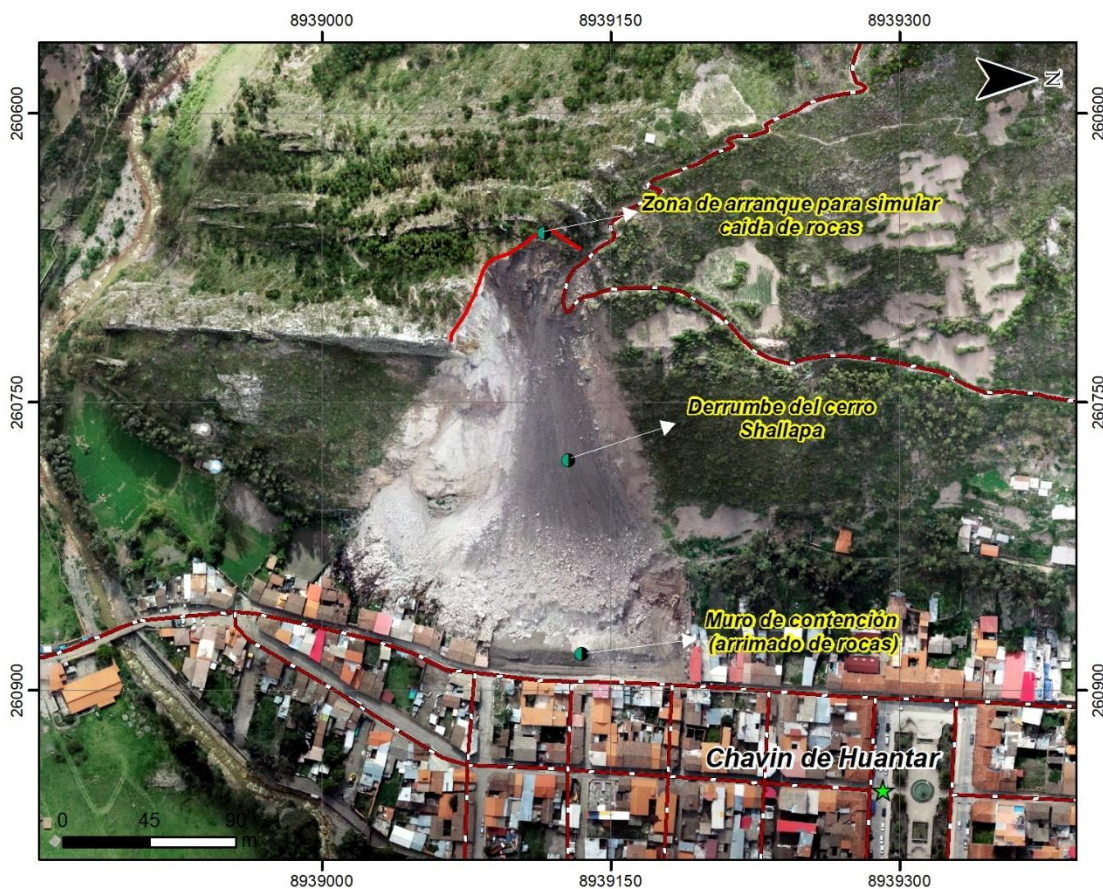


Figura 15. Ubicación de la zona de arranque para simular caída de rocas con el software Rockfall.

8.1. Análisis de datos

Este programa requiere la posición y geometría de los bloques propensos a caer, por lo tanto, fue necesario su reconocimiento previo en campo. Además, fue necesario hacer una clasificación del tipo de superficie de acuerdo con RAMMS-Rockfall. Esto es importante porque determinará el comportamiento del bloque a rebotar, hundirse o rodar. De acuerdo a las condiciones de relieve y morfología del terreno, el tipo de superficie es considerado "Duro".

Así mismo, se introdujeron los datos de sus dimensiones y densidad, se calcularon sus valores de masa y volumen automáticamente y se realizaron las simulaciones (cuadro 17).

La identificación de bloques depositados, así como sus características y ubicación nos ayudan, en principio, a definir la ocurrencia del fenómeno y su alcance. También nos indica el potencial de afectación. Estos eventos pasados nos proporcionan la oportunidad de evaluar la magnitud del proceso y de extraer las propiedades físicas finales de cada caída de bloques.

Con base en esta información podemos obtener las trayectorias de posibles eventos a partir de las características del terreno, como los cambios en la pendiente, diferencia altitudinal y obstáculos como la vegetación. Esta última variable puede modificar considerablemente las trayectorias y desacelerar los bloques al caer.

Cuadro 17. Datos de entrada para simular caída de rocas.

Tamaño de bloque (m)	X	1.52
	Y	0.91
	Z	0.76
Densidad (km/m3)		2580
Volumen (m3)		0.81
Masa (kg)		2098.2
Categorías de terreno		Duro
Forma de la roca		Larga

8.2. Resultados

Los resultados obtenidos de la simulación con el Rockfall muestran que los bloques desprendidos desde la parte alta del cerro Shallapa, analizando el escenario más crítico, pueden sobrepasar el muro de contención (arrimado de rocas) de aproximadamente 5 m, lo que afectaría alrededor de 10 viviendas ubicadas en la calle Wiracocha, así mismo, la trayectoria de algunos bloques llegaría a impactar en los Jr. Tupac Yupanqui y Mayta Cápac (figura 16, 17 y 18); mas no tendría impacto directamente al centro arqueológico de Chavín de Huántar.

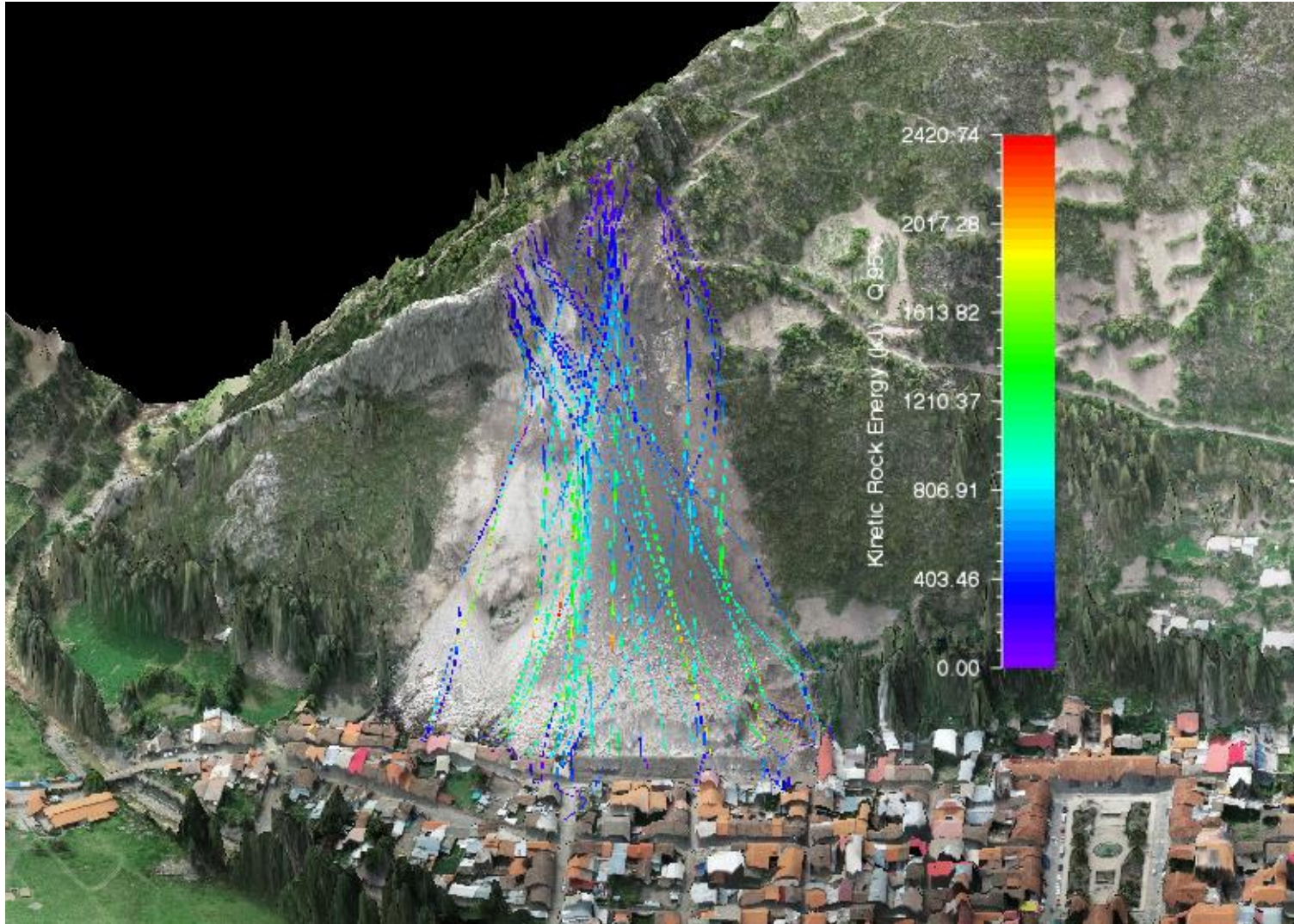


Figura 16. Resultados de la energía cinética generada a partir de la simulación por caída de rocas.

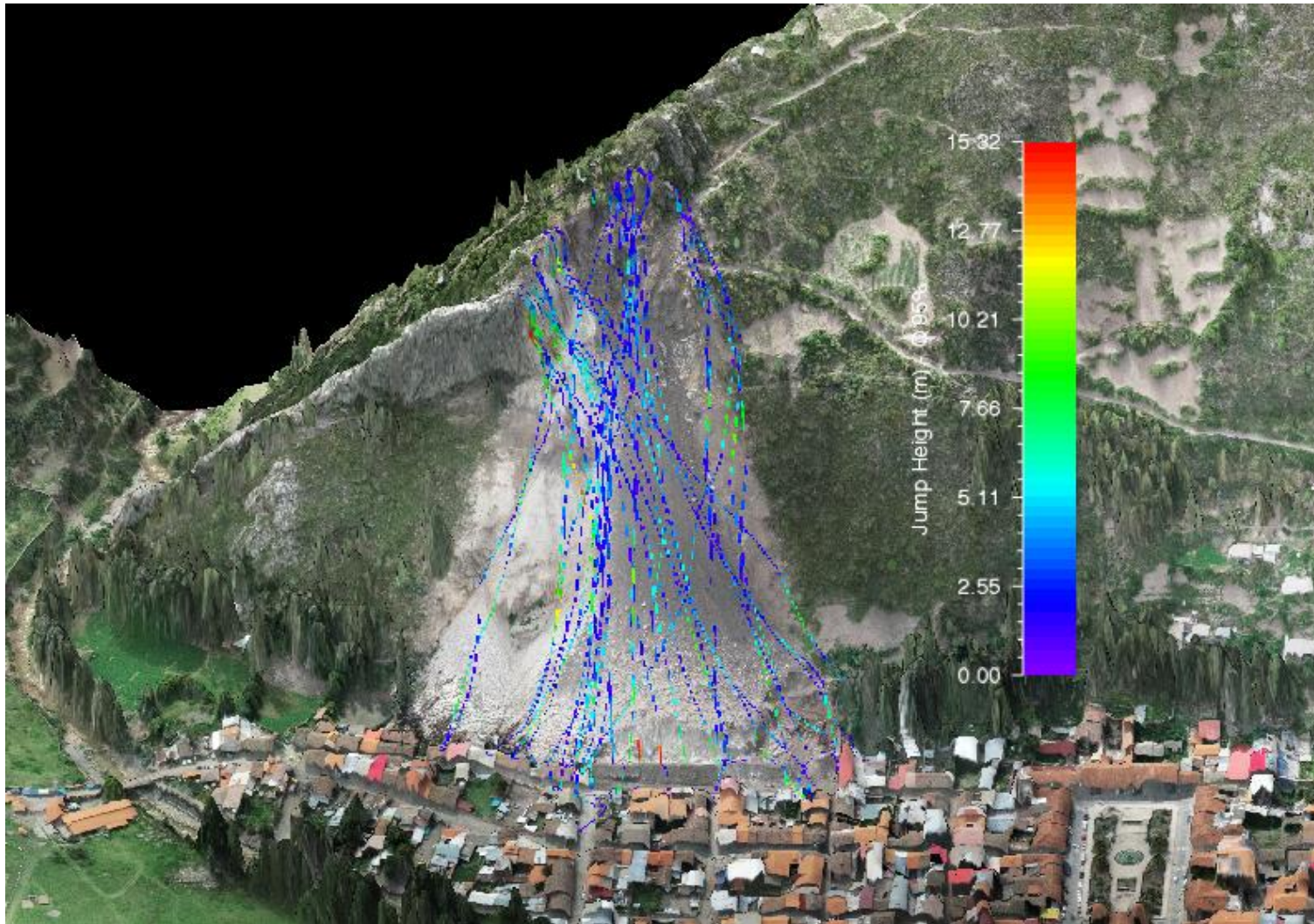


Figura 17. Resultados de altura generada a partir de la simulación por caída de rocas.

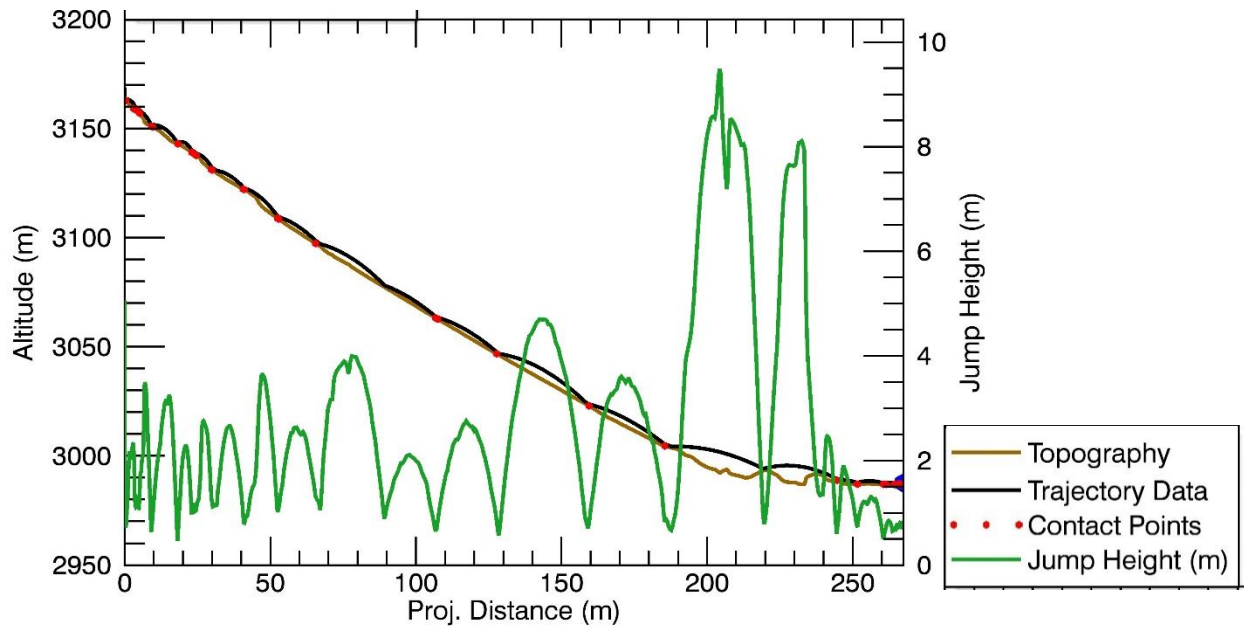


Figura 18. Perfil de altura en referencia a la altitud y distancia, donde se muestra la topografía y la trayectoria del bloque.

Las gráficas de comportamiento del bloque caído arrojan una gran cantidad de información. En ellas se observa que la desaceleración del bloque es súbita alcanzando el 0 ms^{-1} en menos de 10 m con una velocidad inercial de hasta 11 ms^{-1} (Figura 19).

Respecto a la velocidad alcanzada por los bloques, los valores máximos alcanzan hasta 28 ms^{-1} con impactos que desaceleran la caída de los bloques hasta -6 ms^{-1} (Figura 20). También se observa que los saltos simulados por el impacto de los bloques en una superficie medianamente “dura” exceden los 30 m de distancia y ocurren en la zona media – baja del derrumbe.

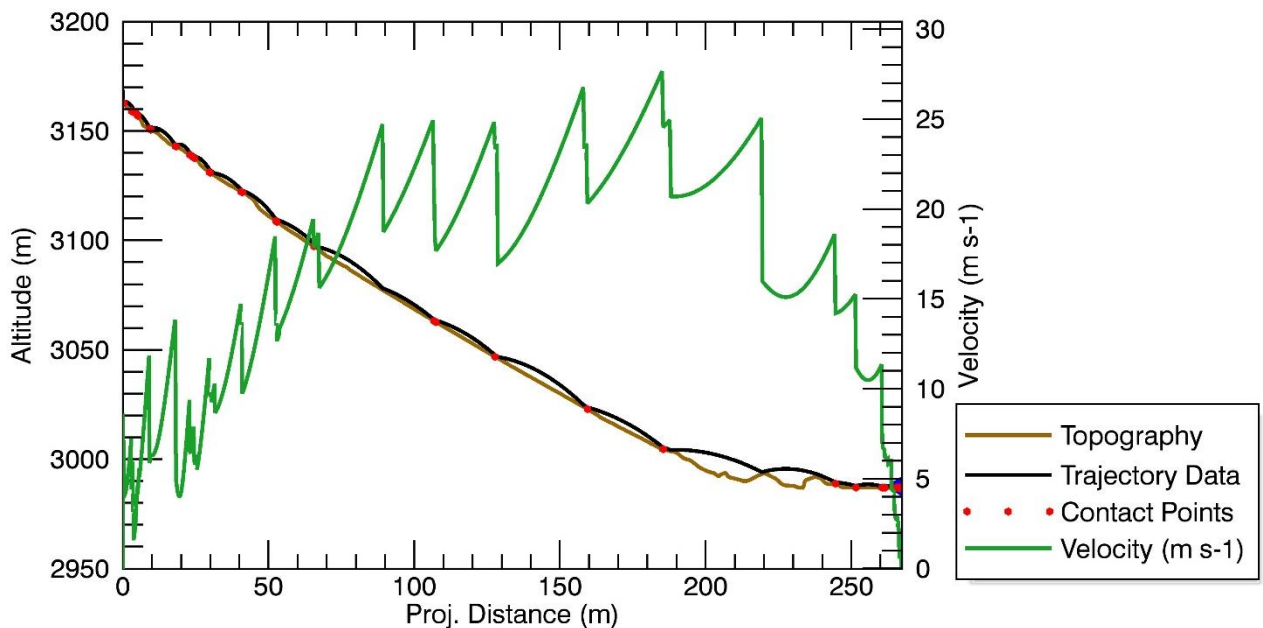


Figura 19. Perfil de velocidad en referencia a la altitud y distancia, donde se muestra la topografía y la trayectoria del bloque.

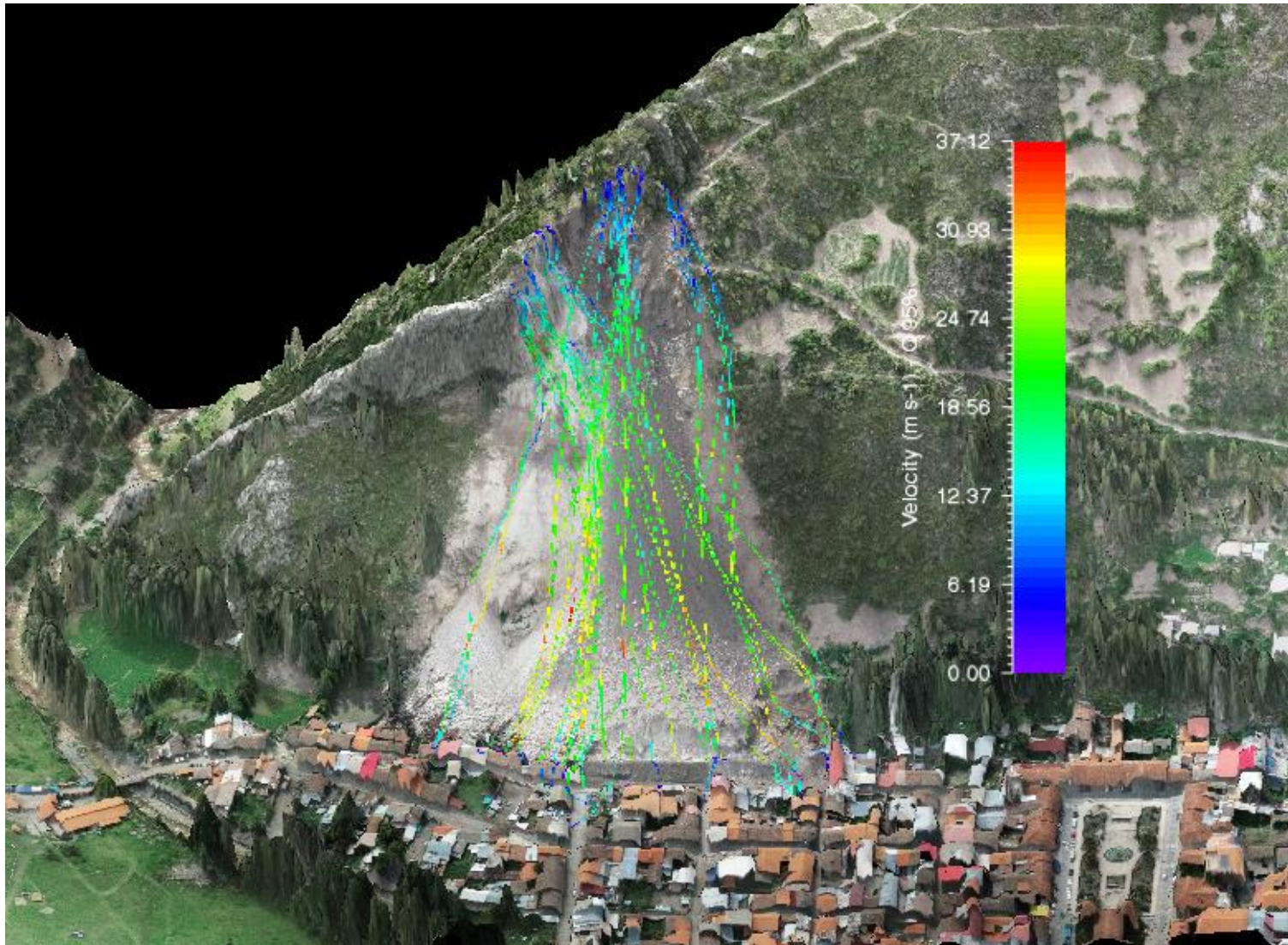


Figura 20. Resultados de velocidad generada a partir de la simulación por caída de rocas.

9. ALTERNATIVAS DE MANEJO DEL PROBLEMA

9.1. Problemática

La rotura de la ladera es tipo cuña como se observa en la figura 21 y se proyecta en el análisis de Swedge.

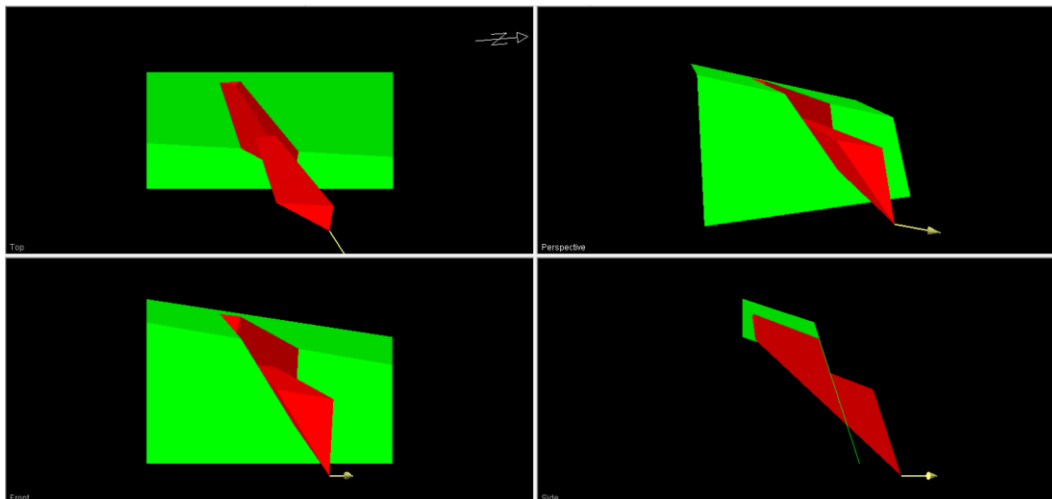


Figura 21. Proyección tipo cuña

El análisis cinemático efectuado para la identificación del modo de falla mostró que en el Cerro Cruz de Shallapa, existe la posibilidad de movimientos de la masa rocosa involucrada, por formación de cuñas; siendo su inestabilidad actual producto también de la competencia (calidad) de la masa rocosa involucrada.

9.2. Manejo del problema

Existen varios métodos para la corrección de taludes rocosos entre ellos podemos citar:

- Disminución del esfuerzo cortante: con excavaciones en la cabecera del derrumbe
- Introducción de fuerzas estabilizadoras: como anclajes y muros de sostenimiento
- Aumento de la resistencia al esfuerzo cortante del medio (roca): como drenajes, inyecciones, entre otros
- Mejora en la conservación del terreno y protección de la obras o contornos: proteger de caídas o desprendimientos rocosos, protección contra la meteorización y erosión; así como el aislamiento de la zona.
- Una combinación de estos

El manejo del problema propuesto está determinado con los siguientes modelamientos en condiciones estáticas y pseudo-estáticas se recomienda el uso de anclajes o pernos pasivos inyectados; eliminación de material, mallazo y shotcrete. Se recomienda también la forestación del cuerpo del derrumbe. La inyección de cemento mejorará la cohesión, dilatancia e impermeabilidad siempre y cuando se realice con la presión adecuada.

Para los anclajes PASIVOS se recomienda las siguientes características (figura 22):

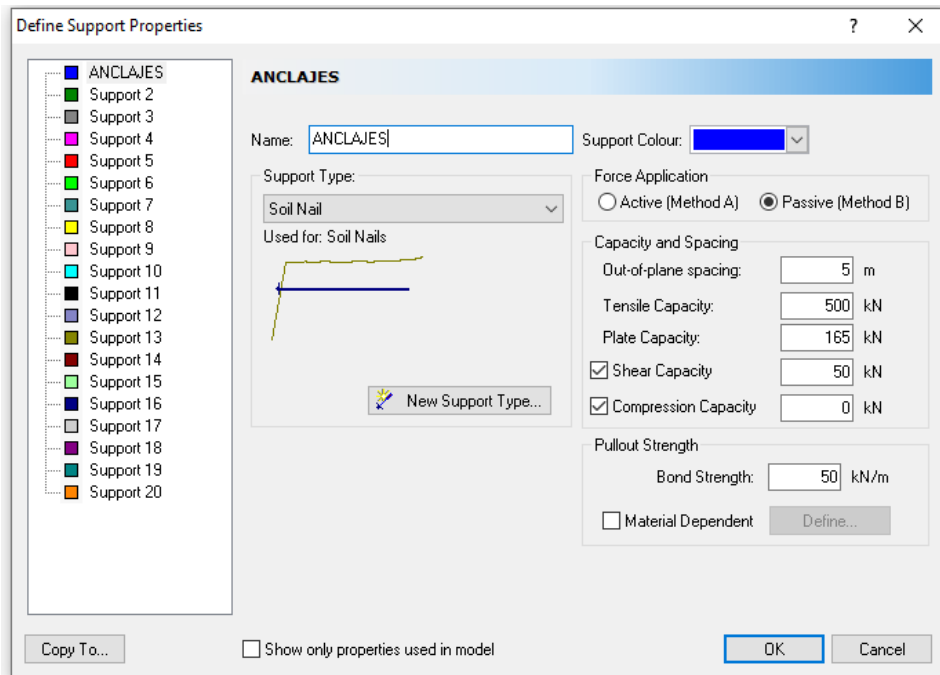


Figura 22. Propiedades de los anclajes del perfil AA

CASO 2:

Sección Corte A: Para el perfil AA se ha considerado cambios de geometría o peinados del talud en la parte media que involucra areniscas intercaladas con lutitas. Además, se recomienda anclar la pared subverticalizado de areniscas según especificaciones indicadas en la figura 22. La estabilización definitiva del talud cerro Cruz de Shallapa, se debe realizar un “**cosido**” del suelo” (**soil nailing**) desde la cabecera hasta el pie del talud – Jirón Wiracocha. Ver figuras 23 y 24.

Sección Corte B: Para el perfil BB se ha considerado cambios de geometría o peinados del talud en la parte media que involucra areniscas intercaladas con lutitas. Además, se recomienda anclar la pared subverticalizado de areniscas según especificaciones indicadas en la figura 22. La estabilización definitiva del talud cerro Cruz de Shallapa, se debe realizar un “**cosido**” del suelo” (**soil nailing**) desde la cabecera hasta el pie del talud – Jirón Wiracocha. Ver figuras 25 y 26.

Sección Corte C: Para este perfil, dada la cercanía con el perfil BB, se consideran los mismos parámetros de BB.

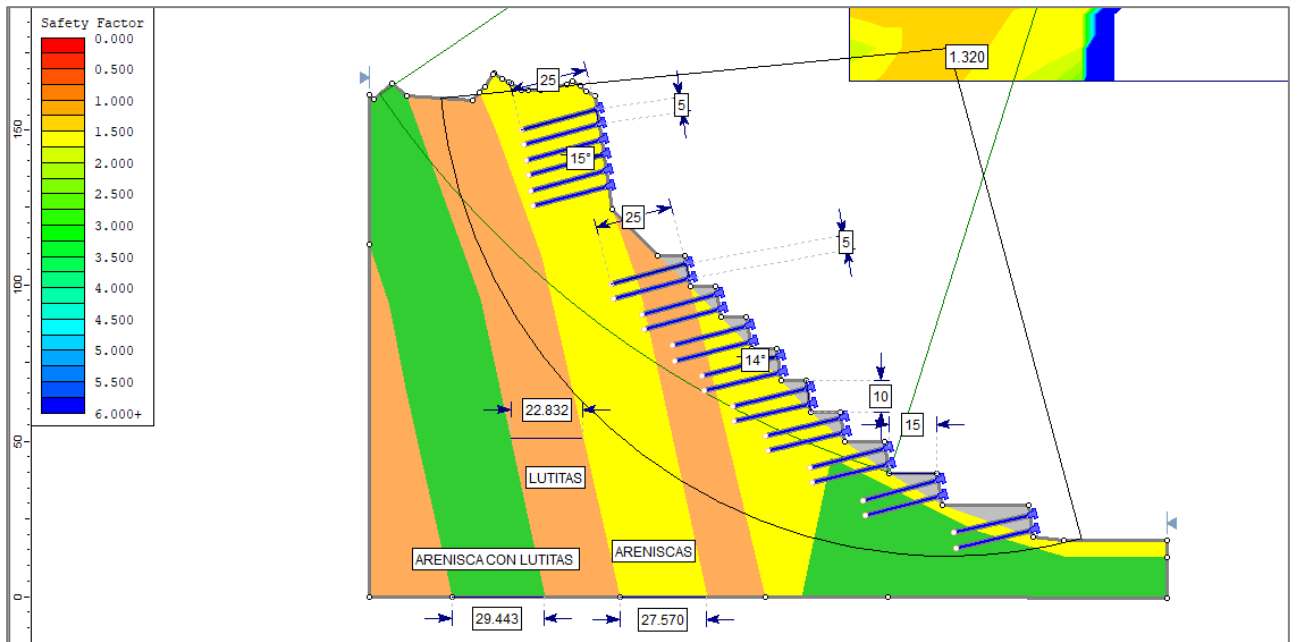


Figura 23. Desarrollo de los F.S. 1.320 del perfil A-A' en condiciones estáticas.

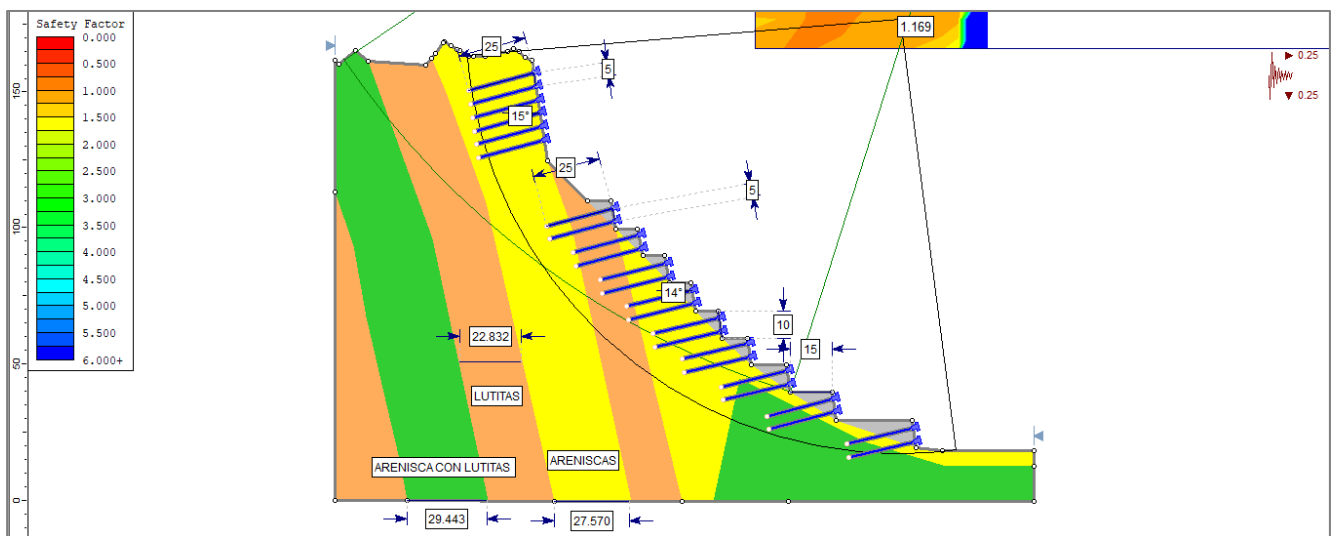


Figura 24. Desarrollo de los F.S. 1.169 del perfil A-A' en condiciones pseudo-estáticas.

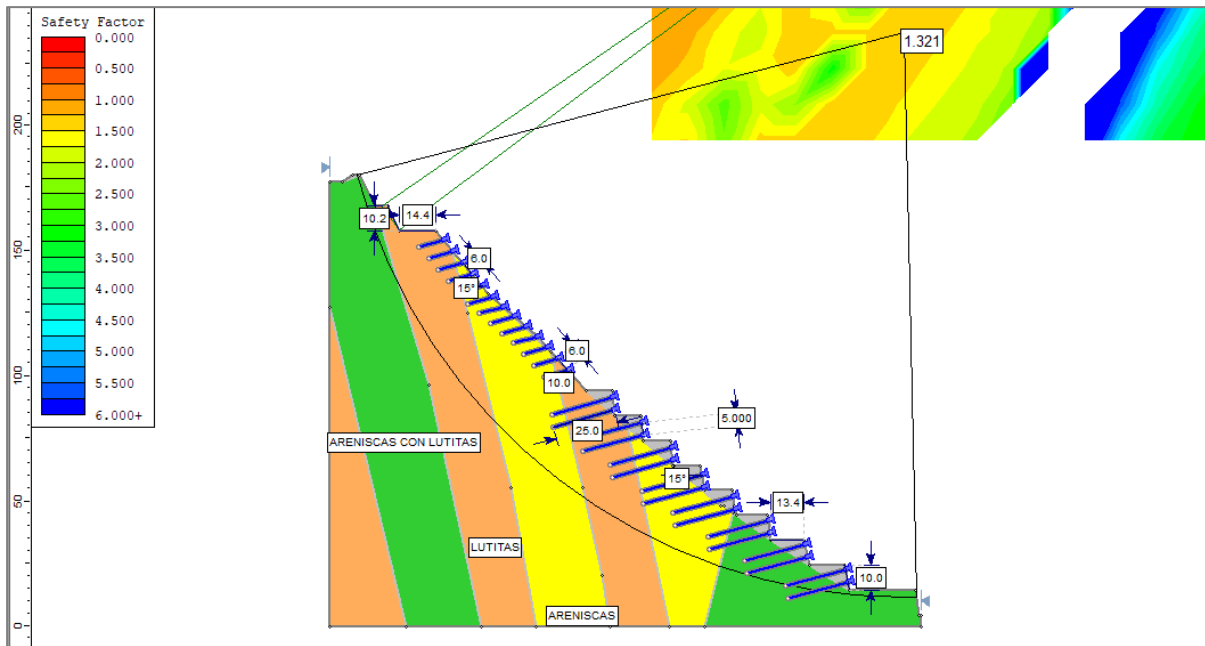


Figura 25. Desarrollo de los F.S. 1.321 del perfil B-B' en condiciones estáticas.

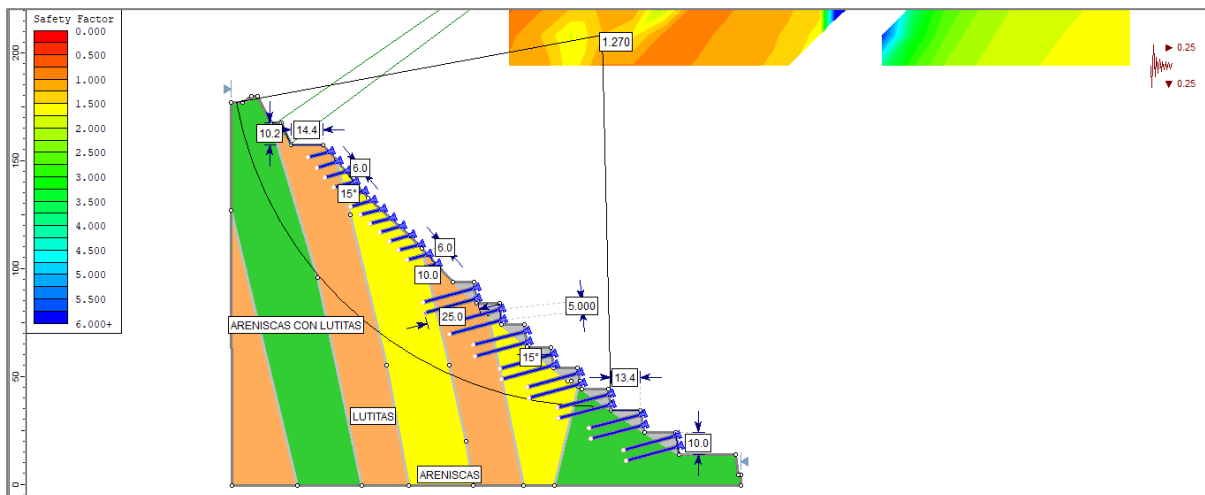


Figura 26. Desarrollo de los F.S. 1.270 del perfil B-B' en condiciones pseudo-estáticas.

Las simulaciones realizadas, nos indican que, con las medidas de estabilización recomendadas, los F.S. del talud del Cerro Cruz de Shallapa mejoran (cuadro 18).

Cuadro 18. Resultados de F.S., una vez concluidas las obras de mitigación.

Sección	F.S Estático	F.S. Seudoestático
AA	1.32	1.17
BB	1.30	1.27

10. CONCLUSIONES

1. La deformación tectónica - estructural del área, de dirección NO-NE, con la presencia de anticlinales y sinclinales, lineamientos, fallas y la zona de contacto entre las formaciones Chimú (Ki-Chi) y Oyón (Ki-Oy); han condicionado el intenso fracturamiento de las rocas. Además, la presencia de lutitas y limolitas, intercaladas con niveles del carbón, coadyuvaron en gran medida a la ocurrencia del derrumbe en el cerro Shallapa.
2. El área posee una morfología abrupta definido por relieves modelados en rocas sedimentarias de las formaciones Oyón y Chimú, con estratificación dispuesta en dirección norte-sur, e inclinadas de 30° a 85°, consideras de muy fuerte a muy escarpada, lo que contribuyó en el desarrollo del evento.
3. En relación a las condiciones geomecánicas de la masa rocosa y de acuerdo a los criterios de clasificación geomecánica vigentes, el macizo rocoso muestra calidades bajas. Estas aunadas, a las características estructurales muy desfavorables: paralelismo entre la estratificación con la cara del talud y arreglo estructural de los sistemas principales de discontinuidades, han creado una perturbación en la ladera con desprendimientos tipo "cuña"; generando una masa rocosa de mala calidad según el criterio SMR.
4. Según la evaluación de las condiciones de estabilidad, a nivel global, el cerro Cruz de Shallapa presenta una probabilidad de 60% de rotura tipo cuña con respecto al talud: familias de discontinuidades 2 y 3 y la estratificación (S) como límite de tracción entre los bloques a caer.
5. Según el análisis del modelamiento de caídas de rocas, muestra que los bloques desprendidos desde la parte alta del cerro Shallapa, pueden sobrepasar el muro de contención (arrimado de rocas) de aproximadamente 5 m de altura, lo que afectaría alrededor de 10 viviendas ubicadas en la calle Wiracocha. Así mismo, la trayectoria de algunos bloques llegaría a impactar en los Jr. Tupac Yupanqui y Mayta Cápac, sin afectación directa al Centro Arqueológico de Chavín de Huántar.
6. Los resultados obtenidos del análisis de estabilidad de taludes, en condiciones estáticas y pseudoestático muestran los siguientes valores:

Sección	F.S estático	F.S. pseudoestático
AA	1.06	0.79, 1.76
BB	1.07, 0.65	0.75, 0.54
CC	1.07, 0.80	0.71, 0.60

7. Los resultados obtenidos del análisis de estabilidad de taludes, en condiciones estáticas y pseudoestático, luego de implementar las recomendaciones sugeridas son:

Sección	F.S Estático	F.S. Seudoestático
AA	1.32	1.17
BB	1.30	1.27

11. RECOMENDACIONES

NO ESTRUCTURALES

1. Monitoreo constante del comportamiento del Cerro Cruz de Shallapa para identificar desplazamientos, grietas o eventos que contribuyan al colapso del macizo rocoso, con instrumentación estacionaria permanente, los trabajos de estabilización definitiva deben dar una estabilidad mayor a los 50 años y menor a los 100 años, por lo cual, se debe monitorear permanentemente, ya que los cambios geológicos / climáticos no son previsibles. El monitoreo recomendado, debe ser trabajado por especialistas.
2. Realizar la estabilización definitiva lo más pronto posible debido que los diferentes cambios en el clima ocurridos por el calentamiento global y fenómenos climatológicos anómalos (Ciclón Yacu, F. El niño, F. El Niño Costero, F. La Niña, entre otros), que han ocasionado y que ocasionarán en el futuro el incremento de lluvias, por ende, la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa (derrumbes y deslizamientos).
3. Realizar trabajos de sensibilización con los pobladores, autoridades y visitantes en temas de peligros geológicos y Gestión de Riesgo de Desastres, con el fin de que estén preparados, alertas y sepan cómo actuar ante la ocurrencia de nuevos eventos. Así como también a los pobladores y autoridades para prevenirlos y alertarlos de que, la intervención antrópica acelera los procesos de activación y/o reactivación de movimientos en masa.

ESTRUCTURALES

4. Realizar la estabilización definitiva del talud cerro Cruz de Shallapa, la primera etapa debe realizarse en la parte alta, entre las cotas 3330 – 3260 msnm, posteriormente estabilizar la parte baja.
5. Para la estabilización definitiva del talud cerro cruz de Shallapa, se recomienda utilizar la técnica de estabilización SOIL NAILING, a realizarse desde la cabecera hasta el pie del talud – Jirón Wiracocha.

Las características y detalles recomendados, a efectuar, deben estar implementada por especialistas. Así como también, de acuerdo a las técnicas existentes, se determinará la extensión del procedimiento. Se recomienda lo siguiente:

SOIL NAILING: La técnica del soil nailing², o claveteado de suelos, consiste en una técnica de refuerzo del terreno que se ha utilizado frecuentemente para estabilizar taludes, terraplenes, cortes del terreno, túneles y estructuras de contención. Para el caso del Cerro Cruz de Shallapa se debe realizar:

Sección Corte A: Un lanzado preventivo de shotcrete 2", anclajes de 3" de perforación con autoperforantes de R38 de 500KN de resistencia, una longitud de 25m en la cabecera distribuidos 5x5m (zona de areniscas con estratos abiertos), malla electrosoldada y shotcrete definitivo, en la parte media baja un sistema de banquetas con concreto ciclópeo con una inclinación 10° para efecto de volteo (Coriolis) anclados con pernos de 25 metros y culminar con una viga de apoyo de 50x50cm, drenes distribuidos uniformemente (figura 23 y 24).


² <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/07/05/soil-nailing-o-suelo-claveteado/>

Sección Corte B: Lanzado preventivo de shotcrete 2", anclajes de 3" de perforación con autoperforantes de R38 de 500KN de resistencia, una longitud de 10 m en la cabecera distribuidos 6x6m (zona de areniscas con estratos abiertos), malla electrosoldada y shotcrete definitivo, en la parte media baja un sistema de banquetas con concreto ciclópeo con una inclinación 10° para efecto de volteo (Coriolis) anclados con pernos de 25 metros y culminar con una viga de apoyo de 50x50cm, drenes distribuidos uniformemente (figura 25 y 26).

Sección Corte C: Para esta sección, son válidas las recomendaciones de la sección BB



Ing. LIONEL V. FIDEL SMOLL
Director
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET


Segundo A. Núñez Juárez
Jefe de Proyecto-Act. 11

12. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

AENOR. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales: Anclajes. UNE-EN 1537. Madrid: AENOR, 2013.

Alwash, D., Kalfat, R., Du, H., & Al-Mahaidi, R. (2021). Development of a new nano modified cement based adhesive for FRP strengthened RC members. *Construction and Building Materials*, 277, 122318.

Andino, P. M., & para las Comunidades Andinas, G. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. 0717-3733.

Chalmovský, J. (2017). Análisis estadístico-númericos para pruebas de pullout de anclajes de tierra. *EL DIARIO BÁLTICO DE INGENIERÍA DE CARRETERAS Y PUENTES*, 12(3), 145–153. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2017.17>

Chalmovský, J., Štefaňák, J., Miča, L., Kala, Z., Skuodis, Š., Norkus, A., & Žilionienė, D. (2017). Statistical-numerical analysis for pullout tests of ground anchors. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 12(3), 145-153.

Cheney, R. S. (1990). DP-68-Permanent Ground Anchors: Volume 2, Field Demonstration Project Summaries (No. FHWA-DP-90-068-003).

Cobbing, E.J.; Sánchez, A.; Martínez, W. & Zárate, H. (1996) - Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca. Hojas: 20-h, 20-i, 20-j, 21-i, 21-j. Ingemmet, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 76, 297 p. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/199>.

Das, B. M. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Cuarta Edición ed.). México: Cengage Learning.

de Ágreda, E. A. P. (2005). Estabilidad de Taludes. UPC, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografica i Geofisica.

de Vallejo, L. G., Nestares, E., Ferrer, M., & Andreotti, P. (2017). Los taludes en España en los últimos 50 años. *Revista Digital del Cedex*, (187), 85-85.

Dirección General de Carreteras. (2002). Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera. Art. 675 Anclajes del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Orden FOM 1382/2002.

Estaire Gepp, J., & Olivenza, G. (2013). Factores de seguridad en la estabilidad de taludes de acuerdo con el Eurocódigo EC-7 y el Anejo Nacional Español.

Falquez, D., Noboa, D., Rosero, D., & Proaño, G. (2011). Estudio comparativo del muro de hormigón armado y del muro reforzado con geosintéticos para la estabilidad del talud en el sitio crítico de la vía zhud-cochancay-el triunfo de la prov. cañar kilómetro 44+ 680. Escuela Superior Politecnica del Litoral.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2023). Peligros geológicos y zonas críticas entre Chavín de Huántar y Pomachaca. Distritos Chavín de Huántar, San Marcos, Huántar, Huachis y Huari; provincia Huari; departamento Áncash. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7361, 66p.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). Evaluación de peligros geológicos en el cerro Cruz de Shallapa y su influencia en la localidad de Chavín de Huántar. Distrito Chavín de Huántar, provincia Huari, departamento

Áncash. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7280, 48 p. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/4021>.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). Evaluación de peligros geológicos del centro arqueológico de Chavín de Huántar. Distrito Chavín de Huántar, provincia Huari, departamento Áncash. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7282, 25 p.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). Inspección geológica del derrumbe ocurrido el 30 de junio 2022 en el cerro Cruz Shallapa. Distrito Chavín de Huántar, provincia Huari, departamento Áncash. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7276, 24 p.

Neto, A. C., Guinea, F., Peres, N. M., Novoselov, K. S., & Geim, A. K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of modern physics*, 81(1), 109.

Ortuño Abad, L. (2001). Cálculo tradicional por equilibrio límite y métodos de rebanadas. ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS.

Rengifo, J. (2015). Muros Anclados en arenas, análisis y comparación de técnicas de anclajes. Facultad de Ciencias e Ingenierías. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú: sn.

Rivelino, R., Dos Santos, R. B., de Brito Mota, F., & Gueorguiev, G. K. (2010). Conformational effects on structure, electron states, and Raman scattering properties of linear carbon chains terminated by graphene-like pieces. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(39), 16367-16372.

Rodríguez González, C., & Kharissova, O. V. (2008). Propiedades y aplicaciones del grafeno. *Ingenierías*, 11(38), 17-23.

Romero, D., Quispe, J. (2008). Control estructural de la cuenca Jurásico – Cretácico (Chicama – Goyllarisquizga), del Peru Centro – Norte.

Sabatini, P. J., Pass, D. G., & Bachus, R. C. (1999). *Geotechnical engineering circular No. 4: ground anchors and anchored systems* (No. FHWA-IF-99-015).

Sanhueza Plaza, C., & Rodríguez Cifuentes, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, 12(1), 17-29.

Sentry, M., Bouazza, A., Al-Mahaidi, R., Carrigan, L., & Loidl, D. (2007). Developments in Ground Anchor Technology: Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP). In *Common Ground-10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Brisbane

Sentry, M., Bouazza, A., Al-Mahaidi, R., Loidl, D., Bluff, C., & Carrigan, L. (2009). Use of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) as an alternative material in permanent ground anchors. *Australian Geomechanics*, 44(3), 47.

Ucar Navarro, R. (2002). *Manual de Anclajes en obras de Tierras*. Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.

Valdéz Ponce, P. (2011). *Manual de diseño y construcción de Muros Anclados de Hormigón Proyectado*. Universidad de los Andes. (Bachelor's thesis, Quito: USFQ, 2011).

Valiente Sanz, R., Sobrecases Martí, S., & Díaz Orrego, A. (2016). Estabilidad taludes, conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. *Revista civilizate*, (7), 50-54.

Valladares, P. (2015). Estabilidad de taludes con anclas. Masther Thesis, UNAM, México.

Valdivia, W., Mamani, C. (2003). "Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Huari (19-i). Escala 1:100 000". Ingemmet, 19 p. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2157>.

Villota, H. (2005) - Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. 2. ed. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 210 p.

ANEXO 1: REGISTRO FOTOGRÁFICO



Fotografía 1: Vista de detalle de las limoarcillitas grises fuertemente fracturadas y muy meteorizadas correspondiente a la Formación Oyón.



Fotografía 2: Detalle de los niveles de carbón de 1 m aproximadamente correspondiente a la parte superior de la Formación Oyón.



Fotografía 3: Toma de muestras MR-1 – Coordenadas UTM Zona 18S: 260660.00 m E, 8939146.00 m S



Fotografía 4: Toma de muestras MR-2 – Coordenadas UTM Zona 18S: 260631.00 m E, 8939144.00 m S



Fotografía 5: Toma de muestras MR-4 – Coordenadas UTM Zona 18S: 260686.00 m E, 8939074.00 m S

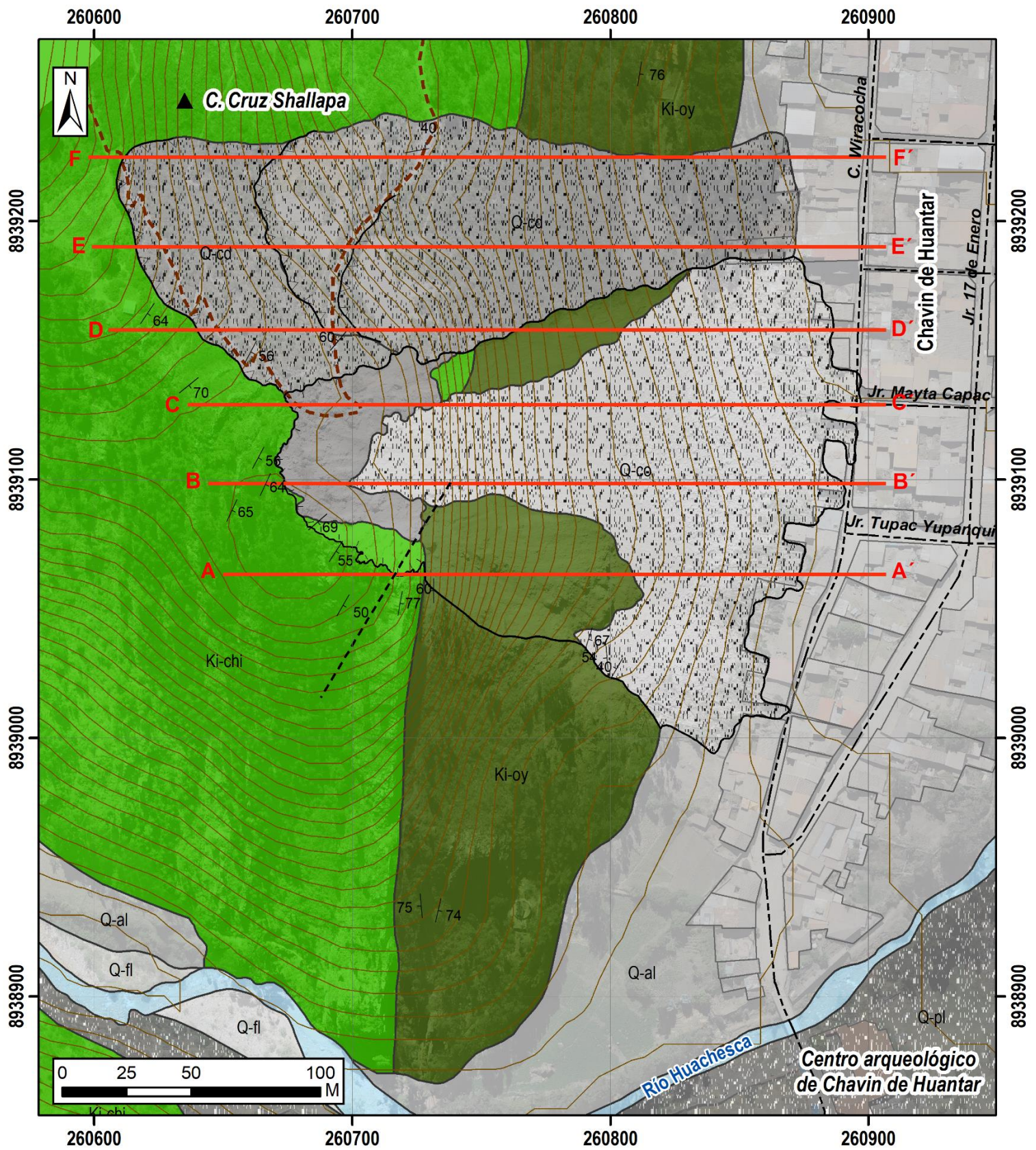


Fotografía 6: Toma de muestras MR-4 – Coordenadas UTM Zona 18S: 260686.00 m E, 8939074.00 m S




Fotografía 7: Toma de muestras MR-5 – Coordenadas UTM Zona 18S: 260723.00 m E, 8939069.00 m S.

ANEXO 2: MAPAS



ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Depósito fluvial	Q-fl
			Depósito coluvial	Q-co
			Depósito coluvio-deluvial	Q-cd
			Depósito proluvial	Q-pl
			Depósito aluvial	Q-al
MESOZOICO	CRETÁCICO	INFERIOR	Formación Chimú	Ki-chi
			Formación Oyón	Ki-oy

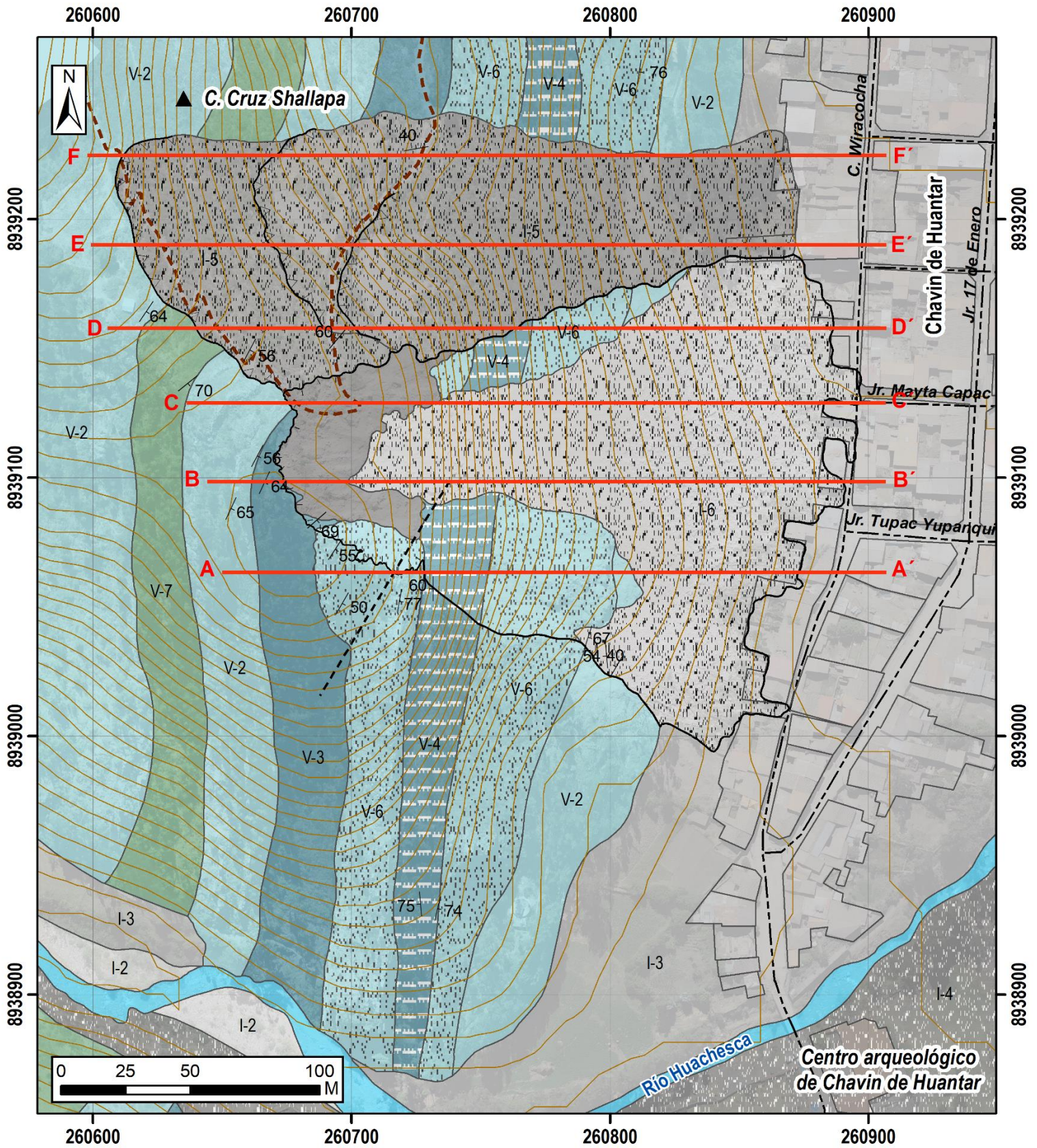
LEYENDA	
	Rumbos y buzamientos
	Falla inferida
	Zona de derrumbe
	Escarpa de deslizamiento
	Catastro urbano
	Lineas de perfil trazados
	Curvas de nivel
	Camino de herradura
	Calles y avenidas



SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INGEMMET
 INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO


ACT. 11: EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS A NIVEL NACIONAL

MAPA GEOLÓGICO	MAPA
Escala 1:2 000 Datum UTM WGS 84 Zona 18s Versión digital: año 2023 Impreso: Febrero 2023	01



GRUPO	UNIDAD	SUB UNIDAD	DENOMINACIÓN GENÉTICA	
			Litología	Color
SEDIMENTOS MODERNOS	DEPÓSITOS INCONSOLIDADOS (I)	I-2	Depósito fluvial	
		I-3	Depósito aluvial	
		I-4	Depósito proluvial	
		I-5	Depósito coluvio-deluvial	
		I-6	Depósito coluvial	
UNIDADES DEL SUBSTRATO	ROCAS SEDIMENTARIAS (V)	V-2	Areniscas y lutitas	
		V-3	Lutitas y limolitas	
		V-4	Lutitas, limonitas y areniscas	
		V-6	Areniscas cuarzosas	
		V-7	Lutitas y areniscas	

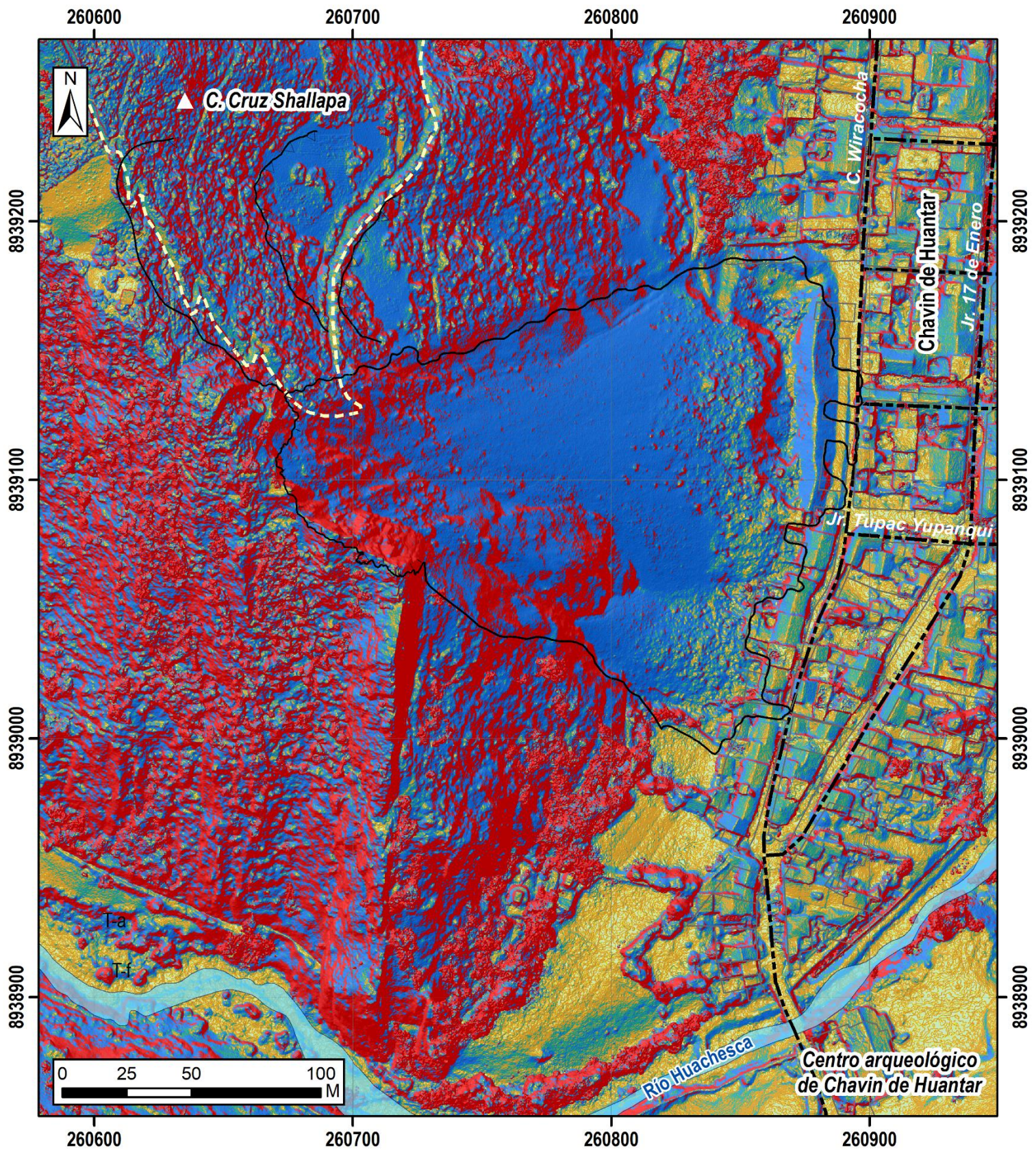
LEYENDA	
	Rumbos y buzamientos
	Falla inferida
	Zona de derrumbe
	Escarpa de deslizamiento
	Catastro urbano
	Lineas de perfil trazados
	Curvas de nivel
	Camino de herradura
	Calles y avenidas



SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INGEMMET
INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

ACT. 11: EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS A NIVEL NACIONAL

MAPA LITOLÓGICO	MAPA
Escala 1:2 000 Datum UTM WGS 84 Zona 18s Versión digital: año 2023 Impreso: Febrero 2023	02



RANGO DE PENDIENTES

0°-1°	Terreno llano
1°-5°	Terreno inclinado con pendiente suave
5°-15°	Pendiente moderada
15°-25°	Pendiente fuerte
25°-45°	Pendiente muy fuerte a escarpada
>45°	Terreno muy escarpado

LEYENDA

	Zona de derrumbe
	Escarpa de deslizamiento
	Catastro urbano
	Camino de herradura
	Calles y avenidas



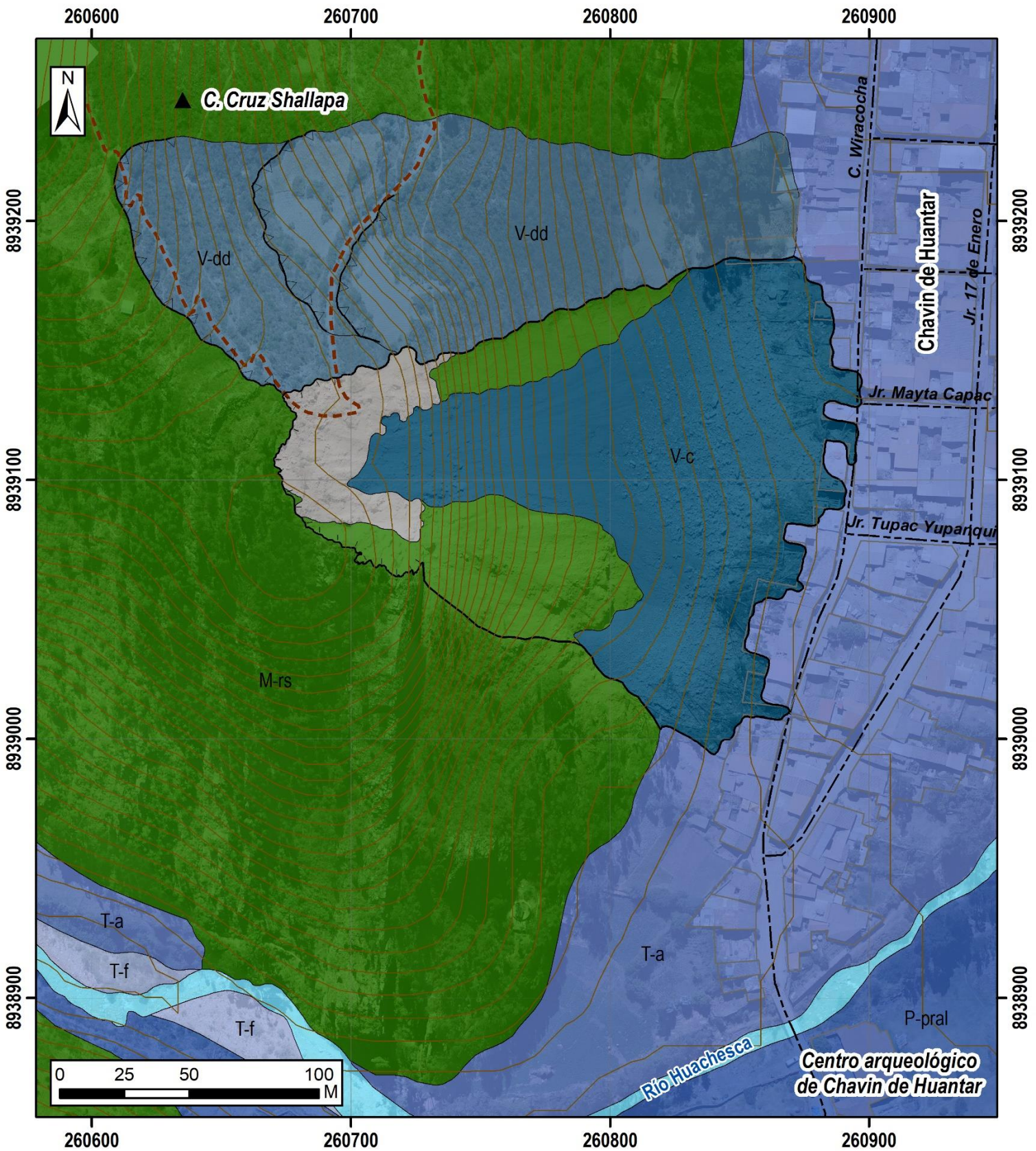
ACT. 11: EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS A NIVEL NACIONAL

PENDIENTES DE LOS TERRENOS

MAPA

Escala 1:2 000 Datum UTM WGS 84 Zona 18s
Versión digital: año 2023 Impreso: Febrero 2023

03



UNIDAD	SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA	
MONTAÑA	Montaña en roca sedimentaria	M-rs
VERTIENTE	Vertiente coluvial	V-c
	Vertiente con depósito de deslizamiento	V-dd
PIEDEMONTE Y ABANICO	Piedemonte proluvial o aluviotorrencial	P-pral
TERRAZA	Terraza aluvial	T-a
TERRAZA fluvial	Terraza fluvial	T-f

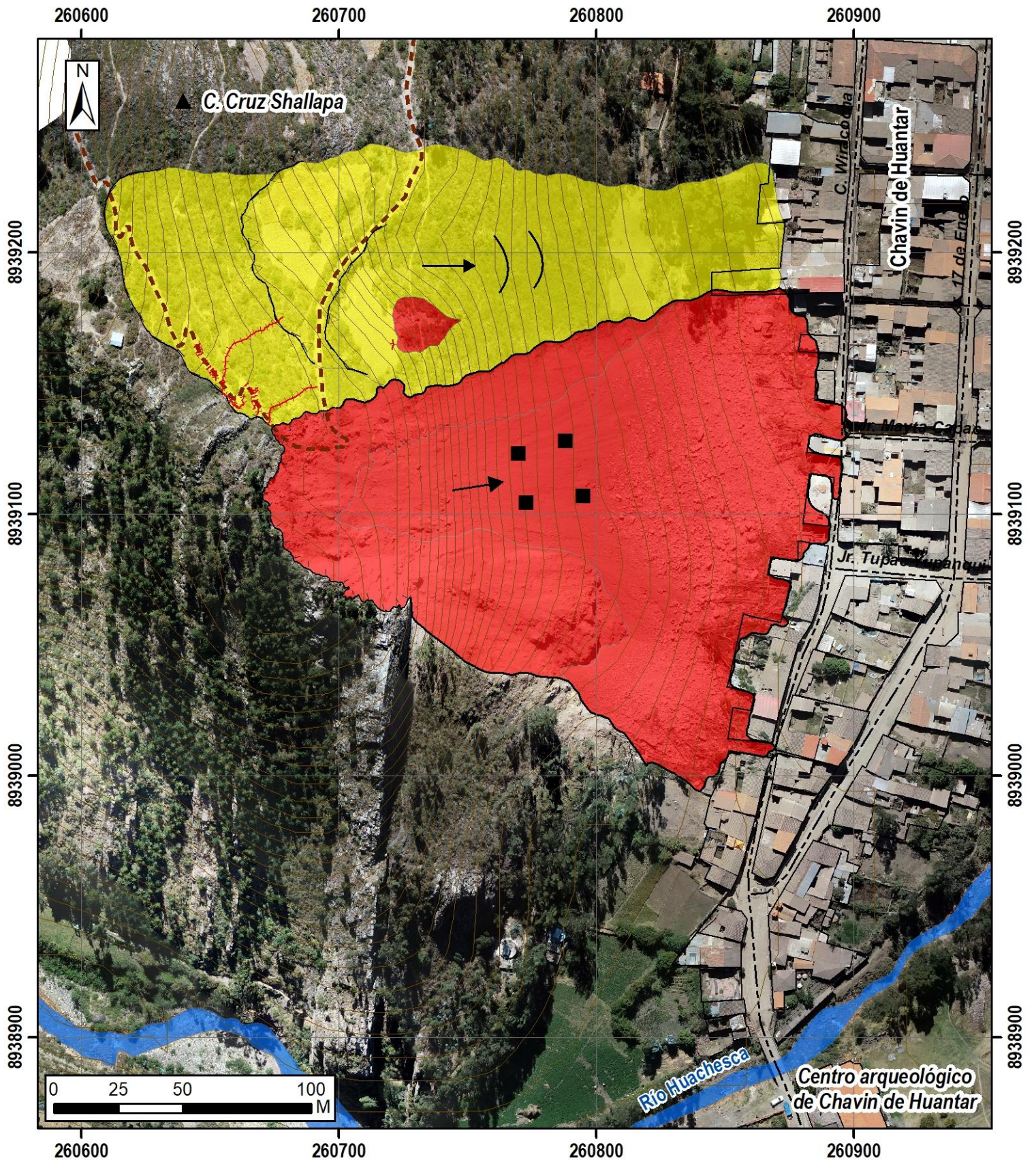
LEYENDA	
	Zona de derrumbe
	Escarpa de deslizamiento
	Catastro urbano
	Curvas de nivel
	Camino de herradura
	Calles y avenidas



SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INGEMMET
INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

ACT. 11: EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS A NIVEL NACIONAL



MAPA GEOMORFOLÓGICO	MAPA
Escala 1:2 000 Datum UTM WGS 84 Zona 18s Versión digital: año 2023 Impreso: Febrero 2023	04



LEYENDA

-  Derrumbe del 30/06/2022
-  Deslizamientos activo

SIMBOLOGIA

-  Agrietamientos
-  Zona de derrumbe
-  Escarpa de deslizamiento
-  Catastro urbano
-  Curvas de nivel
-  Camino de herradura
-  Calles y avenidas

SECTOR ENERGÍA Y MINAS

INGEMMET
 INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

ACT. 11: EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS A NIVEL NACIONAL

PELIGROS GEOLÓGICOS DEL CERRO SHALLAPA	MAPA 05
Escala 1:2 000 Datum UTM WGS 84 Zona 18s Versión digital: año 2023 Impreso: Febrero 2023	

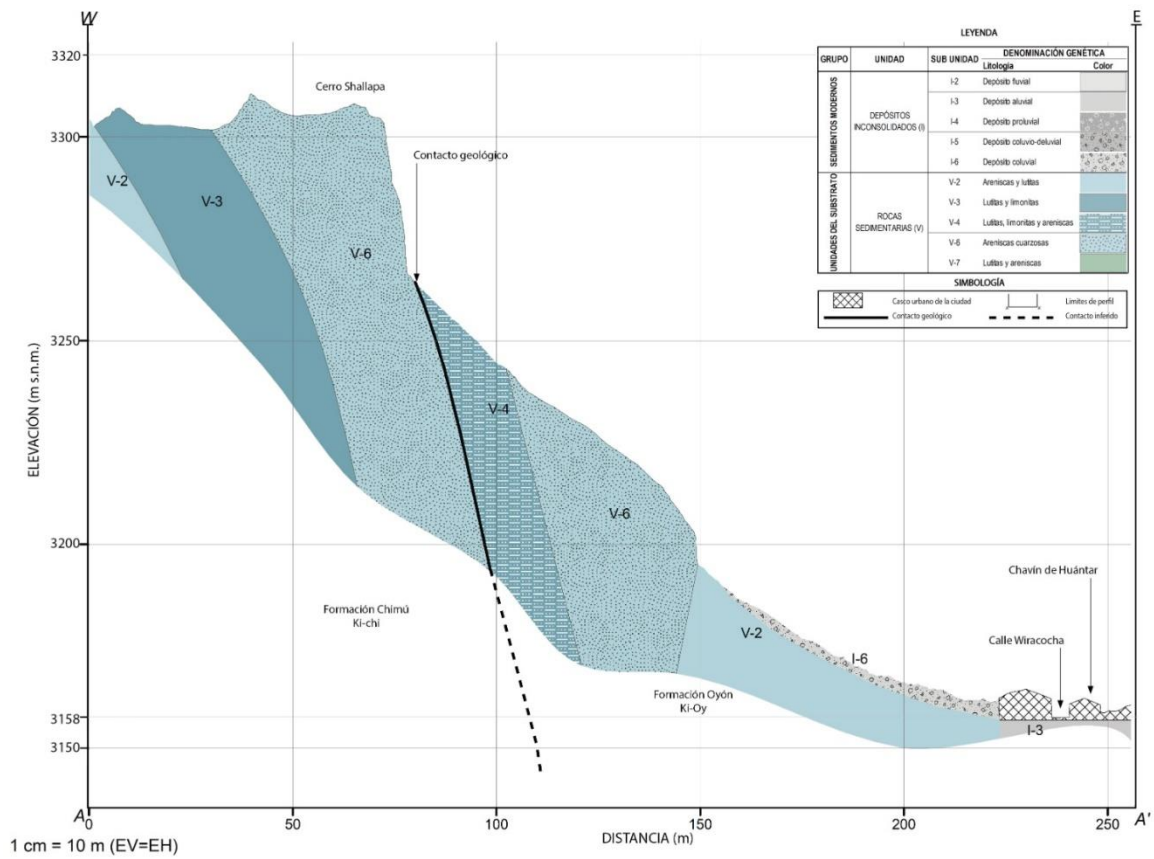


Figura 28: Perfil Geológico A-A'.

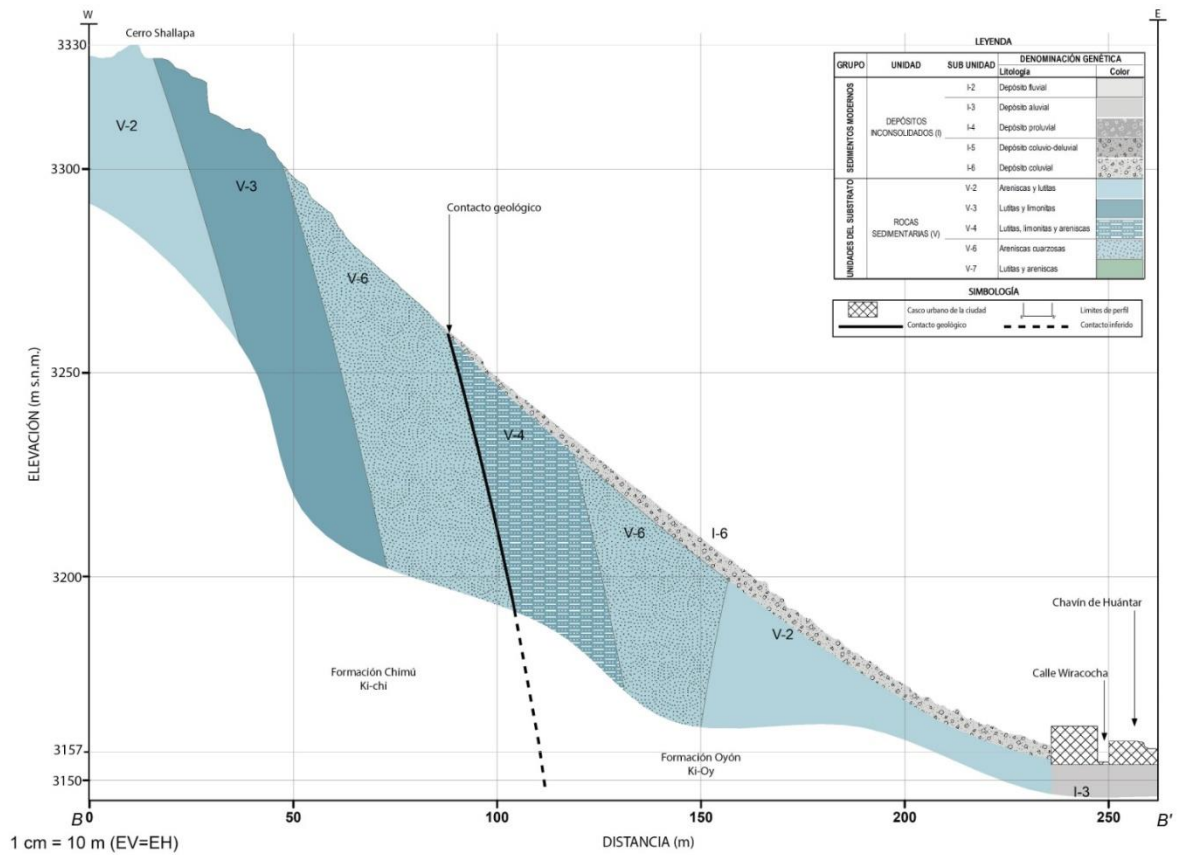


Figura 29: Perfil Geológico B-B'.

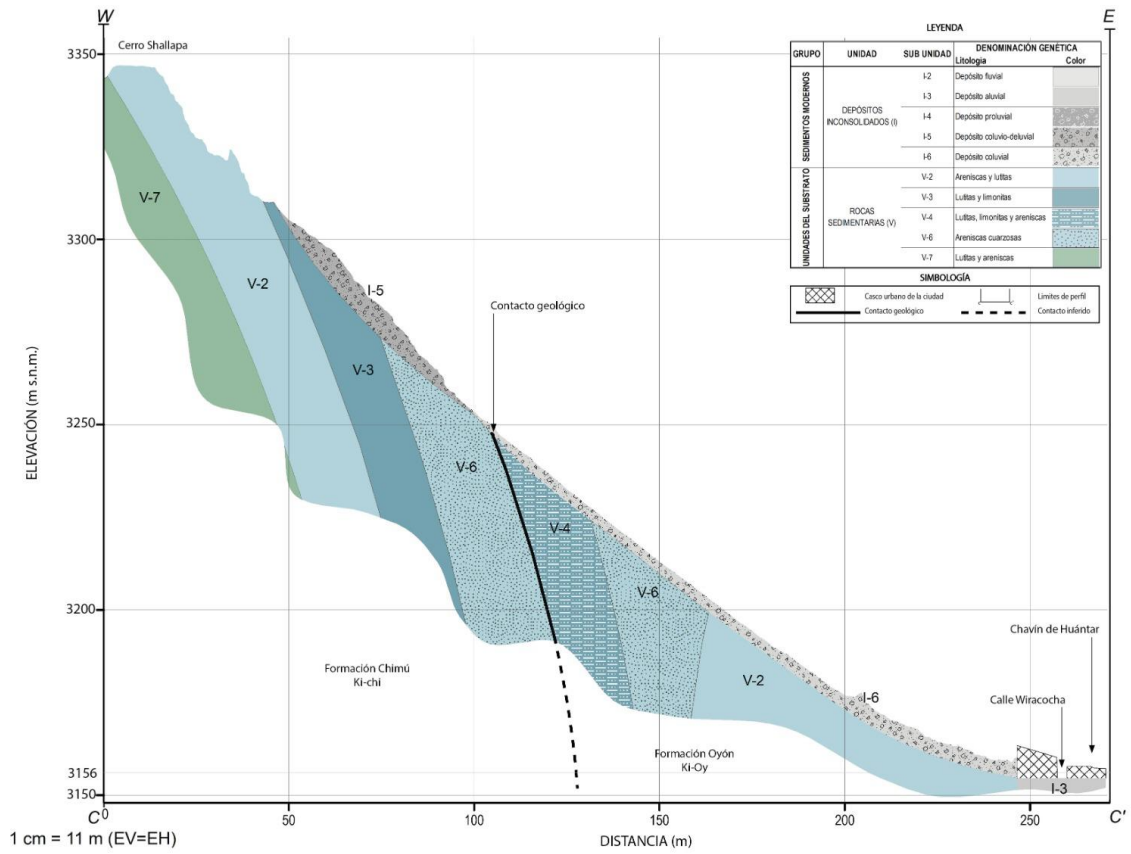


Figura 30: Perfil Geológico C-C'.

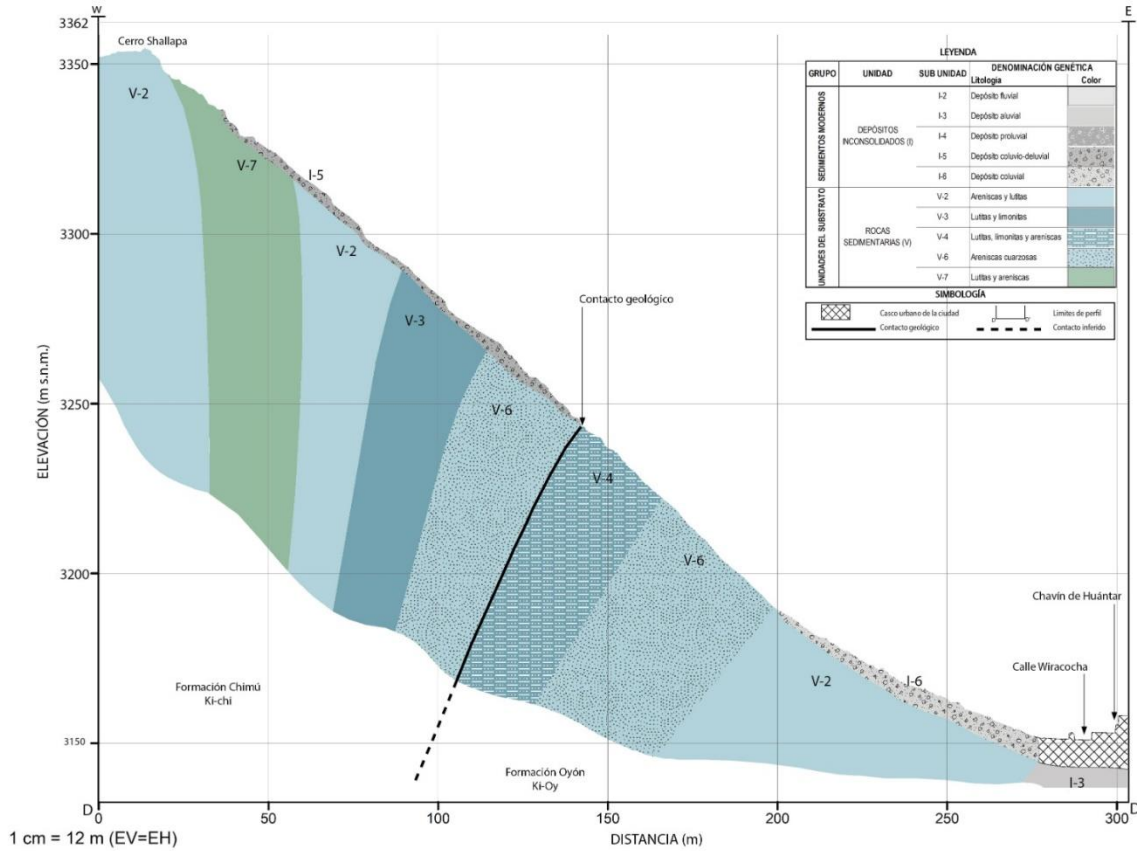


Figura 31: Perfil Geológico D-D'.

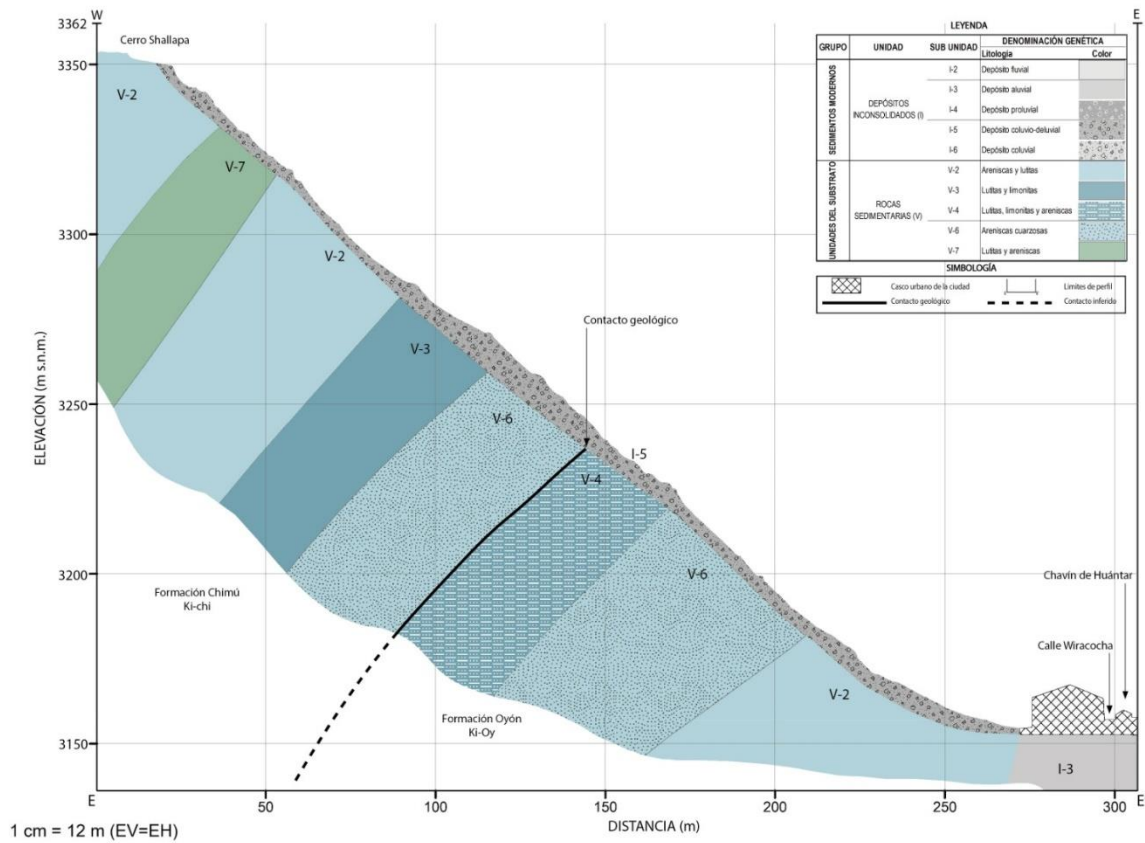


Figura 32: Perfil Geológico E-E'.

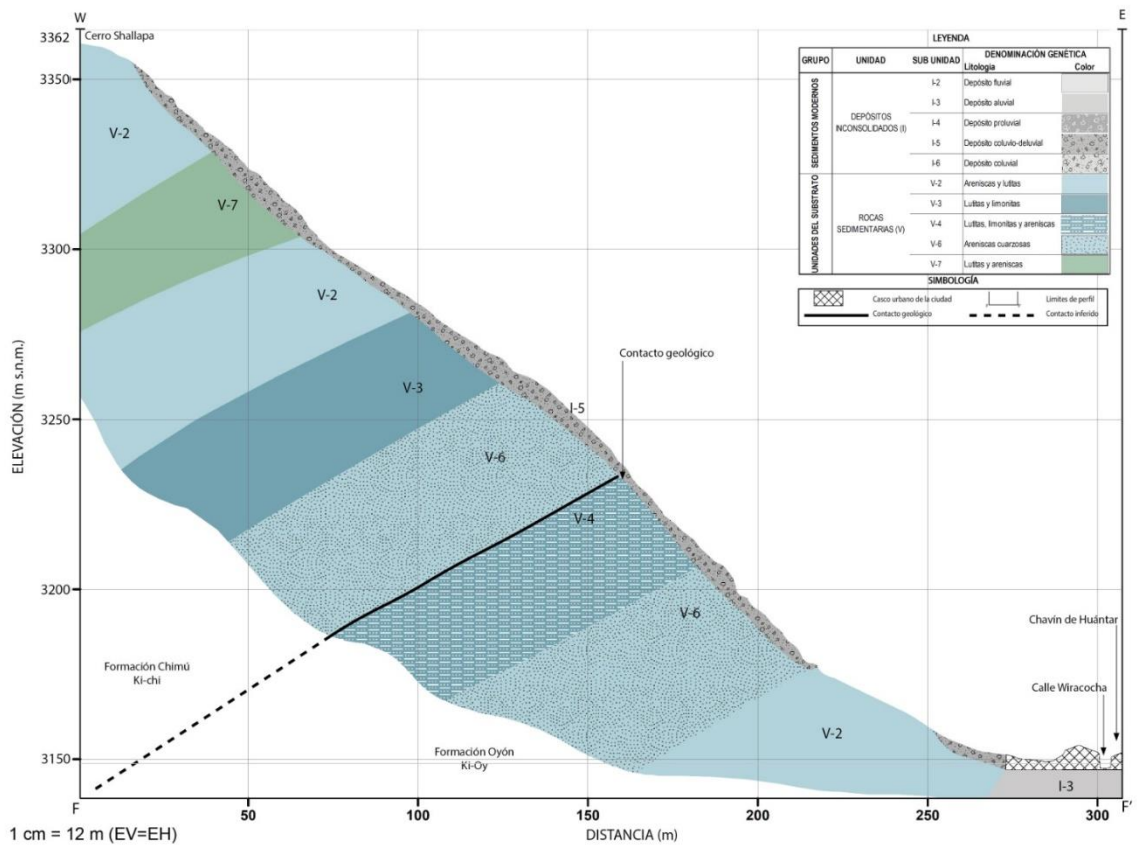
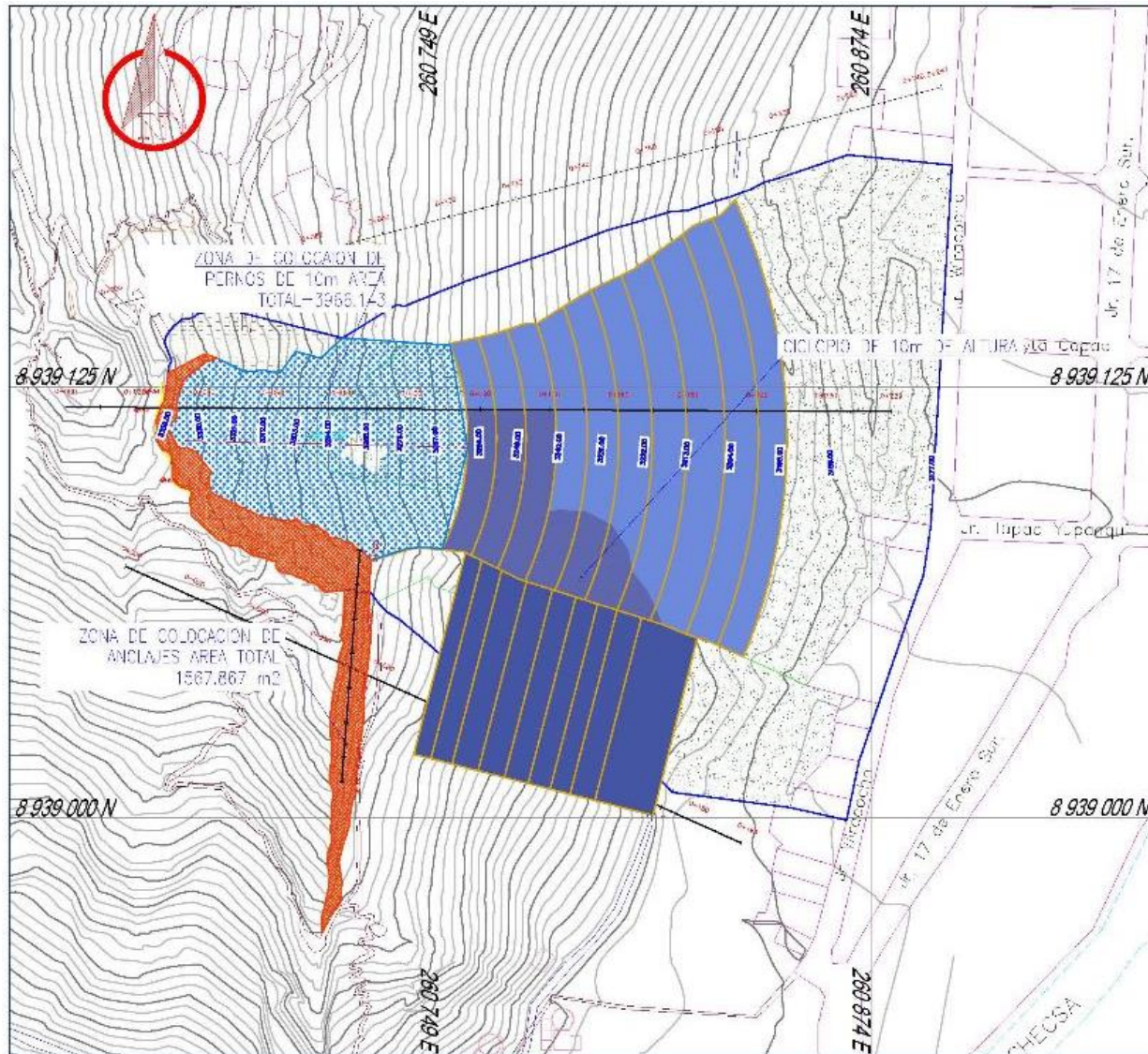
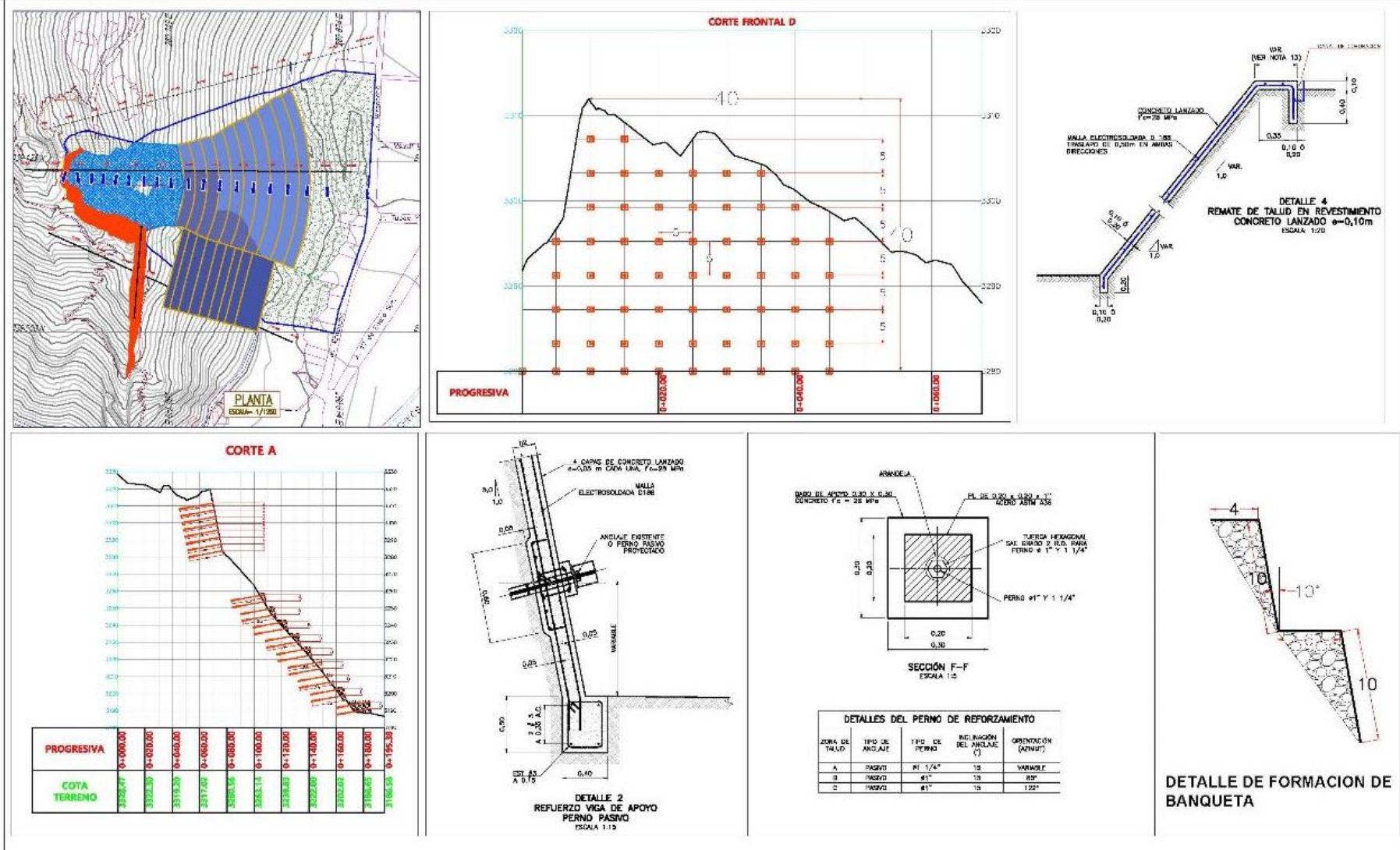


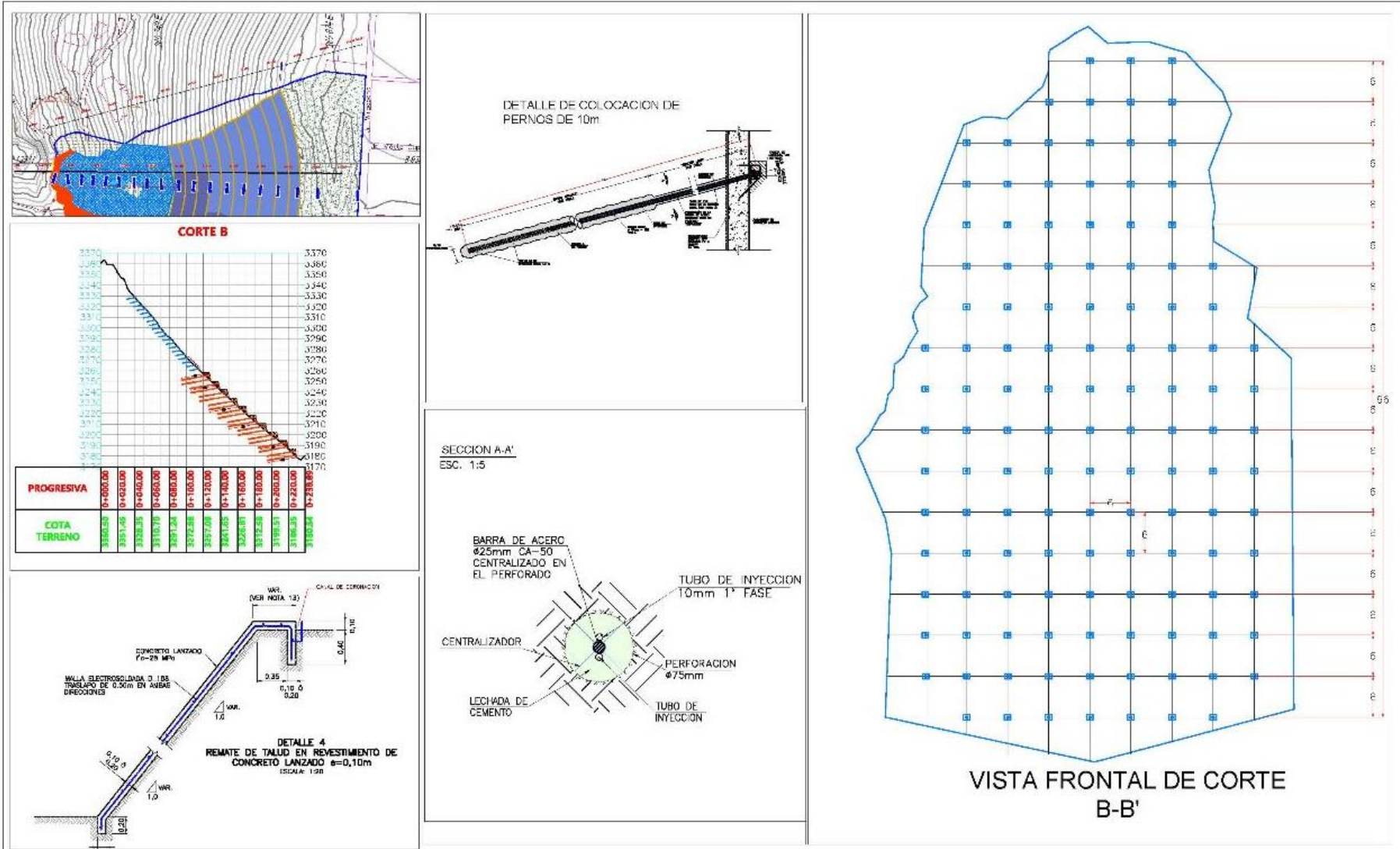
Figura 33: Perfil Geológico F-F'.

ANEXO 4: PROPUESTAS PARA ESTABILIZAR LA LADERA DEL CERRO SHALLAPA



SIGNOS CONVENCIONALES	
	CURVAS DE NIVEL
	SUPERFICIE TERRENO NATURAL
	ROCA ESTABLE
	AREA DE ROCA INESTABLE
	MATERIAL SUELTO Y EN DESLIZAMIENTO
	MATERIAL DESLIZADO Y ES ABLE
	TERRA NEGRA MOVIDA
	VIVIENDAS, CALLES
	CAMINO DE ACCESO
	CANAL DE IRRIGACION TUBA SEQUIA
	RESERVOIRIO DE AGUA POTABLE
	ACREDITAMIENTO TALA GEOLOGICA
	RIO
	ZONA DE COLOCACION DE PERROS 10 m
	ZONA DE COLOCACION DE ANCLAJES 25 m





NOTAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL MACIZO CON PERNOS EN ROCA (GRAMPOS)

PADRONIZACIÓN EJECUTIVA

1. Dimensiones en metros, salvo indicación
2. Verificar topográficamente las medidas y cotas en el lugar de la obra.
3. Para implantación
4. Para planta de drenaje de aguas pluviales
5. El contratista deberá conocer el lugar de la obra y demostrar experiencia en obras similares, antes de la firma del contrato de ejecución.
6. La ejecución de la obra debe estar de acuerdo con las especificaciones del proyecto.
7. Todas las fases de la obra deberán ser inspeccionadas obligatoriamente durante su ejecución y autorizadas por un ingeniero especializado en geotecnia, quien proporcionara las normas de ejecución y ajustes necesarios debido a las características reales de los condicionantes geotécnicos que se encuentren en el lugar de obra.

MONTAJE DE LOS PERNOS EN ROCA (GRAMPOS)

8. Los Grampos estarán compuestos por barras de acero CA-50 o CA-80 de 0.25 mm de diámetro con resistencia a tracción mínima admisible de 15.0 TF, envueltas en lechada de cemento inyectado con diámetro de perforación de 75 mm, como se indica en los detalles del informe.
9. Antes de montar los Grampos se deberán eliminar los signos de oxidación de las barras con la ayuda de cepillos de acero y las barras deben estar limpias, para eliminar las manchas de aceite, petróleo y/o grasa.
10. Las barras de acero deben recibir tratamiento anticorrosivo con resinas EPOXT.
11. Se deben utilizar barras enteras, no se admiten enmiendas ni traspases.
12. Se deben utilizar centralizadores, como se indica en los planos del informe, para asegurar el correcto posicionamiento de la barra.

PROCEDIMIENTO PARA PERFORR Y EJECUTAR LOS GRAMPOS

13. La ubicación topográfica de los Grampos debe realizarse utilizando marcas o estacas de madera en la pendiente que indica el centro de taladro.
14. A continuación, los Grampos deben ser perforados con los diámetros indicados en los planos del informe.
15. La perforación de los Grampos debe realizarse perfectamente con circulación de agua a un grado de presión observado y adecuado en campo, en este caso, recomendamos observar si durante la perforación se produce la comunicación de acuíferos. Si SL el equipo de agua a presión debe ser retirado de la epa y los Grampos hechos cerca de las discontinuidades que comunican los vacíos comunicación deben ser reinyectados.
16. Opcionalmente los Grampos deben ser perforados con aire comprimido para retirar el material excavado y limpiar el agujero.
17. En el proceso de perforación no se pueden utilizar lodos Bentónicos.
18. La perforación debe realizarse cuidadosamente a fin de identificar eventuales interferencias físicas a tiempo para promover una reubicación o redirección del Anclaje.
19. Si se encuentran interferencias localizadas, es aceptable, sin comprobación, una desviación de hasta 5° en la inclinación del campo y un desplazamiento de hasta 15% del espaciamiento padrón, en cualquier dirección.

20. Los Grampos deben ser realizados en línea, alternativamente (1 si, 2 no) y solamente después del curado de los primeros Grampos deben ser realizados los intermediarios.
21. Se debe garantizar la fracción lateral mediante un lavado eficiente del agujero con lechada de cemento.
22. Inmediatamente después de finalizar de perforación, se debe introducir la armadura de los campos como se indica en los planos del informe.
23. El agujero debe ser rellenado, el mismo día de la perforación, con lechada de cemento con factor agua-cemento igual a 0.5 y un consumo mínimo de cemento de 1200 kg/m con una resistencia a la compresión simple de 25 Mpa, proveniente de una mezcladora de alta turbulencia, deben extraerse muestras de lechada, y llevarlas a laboratorio para su ensayo a compresión simple (por lo menos una muestra de cada Grampos).

El relleno del agujero debe realizarse de abajo hacia arriba, con ayuda de un tuvo PVC rígido de pequeño diámetro, introducido en el interior del agujero hasta que la lechada de cemento quede limpia y rebalse limpia por la boca del agujero.

