

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7156

EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR MOVIMIENTO COMPLEJO (DESLIZAMIENTO-FLUJO DE DETRITOS) EN LA QUEBRADA PUSMALCA

Región Piura
Provincia Huancabamba
Distrito Canchaque



**EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR MOVIMIENTO COMPLEJO
(DESLIZAMIENTO- FLUJO DE DETRITOS) EN LA QUEBRADA PUSMALCA,
DISTRITO DE CANCHAQUE, PROVINCIA DE HUANCABAMBA, REGIÓN PIURA**



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

Equipo de investigación:

Cristhian Chiroque Herrera

Referencia bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2020). *Evaluación de peligro geológico por movimiento complejo (deslizamiento-flujo de detritos) en la quebrada Pusmalca*. Distrito de Canchaque, provincia de Huancabamba, región Piura. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7156, 65p.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivos del estudio	3
1.2. Antecedentes y trabajos anteriores	4
1.3. Aspectos generales	6
1.3.1. Ubicación	6
1.3.2. Accesibilidad	6
2. ASPECTOS GEOLÓGICOS	8
2.1. Unidades litoestratigráficas	8
2.1.1. Grupo Salas (Oi-s)	8
2.1.2. Centro Volcánico Sondorillo (P-s)	9
2.1.3. Cuerpos intrusivos (KP-gd-to)	10
2.1.4. Depósitos cuaternarios	10
3. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	13
3.1. Modelo digital de elevaciones (MDE)	13
3.2. Pendientes del terreno	13
3.3. Unidades geomorfológicas	15
3.3.1. Geoformas de carácter tectónico degradacional y erosional	15
3.3.1.1. Unidad de montaña	15
3.3.2. Geoformas de carácter depositacional y agradacional	17
3.3.2.1. Unidad de piedemonte	17
4. PELIGROS GEOLÓGICOS	22
4.1. Peligros geológicos por movimientos en masa	22
4.2. Movimiento complejo	22
4.1.1. Deslizamiento en el DME-111 (Z1)	23
4.1.1.1. Corona y escarpe	23
4.1.1.3. Zona de transición	27
4.1.2. Flujo de detritos (Z2)	30
4.1.2.1. Ancho de flujo	30

4.1.2.2.	Altura de flujo	31
4.1.2.3.	Cálculo de la velocidad del flujo.....	32
4.1.2.4.	Cálculo de velocidad basado en registro de vídeo del flujo.....	34
4.1.2.5.	Deposición.....	35
4.1.2.6.	Depósito de bloques	37
4.3.	Deslizamientos antiguos.....	37
4.4.	Avalancha de rocas antiguas	38
4.5.	Factores condicionantes	41
4.5.1.	Pendiente	41
4.5.2.	Litología	41
4.6.	Factores desencadenantes	42
4.7.	Daños por el movimiento complejo.....	44
4.7.1.	Viviendas	44
4.7.2.	Puentes.....	45
4.7.3.	Canales, drenes, bocatomas para abastecimiento de agua.....	45
4.7.4.	Vía vecinal Canchaque – Maraypampa.....	46
4.8.	Depósitos de materiales excedentes en estado crítico.....	46
4.8.1.	DME-01.....	47
4.8.2.	DME-04.....	47
4.8.3.	DME-07.....	48
5.	MODELAMIENTO NUMÉRICO DE FLUJO DE DETRITOS.....	49
5.1.	Preparación de datos.....	50
5.1.1.	Topografía	50
5.1.2.	Área de liberación	51
5.1.3.	Datos de densidad y fricción	52
5.1.4.	Cobertura vegetal.....	52
5.2.	Resultados.....	53
5.2.1.	Alturas de flujo.....	53
5.2.2.	Velocidad del flujo.....	54
6.	CONCLUSIONES.....	55
7.	RECOMENDACIONES.....	57
8.	BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXO 1:	MAPAS Y PERFILES	60

ANEXO 2: GLOSARIO	64
ANEXO 3: ALTERNATIVAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN	65

RESUMEN

El presente informe técnico es el resultado de la evaluación geológica y geodinámica del movimiento complejo que se originó como un deslizamiento del depósito de material excedente (DME) y que luego provocó un flujo de detritos que descendió por la quebrada Pusmalca afectando los caseríos Cruz Blanca, Agua Blanca, Pampas Minas y Potrerros; todos pertenecientes a la jurisdicción de la Municipalidad Distrital de Canchaque, provincia de Huancabamba, región Piura. Con este trabajo, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET, cumple con una de sus funciones que consiste en brindar asistencia técnica de calidad e información actualizada, confiable, oportuna y accesible en geología en los tres niveles de gobierno (distrital, regional y nacional).

El área de evaluación fue dividida en dos zonas, la zona de arranque o de deslizamiento que involucró el colapso del depósito de materiales excedentes ubicado en el kilómetro 111 de la carretera Canchaque – Huancabamba en el sector Cruz Blanca. En esta zona, afloran lavas andesíticas con piroclastos muy fracturados en las inmediaciones del sector El Tambo; hacia el norte, en el sector Surupite afloran andesitas y piroclastos de cenizas de composición dacítica muy fracturadas e intensamente meteorizadas. La zona de transporte o fase de flujo de detritos, descendió por la quebrada Pusmalca arrastrando a su paso bloques y clastos de tonalitas y granodioritas correspondientes a cuerpos intrusivos que afloran desde el sector Cruz Blanca hasta Canchamanchay, mientras que, hacia el oeste afloran pizarras, filitas y esquistos entre los sectores Mishahuaca y Potrerros.

Los depósitos cuaternarios están conformados por coberturas aluviales constituidas de gravas y clastos subredondeados con arenas limosas en capas poco compactas, porosas y húmedas; coluviales inconsolidados conformados por clastos, gravas y cantos angulosos de tamaños variables, envueltos en una matriz limo arcillosa con escasa cohesión, húmedas e inestables; proluviales asociados a la ocurrencia de flujos de detritos compuestos por fragmentos rocoso polimícticos y heterogéneos (bloques, clastos, gravas y arenas) en una matriz areno limosa y coluvio deluviales distribuidos en ambas márgenes de la quebrada Pusmalca cuya génesis está asociada a movimientos en masa antiguos.

El deslizamiento del DME-111, ocurrió sobre un piedemonte aluvial con pendientes moderadas (5° - 15°), sin embargo, el perímetro o pie del DME limitaba al oeste con pendientes muy fuertes (25° - 45°), relieves por donde descendió a gran velocidad el material deslizado originando un piedemonte con depósitos de deslizamiento. El flujo de detritos originó una vertiente aluvio torrencial que alcanzó hasta 110 m de ancho, en ambas márgenes de la quebrada Pusmalca se han identificado piedemontes coluvio deluviales originados por antiguos deslizamientos y avalancha de rocas, que se desprendieron desde las partes altas de las montañas de naturaleza intrusiva, metamórfica y volcánico sedimentaria que conforman relieves con pendientes muy fuertes a muy escarpadas.

El deslizamiento del DME-111, alcanzó una extensión total de 1252 m, el escarpe principal mide 1141 m de longitud y tiene desniveles con salto de falla de hasta 60 m, el área afectada asciende a 136 ha. La masa desplazada alcanzó los 970 m de longitud desde el escarpe hasta el pie del deslizamiento. Al sobresaturarse los materiales, originaron un flujo de detritos que descendió con velocidades que bordearon los 30 m/s o 108 k/m, la masa

alcanzó alturas máximas de 20 m y anchos de 70 m y 110 m. Los depósitos transportados alcanzaron centros poblados y caseríos ubicados 24 km aguas abajo.

El sector Cruz Blanca, donde ubica el DME-111 tiene un **Peligro Muy Alto** por movimientos complejos, generados por suelos poco compactos, deleznales, saturados y muy susceptibles a generar movimientos en masa. Existen materiales disponibles en el MDE-111 que aún no se han deslizado y que podrían reactivarse ante la presencia de lluvias intensas, no se descarta la ocurrencia de nuevos movimientos en masa.

Se recomienda, realizar trabajos de estabilización de laderas para disminuir la carga y los materiales disponibles para la generación de nuevos deslizamientos. Realizar la revegetación de las laderas afectadas, además de la implementación de estacas y cercos que bordeen los límites del deslizamiento para estimar posibles desplazamientos.

En la quebrada Pusmalca se deben implementar diques transversales separados de forma escalonada para disminuir la carga granular a los flujos que puedan reactivarse.

Las medidas mencionadas tienen la finalidad de reducir la energía de los flujos disminuyendo su poder destructivo.

Finalmente, se debe considerar el mapeo de los peligros geológicos identificados en la quebrada Pusmalca, el deslizamiento y el flujo de detritos, tomando en cuenta el ancho y alturas estimadas con la finalidad de planificar la reconstrucción y habilitación de bocatomas, tuberías de conducción y puentes, además de una planificación urbana adecuada.

1. INTRODUCCIÓN

El Ingemmet, institución técnico-científico que 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 (movimientos en masa) en zonas que tengan elementos vulnerables o que han sido afectadas por desastres ambientales ocasionados por deslizamientos y flujo de detritos como ocurrió en la quebrada Pusmalca en el distrito de Canchaque.

Atendiendo la solicitud del Gobierno Regional de Piura a través del Centro de Operaciones de Emergencia Regional (COER-Piura), según Oficio N° 028-2021-/GRP-100000, es en el marco de nuestras competencias que se realizó la evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa de tipo “movimiento complejo (deslizamiento-flujo)”, ocurridos el 17 de marzo de 2021, los cuales afectaron viviendas, puentes, zonas de cultivos, vías de acceso que comunicaban los caseríos Cruz Blanca, Agua Blanca, Pampas Minas y Potrerros.

La Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del Ingemmet designó al ingeniero Cristhian Chiroque Herrera para realizar la evaluación geológica, geomorfológica y geodinámica de los peligros geológicos que afectaron el área urbana e infraestructura vital, el trabajo de campo se realizó desde el 20 al 24 de marzo del 2021.

La evaluación técnica se basa en la recopilación y análisis de información existente de trabajos anteriores realizados por Ingemmet, los datos obtenidos durante el trabajo de campo (puntos de control GPS y fotografías terrestres y aéreas), el cartografiado geológico y geodinámico, con lo que finalmente se realizó la redacción del informe técnico.

Este informe se pone en consideración de la Municipalidad Distrital de Canchaque, Gobierno Regional de Piura y entidades encargadas de la gestión de riesgos de desastres, donde se proporcionan resultados de la inspección y recomendaciones para la mitigación y reducción del riesgo de desastres, a fin de que sea un instrumento técnico para la toma de decisiones.

1.1. Objetivos del estudio

El presente trabajo tiene como objetivos:

- a) Identificar, tipificar y caracterizar los peligros geológicos por movimientos en masa que se desarrollan en la quebrada Pusmalca debido al colapso de un depósito de materiales excedentes (DME), procesos geodinámicos que afectaron a varios caseríos comprometiendo la seguridad física de la población, viviendas, obras de infraestructura y vías de comunicación.
- b) Determinar los factores condicionantes y desencadenantes que influyen en la ocurrencia de movimientos en masa.
- c) Emitir las recomendaciones generales para la reducción o mitigación de los daños que puedan causar los peligros geológicos identificados.

1.2. Antecedentes y trabajos anteriores

Existen trabajos previos y publicaciones del INGEMMET relacionados a temas de geología y geodinámica externa de los cuales destacan los siguientes:

A. Informe A6787: “Peligros geológicos y geo-hidrologicos detonados por el Niño Costero 2017 en la región Piura: análisis geológico, geomorfológico y de peligros en la ciudad de Piura y centros poblados afectados por inundación en el tramo comprendido entre la presa Los Ejidos y la Unión” (Vílchez. M, et al 2017). Este estudio actualizó el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa de la región, mediante la superposición de capas o mapas de factores condicionantes como la litología y las pendientes, mediante un geoprocesamiento en GIS, se generó un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:100 000 (figura 01). Los sectores Cruz Blanca, Surupite, El Tambo y el DME-111, se ubican sobre relieves con susceptibilidad muy alta a alta a la generación de movimientos en masa donde finalmente ocurrió el deslizamiento (Fase 1); mientras que, la quebrada Pusmalca por donde descendió el flujo (Fase 2), presenta peligro alto ante movimientos en masa. En estos sectores, se describen afloramientos de rocas intensamente meteorizadas, muy fracturadas y saturadas; con discontinuidades desfavorables, depósitos superficiales inconsolidados, laderas con pendientes entre 30° a 45°, con evidencias de antiguos movimientos en masa.

B. Boletín N° 39, serie A, Carta Geológica Nacional: “Geología de los cuadrángulos de Las Playas, La Tina, Las Lomas, Ayabaca, San Antonio, Chulucanas, Morropón, Huancabamba, Olmos y Pomahuaca 9-c, 9-d, 10-c, 10-d, 10-e, 11-c, 11-d, 11-e, 12-d y 12-e (1987).

El área de evaluación se ubica al extremo sureste de la hoja 11-d a escala 1: 100,000 que abarca gran parte de los distritos de Canchaque y San Miguel de El Faique pertenecientes a la provincia de Ayabaca. En la parte alta donde se ubica el DME-111, afloran rocas volcánicas conformadas por lavas andesíticas intercaladas con niveles piroclásticos ubicados al flanco sur del depósito, este conjunto se encuentra intensamente fracturado y meteorizado lo que genera bloques, clastos y detritos angulosos. En el flanco norte del DME, afloran lavas andesíticas con piroclastos de cenizas de composición andesítica y dacítica del Grupo Salas conformadas por filitas y esquistos. Al oeste afloran rocas intrusivas a lo largo de la quebrada Pusmalca conformados por tonalitas y granodioritas. En conjunto estos afloramientos, aportaron una gran secuencia detrítica conformada por bloques, clastos y gravas de andesitas, tonalitas y granodioritas que se transportaron ladera abajo debido a deslizamientos y flujos antiguos.

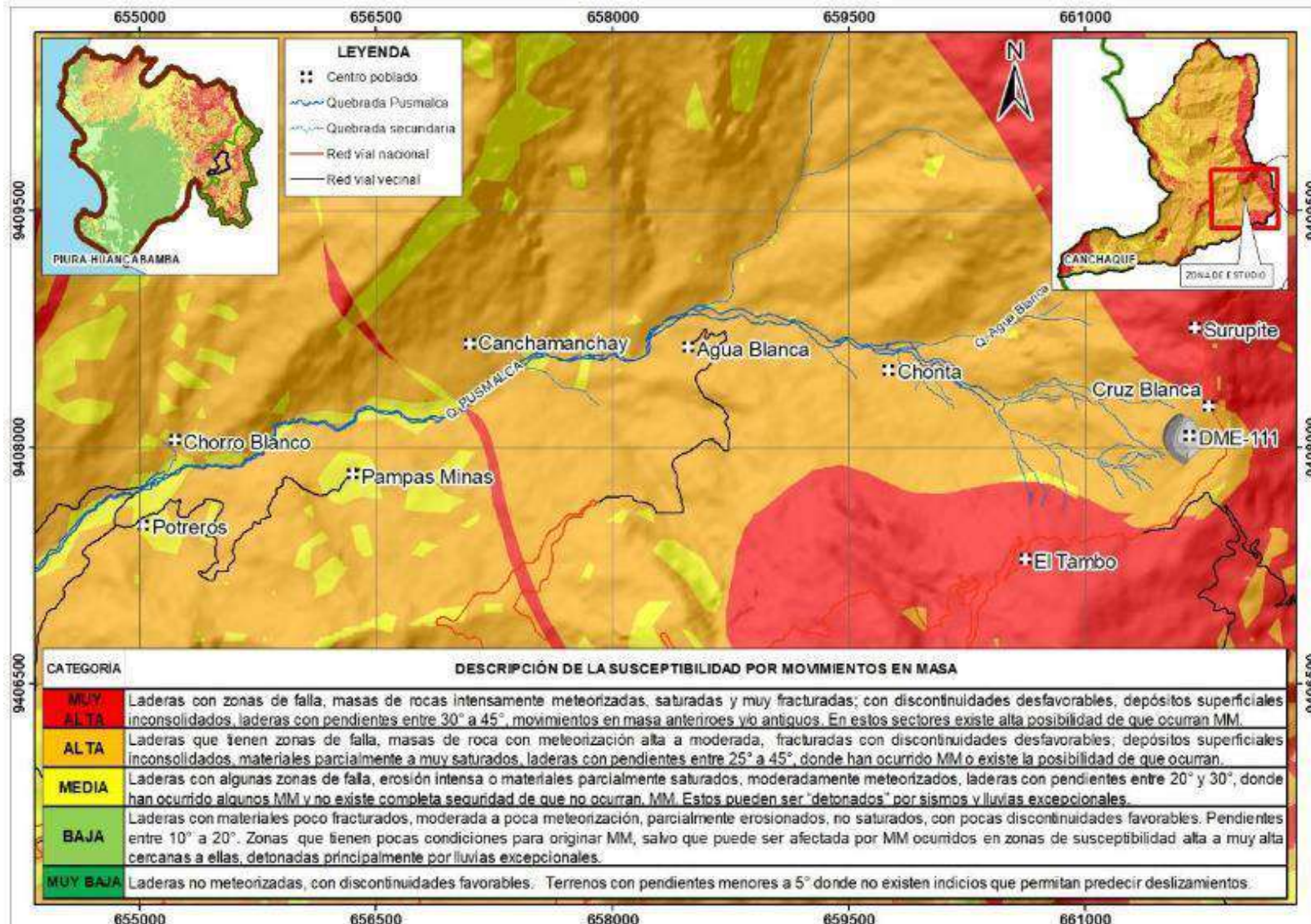


Figura 01. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:100 000 de la zona de evaluación (Vilchez et al., 2017).

1.3. Aspectos generales

1.3.1. Ubicación

El área de estudio se ha dividido en una zona de arranque o deslizamiento (Z1) y la zona de canal de transporte o flujo de detritos (Z2). La zona de arranque o también llamada zona de deslizamiento abarca los sectores Surupite, Cruz Blanca y El Tambo. La zona de transporte o fase de flujo de detritos se extiende a través de los sectores Cruz Blanca, Chonta, Canchamanchay, Pampas Minas, Corro Blanco y Potreros; que pertenecen al distrito de Canchaque, provincia de Huancabamba, región Piura (figura 02), ubicados en las siguientes coordenadas UTM (WGS84 – Zona 17S):

Cuadro 01. Coordenadas del área de evaluación

N°	UTM - WGS84 - Zona 17L		Geográficas	
	Este	Norte	Latitud	Longitud
1	654263	9409135	5° 20' 38.40" S	79° 36' 28.06" O
2	661989	9448029	5° 20' 36.95" S	79° 32' 17.11" O
3	662002	9405272	5° 22' 43.59" S	79° 32' 16.37" O
4	654276	9405245	5° 22' 45.04" S	79° 36' 27.34" O
COORDENADA CENTRAL DE LA ZONA EVALUADA O EVENTO PRINCIPAL				
Z-1	661663	9408038	5° 21' 13.57" S	79° 32' 27.62" O

1.3.2. Accesibilidad

El acceso a la zona se realizó desde la ciudad de Piura mediante la siguiente ruta:

Cuadro 02. Rutas y accesos a la zona evaluada

Ruta	Tipo de vía	Distancia (km)	Tiempo estimado
Piura - Morropón	Asfaltada	63	1 h 15 min
Morropón – Canchaque	Asfaltada	99.8	2 h 10 min

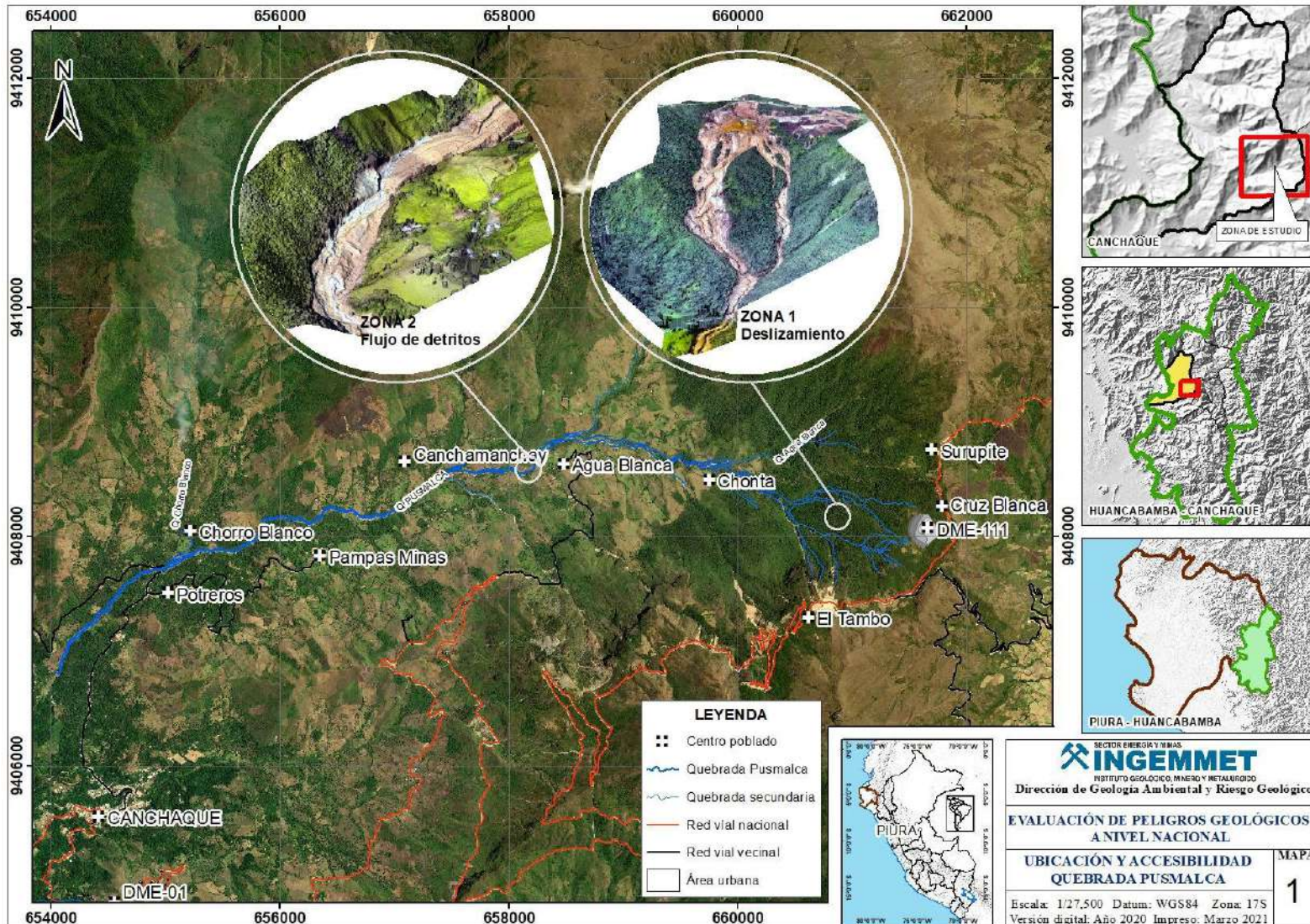


Figura 02. Mapa de ubicación de la quebrada Pusmalca, sectores y caseríos afectados por el flujo.

2. ASPECTOS GEOLÓGICOS

El análisis geológico se desarrolló en base al cuadrángulo geológico de Morropón hoja 11-d-II a escala 1:50 000 y al Boletín N° 039 “Geología de los cuadrángulos de Las Playas, La Tina, Las Tomas, Huancabamba, entre otros” (Reyes & Caldas, 1987). Además, se realizó la interpretación de imágenes satelitales, fotos aéreas y observaciones de campo.

Para una mejor descripción, el área de evaluación se ha dividido en dos zonas (figura 06):

Zona 1: Zona de arranque o zona de deslizamiento.

Corresponde a la parte alta de la cabecera de la quebrada Pusmalca donde afloran lavas andesíticas intercaladas con niveles piroclásticos observados en las inmediaciones del sector El Tambo ubicado al sur de la naciente; hacia el norte o margen derecha, afloran lavas andesíticas con piroclastos de cenizas de composición andesítica y dacítica donde se ubica el sector Surupite. Estos afloramientos se encuentren intensamente fracturados y meteorizados producto de pliegues anticlinales y sinclinales que ejercieron esfuerzos en los macizos rocosos, además del clima altamente húmedo y lluvioso que afecta la integridad de las rocas y sobresatura los depósitos de cobertura reciente. Entre los sectores El Tambo y Surupite, específicamente en el kilómetro 111 se ubicaba el depósito de materiales excedentes deslizado denominado en adelante como DME-111, en este DM, se acumularon materiales conformados por clastos y gravas de diferente naturaleza en una matriz limo arenosa.

Zona 2: Canal de transporte o flujo.

Formado por el cauce de la quebrada Pusmalca, inicia en el sector Cruz Blanca hasta el sector Canchamanchay, en este tramo afloran granodioritas y tonalitas en contacto con filitas, pizarras y esquistos del Grupo Salas, estas se proyectan hacia el oeste hasta sector Los Potreros abarcando los caseríos Pampas Minas, Mishahuaca, La Esperanza, La Paccha, Santa Rosa y La Perla. La Zona 2, tiene antiguos deslizamientos y avalancha de rocas, evidenciada en la presencia de mega bloques dispersos a lo largo de las laderas en forma de abanicos o piedemontes aluviales.

2.1. Unidades litoestratigráficas

A continuación, se describen las características litológicas locales de los afloramientos en la zona de estudio:

2.1.1. Grupo Salas (Oi-s)

Las rocas del Grupo Salas están conformadas por pizarras, filitas y esquistos que se exponen de mejor forma en los sectores Mishahuaca y Potreros, estos afloramientos se encuentran muy fracturados e intensamente meteorizados. La meteorización provocada por la humedad, el aire, la temperatura de la zona de evaluación origina que este tipo de litologías formen coberturas arcillosas (figura 03).



Figura 03. Contacto entre filitas y tonalitas en el sector Potreros, margen derecha de la quebrada Pusmalca.

2.1.2. Centro Volcánico Sondorillo (P-s)

El Volcánico Sondorillo está dividido en un miembro inferior expuesto en las inmediaciones del sector El Tambo y conformado por lavas andesíticas intercaladas con niveles piroclásticos muy fracturados e intensamente meteorizados. El miembro superior representado por afloramientos de andesitas con piroclastos de cenizas de composición andesítica y dacítica en secuencias muy fracturadas (figura 04).



Figura 04. Afloramientos de andesitas con piroclastos observados en la carretera Canchaque Huancabamba cerca al DME-111.

2.1.3. Cuerpos intrusivos (KP-gd-to)

Son afloramientos conformados por granodioritas y tonalitas de textura granular expuestas desde los sectores Chonta hasta Canchamanchay, estas rocas se emplazan en una franja con dirección norte a sur. Este tipo de litología se muestra muy fracturada y medianamente meteorizada, siendo la mayor fuente de materiales para el flujo de detritos, principalmente de arenas, clastos y bloques mayores a 3 m de diámetro (figura 05).



Figura 05. Granodioritas y tonalitas próximas al sector Pampas Minas.

2.1.4. Depósitos cuaternarios

Depósitos aluviales (Q-al)

Se distribuyen en la parte alta de los sectores El Tambo, Cruz Blanca y Surupite, se encuentran cubriendo andesitas y piroclastos muy fracturados. Están conformadas por arenas arcillosas con gravas y clastos dispersos de granulometría angulosas a subangulosas muy poco clasificados y heterogéneos. Han sido depositados por la esorrentía y flujos de corto recorrido debido a la meteorización de rocas insitu.

Depósitos coluviales (Q-co)

Los depósitos coluviales son producto de deslizamientos, desarrollados en la ladera este del cerro Cruz Blanca entre los sectores El Tambo y Surupite. Estos depósitos están constituidos por bloques, clastos y gravas angulosas, heterométricas y de origen volcánico, dentro de una matriz limo arcillosa, con escasa cohesión, plasticidad media, húmedas o saturadas e inestables, presentan malas características geotécnicas y se consideran suelos no competentes, susceptibles a la generación de movimientos en masa.

Depósitos proluviales (Q-pl)

Estos depósitos están compuestos por fragmentos rocosos polimícticos y heterométricos (bloques, gravas y arenas) soportados en matriz areno-limosa, que han sido depositados en forma de chorreras a lo largo de la quebrada Pusmalca. Estos materiales están asociados directamente a las ocurrencias de flujos de detritos o huacos.

Depósitos coluvio-deluvial (Q-cd)

Son aquellos depósitos que se encuentran acumulados al pie de laderas prominentes, como material de escombros constituidos por bloques de gravas, guijarros con clastos subangulosos a angulosos y matriz areno-limosa que han sufrido transporte, se presentan entre los sectores Chonta, Agua Blanca y Pampas Minas mayormente en la margen izquierda de la quebrada Pusmalca. Los depósitos de esta unidad son conformados por depósitos de movimientos de masa antiguos, como los deslizamientos, avalanchas y derrumbes.

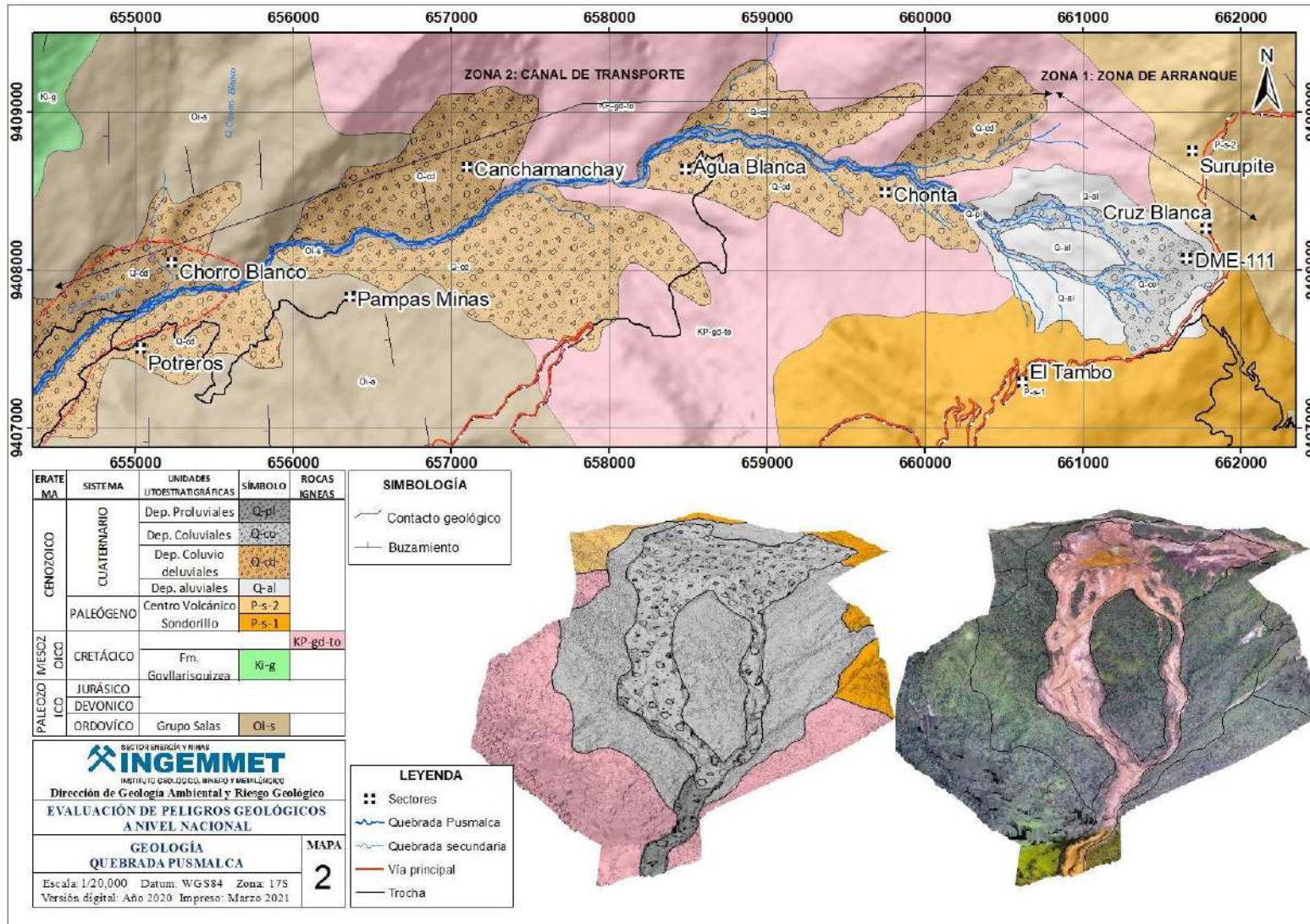


Figura 06. Geología del cuadrángulo de Morropón 11-d-II a escala 1:50 000 (Mejorado de Reyes & Caldas, 1987).

3. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

Para el análisis de la geomorfología, la brigada de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR) realizó el levantamiento fotogramétrico con drones, de donde se obtuvo el modelo digital de elevaciones, pendientes y ortofoto con una resolución (GSD) de 5 cm por pixel, esta información se complementó con un MDT extraído del servicio ALOS PALSAR de 12.5 m/pix. Además, se realizó la revisión de imágenes satelitales y el análisis de la morfometría del relieve en los trabajos de campo.

3.1. Modelo digital de elevaciones (MDE)

La zona de arranque del deslizamiento se desarrolló sobre relieves con elevaciones entre 3151 m s.n.m y 2392 m s.n.m; mientras que, el canal de transporte constituido por el cauce de la quebrada Pusalca desde el sector Cruz Blanca hasta el caserío Potreritos presenta relieves con cotas entre 2395 m s.n.m. Las máximas elevaciones se encuentran al este donde se ubicada el DME-111 en el sector Surupite. El escarpe del deslizamiento inicia en la cota 3064 y se desplaza hasta 2381 m s.n.m.

3.2. Pendientes del terreno

El análisis del mapa de pendientes se determinó que, el DME-111 se ubicaba sobre una superficie con pendientes moderadas (5° - 15°), sin embargo, el perímetro y alrededores presentan pendientes fuertes a muy fuertes (15° - 45°). La zona de transporte o canal por donde descendió el flujo presenta pendientes fuertes (15° - 25°). Las pendientes muy escarpadas abarcan los afloramientos de rocas muy fracturadas y conforman las partes altas de las montañas (figuras 07 y 08).

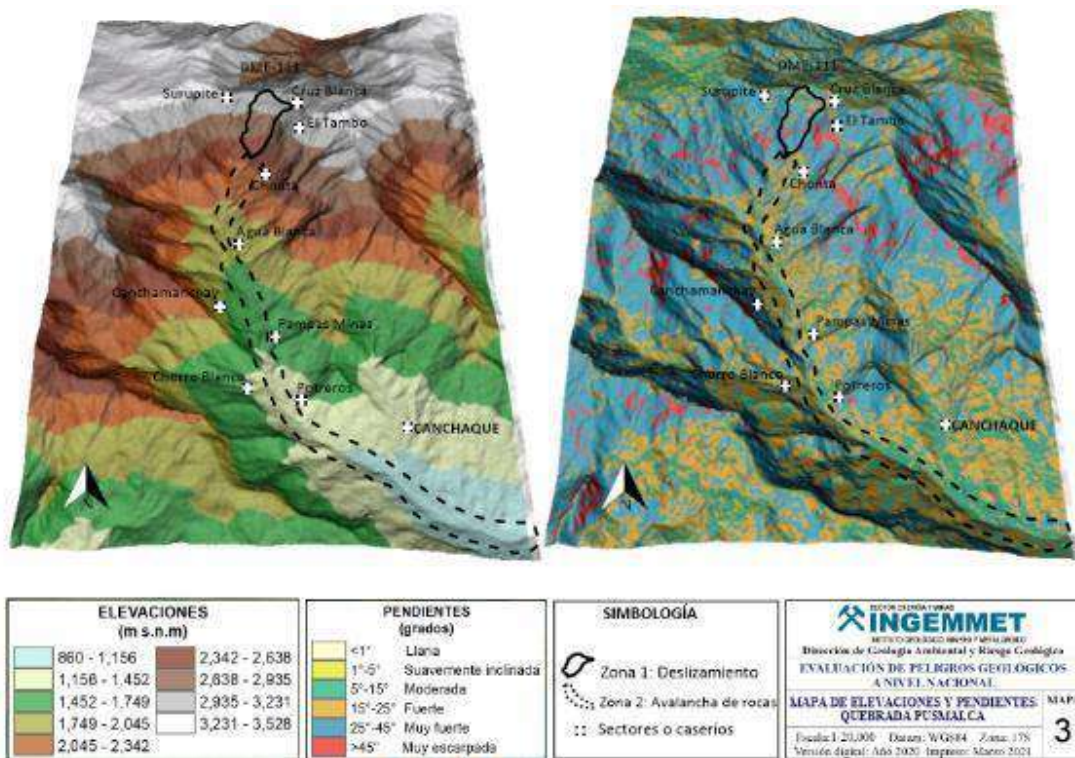


Figura 07. Mapas de elevaciones y pendientes del deslizamiento y flujo en la quebrada Pusalca.

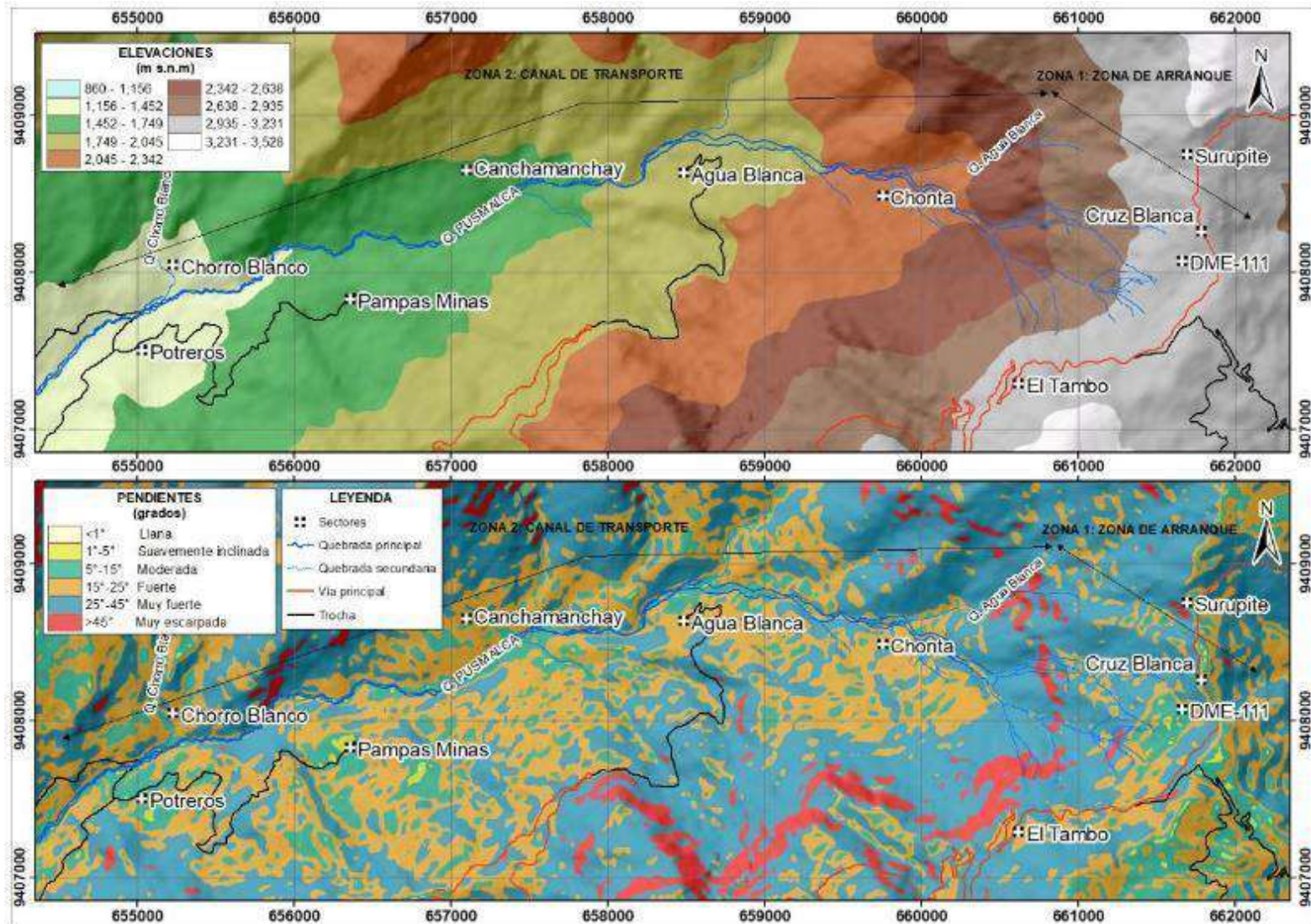


Figura 08. Mapa de elevaciones y pendientes del área de evaluación (Adaptado y mejorado del Boletín C-052).

3.3. Unidades geomorfológicas

En general, desde el punto de vista morfoestructural regional, el área estudiada se ubica en la cordillera occidental del Perú, la cual se encuentra disectada por varios cursos de ríos y quebradas, entre los principales se tienen a los ríos Chira, Piura y Huancabamba. (Vílchez et al., 2013). La zona de evaluación que abarca, la naciente y curso de la quebrada Pusalca está dominada por montañas en rocas volcánicas, intrusivas y sedimentarias en la mayoría con grados de fracturamiento muy alto e intensamente meteorizadas, estas geoformas presentan pendientes moderas a muy escarpadas y fueron las principales fuentes de aporte a antiguos deslizamientos y avalancha de rocas que modelaron las geoformas observadas en el curso de dicha quebrada.

3.3.1. Geoformas de carácter tectónico degradacional y erosional

Las geoformas de carácter Tectónico degradacional y erosional resultan del efecto progresivo de los procesos morfodinámicos degradacionales sobre los relieves iniciales originados por la tectónica o sobre algunos paisajes construidos por procesos exógenos agradacionales, estos procesos conducen a la modificación parcial o total de estos a través del tiempo geológico y bajo condiciones climáticas cambiantes (Villota, 2005):

3.3.1.1. Unidad de montaña

Es la unidad o componente de cualquier cadena montañosa y se define como una gran elevación natural del terreno, de diverso origen, con más de 300 metros de desnivel, cuya cima puede ser aguda, sub aguda, semiredondeada, redondeada o tabular y cuyas laderas regulares, irregulares a complejas y que presenta un declive promedio superior al 30% (FAO, 1968, citado por Villota. 2005, p. 43).

Subunidad de montaña en roca volcánico-sedimentaria (RM-rvs): Estas geoformas se ubican al este de la ciudad de Canchaque y conforman relieves que alcanzan elevaciones desde 2480 m s.n.m hasta 3520 m s.n.m desde donde nace la quebrada Pusalca, presentan pendientes fuertes a muy escarpadas en rocas volcánicas conformadas por lavas andesíticas y piroclastos de composición dacítica (figura 09).

Subunidad de montaña en roca intrusiva (RM-ri): Las montañas se encuentran conformadas por granodioritas y tonalitas muy fracturadas, estas geoformas se ubican en gran parte de la quebrada Pusalca con elevaciones que van desde 1760 m s.n.m a 2480 m s.n.m, presentan pendientes moderadas a fuertes (figura 10).

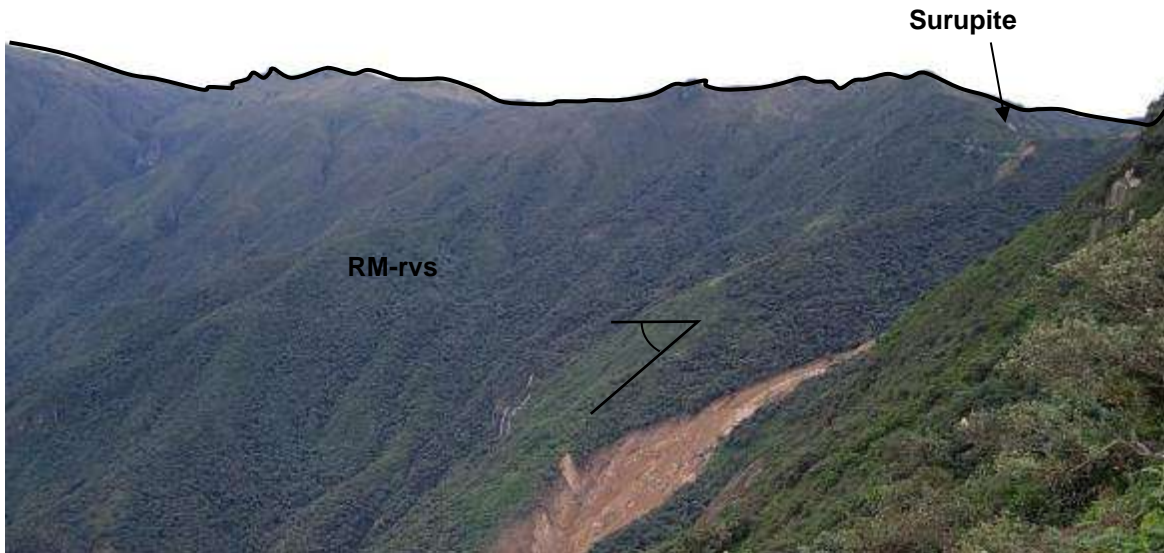


Figura 09. Montaña en roca volcánico-sedimentaria entre los sectores El Tambo, Cruz Blanca y Surupite.



Figura 10. Montaña en roca intrusiva, vista hacia el sector Chonta.

Subunidad de montaña en roca metamórfica (RM-rm): Estas geofomas se ubican entre los sectores Pampas Minas, Chorro Blanco y Potrerros, tienen pendientes moderadas a muy fuertes (5° – 45°) con relieves que alcanzan los 1750 m s.n.m y descienden hasta los 1100 m s.n.m. (figura 11).

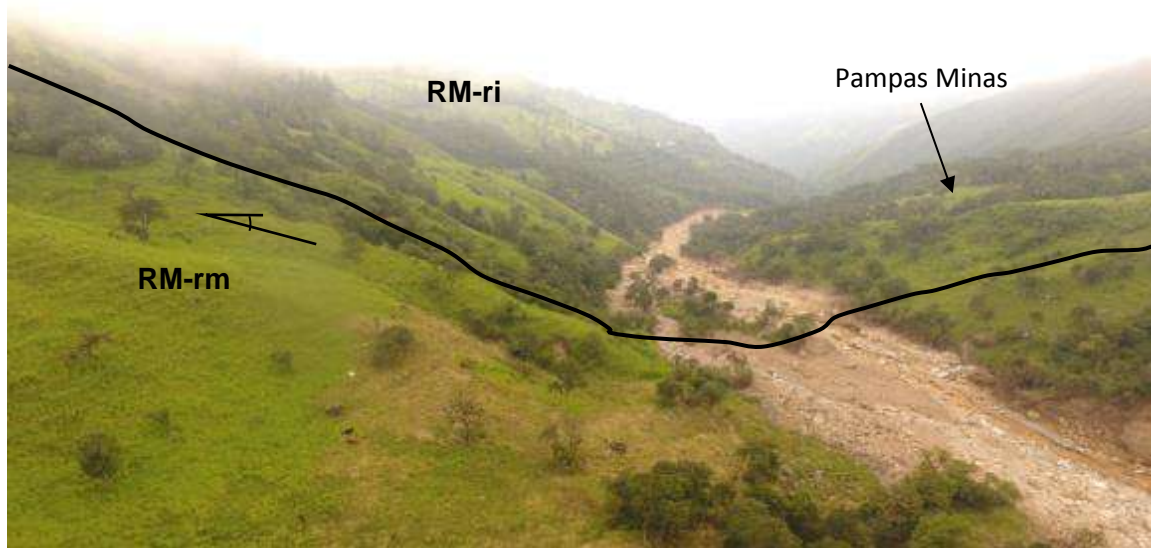


Figura 11. Montaña en roca metamórfica ubicada al noreste del área urbana de Canchaque entre los sectores Pampas Minas y Potreros.

3.3.2. Geofomas de carácter depositacional y agradacional

Las geofomas de carácter depositacional y agradacional son resultado del conjunto de procesos geomorfológicos constructivos, determinados por fuerzas de desplazamiento, como por agentes móviles, tales como el agua de escorrentía, los glaciares, las corrientes marinas, las mareas y los vientos. Estos tienden a nivelar hacia arriba la superficie de la tierra, mediante el depósito de materiales sólidos resultantes de la denudación de terrenos más elevados.

3.3.2.1. Unidad de piedemonte

Superficie inclinada al pie de los sistemas montañosos, formada por caídas de rocas o por el acarreo de material aluvial arrastrado por corrientes de agua estacional y de carácter excepcional.

Subunidad vertiente o piedemonte aluvial (V-al): Es una subunidad ligeramente inclinada y extendida, posicionada al pie de estribaciones andinas o sistemas montañosos. Está conformada por la acumulación de sedimentos acarreados por corrientes de agua estacionales o excepcionales, que pueden formar abanicos (Vílchez et al., 2019). En el área de evaluación, esta subunidad se identifica entre los sectores Surupite y El Tambo donde se origina la quebrada Pusmalca, sobre esta superficie se ubicada el DME-111 (figura 12).

Subunidad de vertiente o piedemonte coluvio deluvial (V-cd): Son unidades conformadas por la acumulación intercalada de materiales de origen coluvial y deluvial. Se encuentran interestratificados y no es posible separarlas como unidades individuales: Esta unidad se encuentra depositada al pie de las laderas de montañas o acantilados

(Vílchez et al., 2019). Se formó por la acción de movimientos en masa antiguos (gravitacionales y fluvio-gravitacionales), presentan pendientes moderadas a fuertes (5°-25°). Geodinámicamente, este tipo de depósitos se pueden asociar a la ocurrencia de movimientos en masa de tipo complejos, deslizamientos y flujo de detritos (figura 13).



Figura 12. Vista del piedemonte aluvial donde se ubicada el DME-111, en los límites se ubican montañas con pendientes muy fuertes.



Figura 13. El centro poblado Agua Blanca se asienta sobre un piedemonte coluvio deluvial.

Subunidad de vertiente o piedemonte aluvio torrencial (P-at): Esta geoforma es el resultado de la acumulación de materiales movilizados a manera de flujos de detritos (huaicos), modifican localmente la dirección de los cursos de ríos y se ubican en las desembocaduras de quebradas hacia los ríos principales. La quebrada Pusmalca, presenta evidencias de antiguos flujos que transportaron materiales debido a huaicos antiguos. El flujo de lodos y rocas ocurrido el 17 de marzo, transportó bloques de roca de origen volcánico, metamórfico e intrusivo, con diámetros que varían de 5 m a 3 m; de formas subangulosas a subredondeadas, siendo transportados 12 km aguas abajo (figura 14).



Figura 14. Quebrada Pusmalca por donde descendió el flujo de detritos, vista del sector Potrerros.

Subunidad de vertiente con depósito de deslizamiento (V-dd): Esta geoforma es el resultado de la acumulación de materiales originados por procesos de movimientos en masa, antiguos y recientes, que pueden ser del tipo deslizamientos, flujos de detritos y/o movimientos complejos. Son de corto a mediano recorrido, relacionados a las laderas superiores adyacentes. Su morfología es usualmente convexa y su disposición semicircular a elongada en relación con la zona de arranque o despegue del movimiento en masa. El deslizamiento del DME-111 originó una vertiente de deslizamiento en donde se acumuló todo el material con un alto grado de saturamiento debido a las constantes lluvias registradas en los días anteriores, al entrar en contacto con otros afluentes los materiales y sedimentos se sobresaturaron y formaron el flujo (figura 15).



Figura 15. Vertiente con depósito del deslizamiento ocurrido el 17 de marzo.

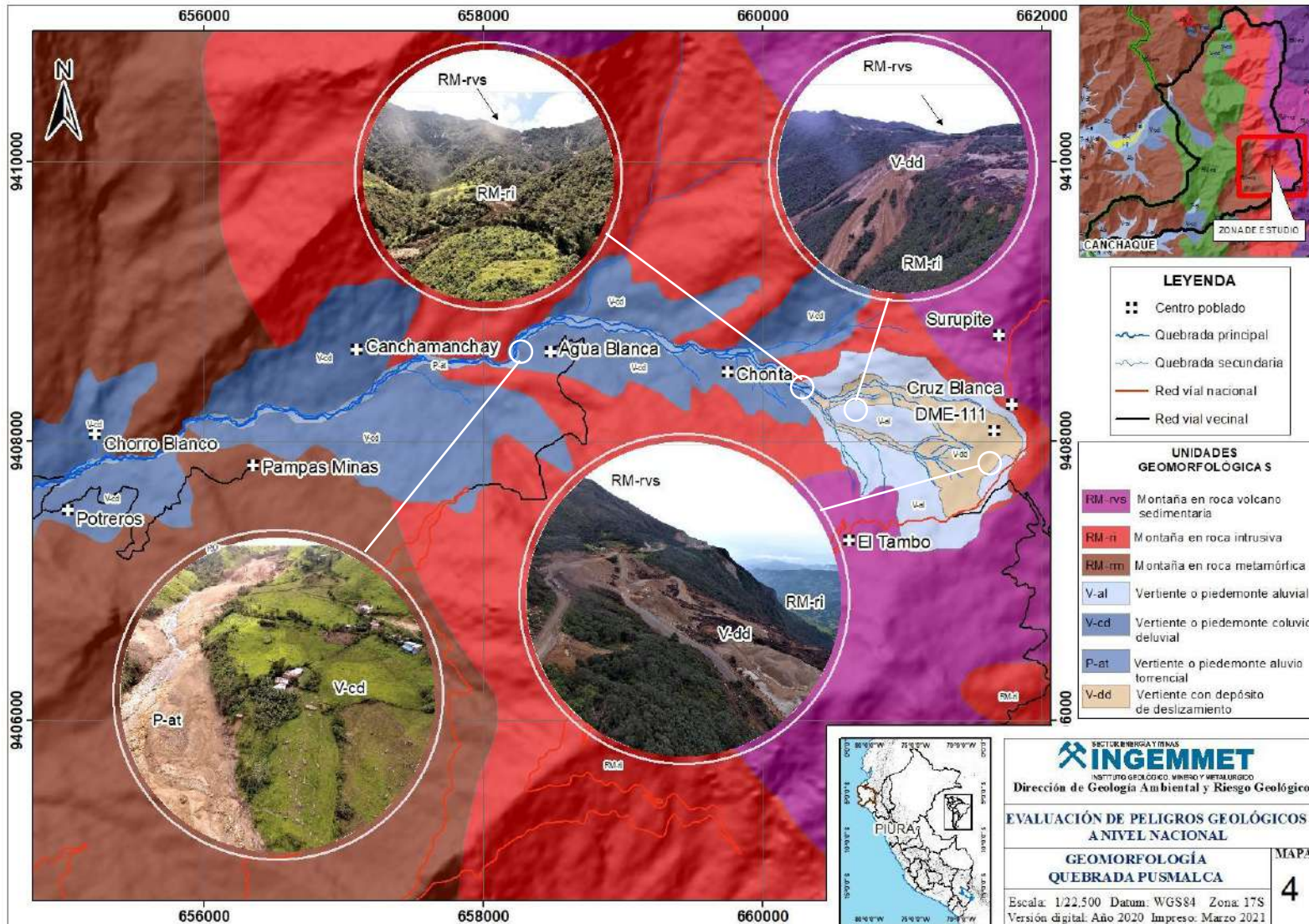


Figura 16. Mapa geomorfológico de la quebrada Pusmalca, caseríos y sectores aledaños (Mejorado de Vilchez et al., 2013).

4. PELIGROS GEOLÓGICOS

Los peligros geológicos evaluados en la cuenca de la quebrada Pusmalca, corresponden a movimientos en masa de tipo movimiento complejo con una fase inicial de deslizamiento y posterior flujo de detritos (PMA: GCA, 2007). Estos procesos son resultado del modelamiento del terreno, así como la incisión sufrida en los cursos de agua provenientes desde la parte alta de la cuenca, que conllevó a la generación de diversos movimientos en masa. Estos modificaron la topografía de los terrenos y movilizaron cantidades variables de materiales desde las laderas hacia el curso de los ríos y quebradas.

Los condicionantes o factores intrínsecos, son la geometría del terreno, la pendiente, el tipo de roca, el tipo de suelos, el drenaje superficial-subterráneo y la cobertura vegetal. Se tiene como “detonantes” de estos eventos las precipitaciones pluviales periódicas y extraordinarias que caen en la zona.

4.1. Peligros geológicos por movimientos en masa

El área de evaluación se dividió en dos zonas:

Zona 1: Zona de arranque o deslizamiento (Z1).

Abarca la cabecera de la quebrada Pusmalca, se ubica en las inmediaciones del sector El Tambo, Cruz Blanca y Surupite. Los condicionantes principales en la Z1, descritos en los ítems anteriores, están conformados por afloramientos de rocas intensamente fracturadas y meteorizadas con coberturas aluviales de gravillas, gravas y clastos angulosos en una matriz areno arcillosa poco compacta y de alta porosidad. El DME-111 ubicado en el kilómetro 111 de la vía Canchaque-Huancabamba se ubicaba sobre este tipo de materiales (figura 26).

Zona 2: Quebrada Pusmalca o canal de transporte (Z2).

Se extiende desde Cruz Blanca, abarcando los sectores Chonta, Agua Blanca, Canchamanchay, Pampas Minas, Chorro Blanco y Potreros. La zona 2, presenta antiguos deslizamientos, flujos de detritos y avalancha de rocas, evidenciada con la presencia de mega bloques dispersos a lo largo de laderas en forma de abanicos o piedemontes coluvio deluviales.

Para la caracterización de los eventos geodinámicos, se realizó la cartografía geológica y geodinámica basada en la observación y descripción morfométrica in situ, la toma de datos GPS, fotografías a nivel del terreno, fotografías aéreas, ortofotos y modelos digitales de terreno.

A continuación, se describen los peligros geológicos identificados y caracterizados en las siguientes zonas:

4.2. Movimiento complejo

Consiste en la combinación de una deformación gravitacional profunda y flujos asociados. Éstos son complementarios, debido a que la estructuración de la masa movilizada por la deformación gravitacional en su zona distal, es aprovechada en las cabeceras o zonas de

arranque de los flujos (Varnes, 1978). En la quebrada Pusmalca ocurrió un movimiento en masa complejo conformado por un deslizamiento (fase 1) y un flujo de detritos (fase 2).

4.1.1. Deslizamiento en el DME-111 (Z1)

En base a la caracterización geodinámica del evento ocurrido el 17 de marzo en el DME-111, se clasificó el proceso de remoción en masa como un **DESLIZAMIENTO DE TIPO ROTACIONAL RETROGRESIVO EN ESTADO ACTIVO** (WP/WLI, 1993).

4.1.1.1. Corona y escarpe

Corona

La corona abarca las zonas adyacentes ubicadas arriba del escarpe, no han sufrido desplazamientos ladera abajo, pero si deformaciones que originan grietas por tracción o tensión que se emplazan de forma paralela o semiparalela al escarpe (figura 17).



Figura 17. Vista de sur a norte de la corona parte superior del escarpe del material deslizado.

Los trabajos de campo fueron complementados mediante la fotogrametría aérea con drones, donde se obtuvo el modelo digital de terreno (MDT) y la ortofoto de alta resolución (GSD 5 cm), de esta manera se delimitó con mayor precisión la geometría de la corona y la extensión de las grietas (figura 18).

Las grietas observadas in situ y las cartografiadas mediante teledetección por medio de la ortofoto, se emplazan de sur a norte con aberturas de hasta 0.50 m, 1.5 m de profundidad y leves desplazamientos este a oeste.

La corona tiene una extensión de 1252 m de largo, en la parte más ancha mide 110 m y presenta evidencias de antiguos escarpes de deslizamientos.

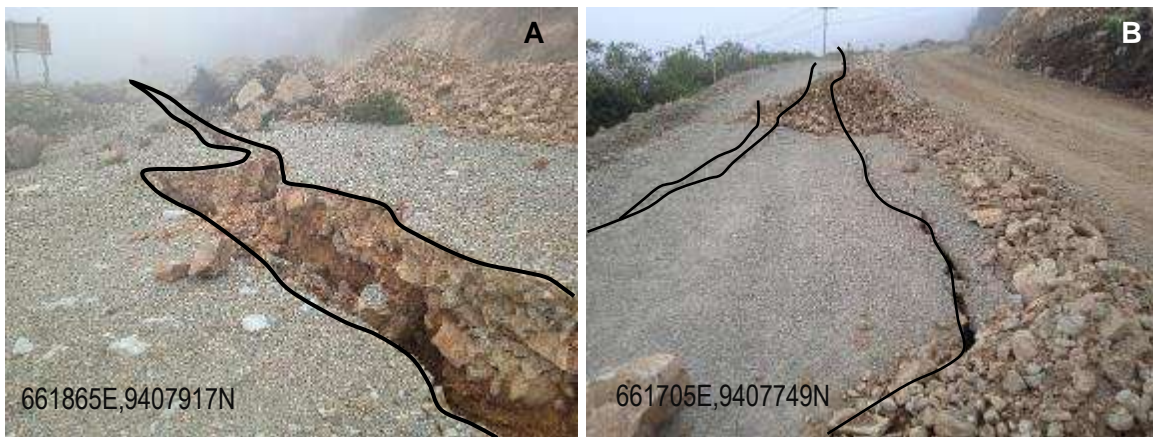


Figura 18. (A) Grieta en la parte superior central de la corona. (B) Grieta en el flanco sur de la corona.

Escarpe

El escarpe principal tiene forma irregular y continua, el nivel de arranque se ubica a 3141 m s.n.m. y se desplaza a 3080 m s.n.m., con un desnivel máximo de 61 m estimado hasta la base del escarpe, alcanza una longitud total de 1141 m y bordea la trocha carrozable Canchaque – Huancabamba (figura 19). Los perfiles construidos en base al MDT con un GSD de 5 cm/pixel, arrojan saltos de falla con desniveles de 35 m (perfil A-A'), 61 (perfil B-B') y 22 m (perfil C-C'), estos datos pueden ser verificados en las figuras 20 y 21.

El área total afectada alcanza las 49.9 ha solo del área del deslizamiento ocurrido el 17 de marzo, mientras que, las zonas y relieves inestables y susceptibles a generar nuevos deslizamientos asciende a 136 ha estimadas en base a los agrietamientos, condiciones geomecánicas de las rocas y tipos de cobertura aluvial muy saturada.

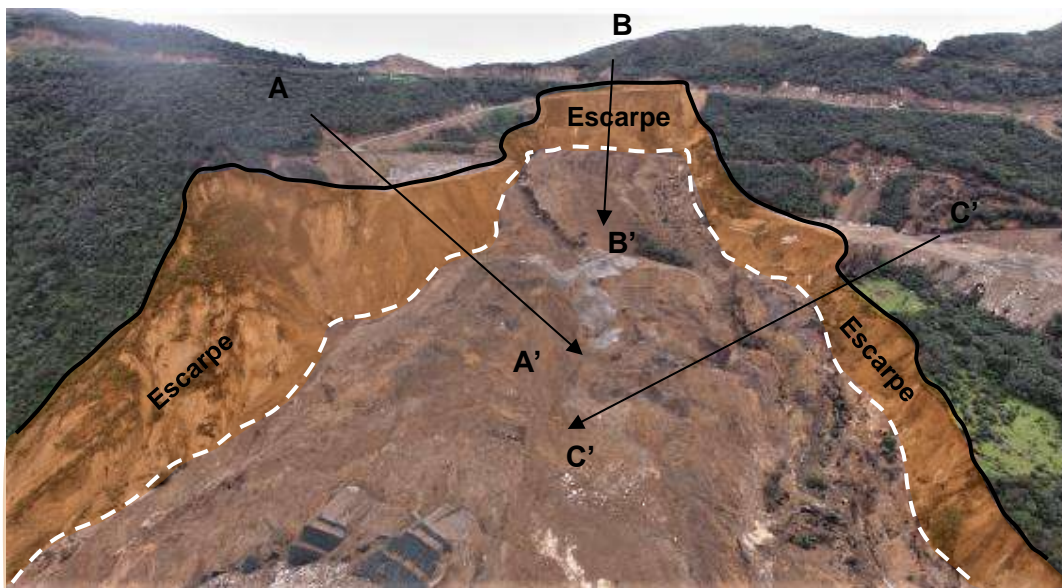


Figura 19. Vista panorámica del escarpe del deslizamiento en el DME-111.

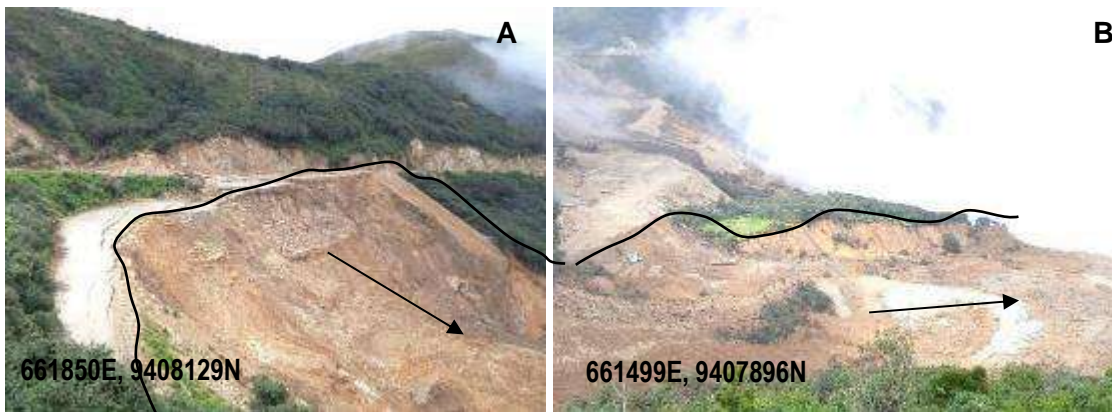


Figura 20. (A) Vista lateral del escarpe principal. (B) Flanco norte del escarpe.

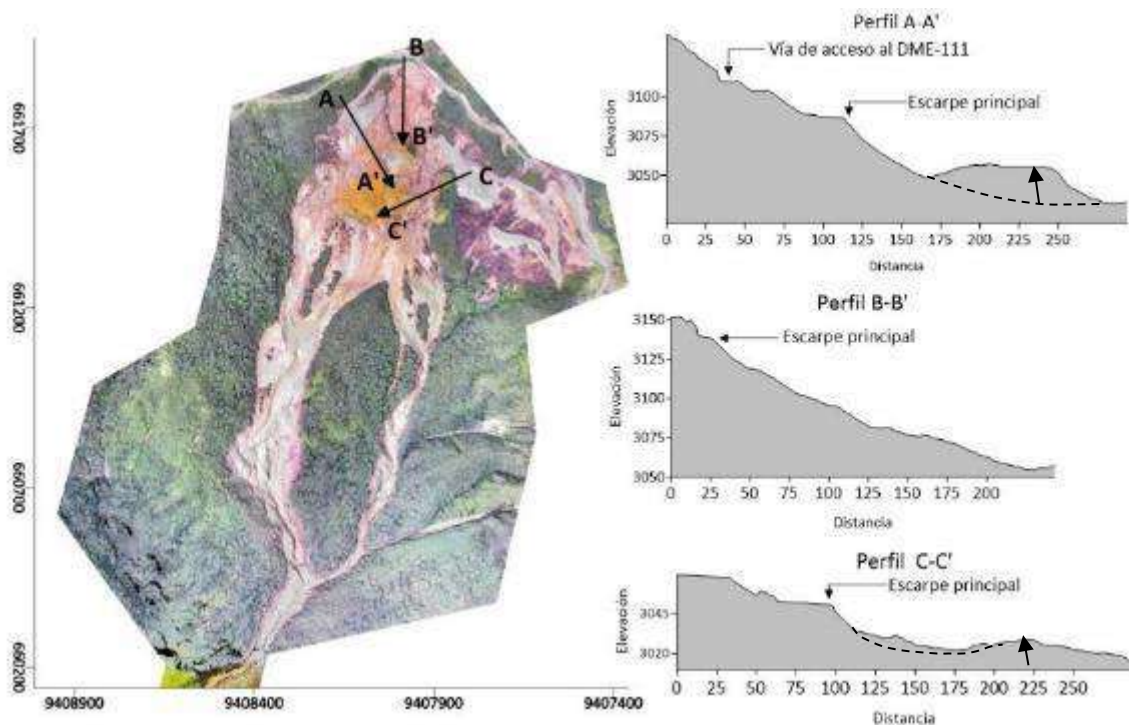


Figura 21. Perfiles del deslizamiento, estimación de desplazamientos calculados en el escarpe principal.

4.1.1.2. Cuerpo del deslizamiento

Está conformado por el material desplazado de su posición original en la ladera y abarca la masa desplazada y la zona de acumulación. La forma del emplazamiento y transporte está controlada por la geomorfología original de la cuenca de aporte y la de recepción (figura 22).

Masa desplazada

Se calculó un desplazamiento de 320 m con dirección este a oeste con una ligera orientación hacia el noroeste, el largo total de la masa alcanza 455 m y el ancho máximo y mínimo es de 383 m y 142 m respectivamente. Basados en los desplazamientos observados en los escarpes y los cortes generados por el movimiento del material se estima que la profundidad de la masa desplazada alcanza entre 15 m a 25 m. En la mayoría de los casos, sobre la zona desplazada se observan procesos de basculamiento y levantamiento de la superficie u objetos que se encuentra sobre ella, en los perfiles se logró identificar estos procesos (figura 23).

Zona de acumulación

Los materiales deslizados se acumulan sobre la superficie, la energía de transporte es definida por la pendiente, los materiales y la cantidad de agua que contienen la masa. En el área de evaluación la zona de acumulación tiene una pendiente muy fuerte, lo que influyó en la alta energía del flujo erosionado la ladera a través del recorrido.

La zona de acumulación o también llamada zona distal del deslizamiento tiene una longitud de 970 m y un ancho promedio de 155 m a 187 m, esta zona se sobresaturó rápidamente debido a las lluvias y al drenaje natural de la cuenca de la quebrada Pusalca y el aporte de la quebrada Agua Blanca.



Figura 22. Vista en planta y perspectiva del deslizamiento y las zonas de desprendimiento y acumulación.



Figura 23. Vista frontal desde la calle La Unión donde 5 viviendas fueron afectadas por el deslizamiento.

4.1.1.3. Zona de transición

En planta, el flujo muestra una zona de iniciación que forma un embudo (la cual para movimientos en masa complejos sería la transición entre la zona de acumulación del deslizamiento y la fase de flujo), también tienen una zona de transición o zona de tránsito de flujo y una zona de depositación que generalmente tiene forma de abanico (Bateman. A, et al 2006). En la mayoría de este tipo de movimientos en masa también llamados mixtos, complejos o combinados, la zona de transición es un canal estrecho o alargado en donde los materiales y sedimentos terminan de sobresaturarse hasta formar el flujo (figuras 24 y 25).



Figura 24. Vista aguas arriba de la zona de transición próxima al sector Chonta.

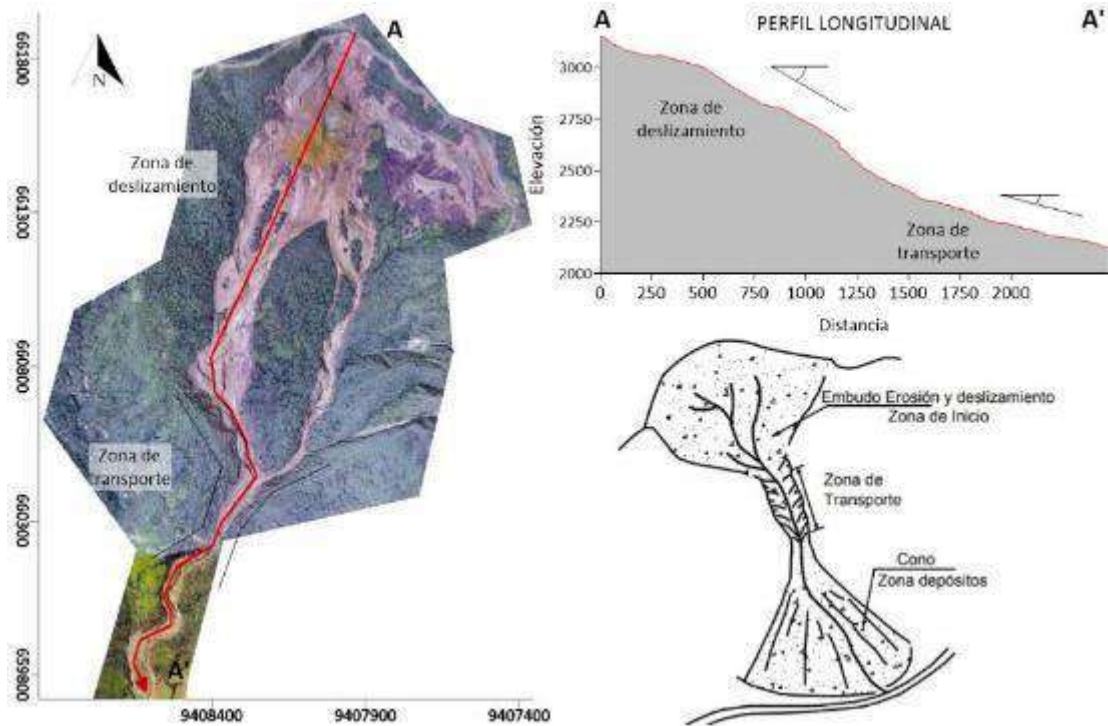


Figura 25. Esquema de zona de transición propuesto por Bateman (2006), adaptado para el aluvión ocurrido en la quebrada Pusalca.

Una característica común entre la zona de deslizamiento y transporte o transición es el cambio de pendiente de muy fuerte a moderada, en este punto confluyen la quebrada Pusalca y Agua Blanca.

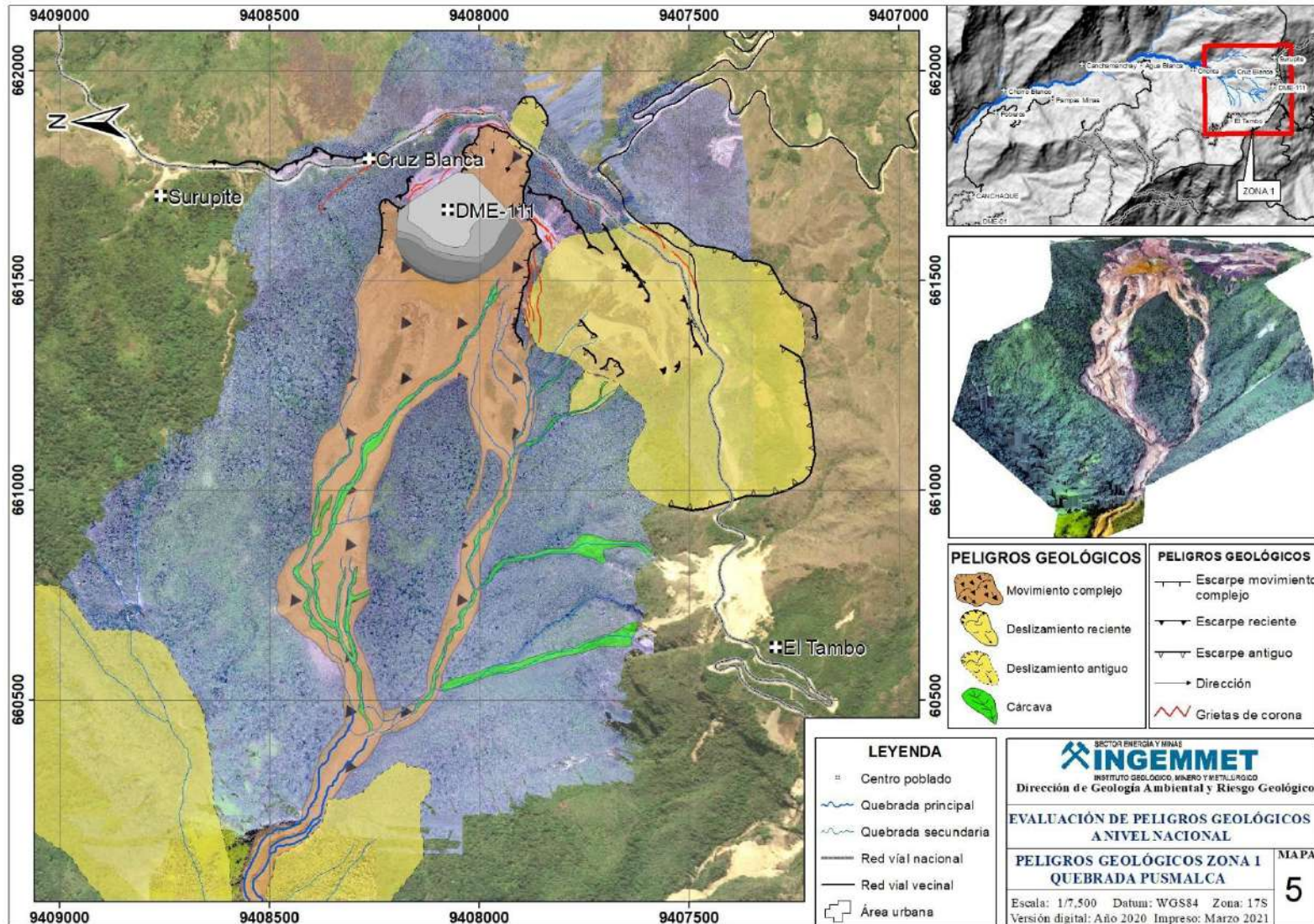


Figura 26. Mapa de peligros geológicos de la zona 1, fase o zona de deslizamiento.

4.1.2. Flujo de detritos (Z2)

Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (índice de plasticidad menor al 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes. Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender en el canal y finalmente los depositan en abanicos de detritos.

El flujo de detritos ocurrido en la quebrada Pusmalca, se generó debido al deslizamiento del DME-111, ubicado sobre una vertiente o piedemonte aluvial. El flujo se canalizó a través de la quebrada Pusmalca formando una vertiente aluvio torrencial desde el sector Chonta hasta el caserío Piedra Azul recorriendo un total de 24.2 km, pudiendo proyectarse varios kilómetros aguas abajo.

4.1.2.1. Ancho de flujo

El flujo lodo y rocas alcanzó un ancho de 70 m a 110 m, modificando el cauce de la quebrada Pusmalca que antes del evento solo tenía 10 m a 15 m de ancho. La masa desplazada se movilizó con tal energía que modificó la geoforma del canal de la quebrada (figuras 27 y 28).

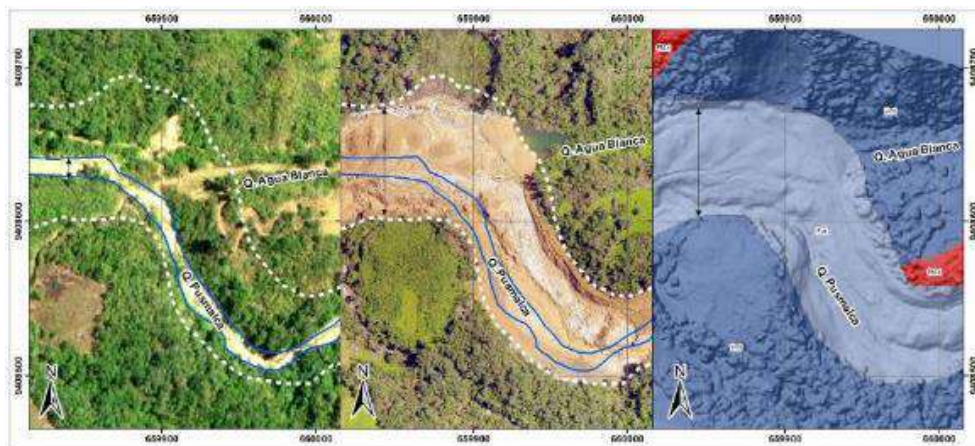


Figura 27. Imágenes satelitales antes y después del evento del 17 de marzo.



Figura 28. Vista del cauce de la quebrada Pusmalca y el ancho del flujo.

4.1.2.2. Altura de flujo

El frente de un flujo está conformado por bloques de rocas y palizada, este frente en muchos casos presenta mayor amplitud, los flujos producen saltos o salpicaduras que lanzan sedimentos hacia arriba, los saltos se producen debido a obstáculos como rocas o desniveles positivos en el canal que impulsan la masa varios metros sobre la altura promedio del flujo. Los flujos viscosos presentan una gran altura sobre todo en las curvas del cauce o canal debido principalmente a la velocidad que a su vez es influenciada por la energía y la pendiente de la superficie por donde se traslada.

El flujo de detritos de la quebrada Pusmalca alcanzó en algunos sectores del canal con presencia de curvas de hasta 21 m de alto y produjo saltos o salpicaduras de 3 m a 5 m (figuras 29 y 30).

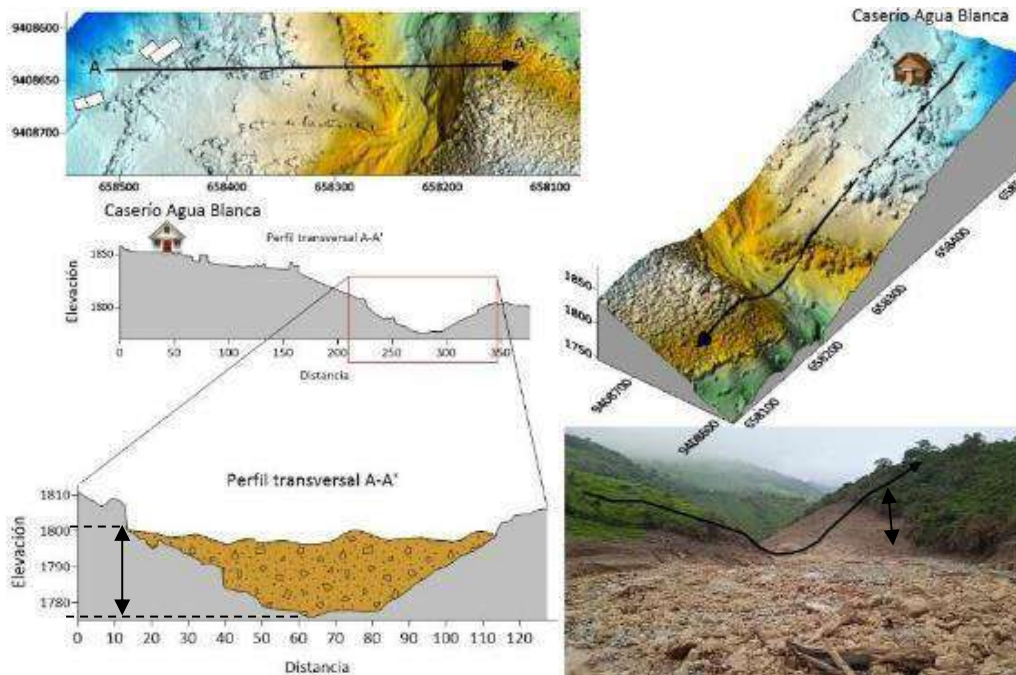


Figura 29. Vista del cauce de la quebrada Pusmalca y el ancho del flujo.



Figura 30. Vista del cauce de la quebrada Pusmalca y el ancho del flujo.

El movimiento de un flujo genera un ruido muy intenso que, junto con los materiales transportados inducen a la superficie vibraciones que pueden percibirse como un sismo. Los pobladores del centro poblado Pampas Minas y alrededores manifestaron que, al paso del flujo percibieron un sacudimiento muy similar a un temblor de leve a moderada intensidad, esta vibración estuvo acompañada por el ruido muy intenso.

4.1.2.3. Cálculo de la velocidad del flujo

Para determinar indirectamente la velocidad de un flujo de detritos se utilizó la fórmula propuesta por Chow (1959), utilizando esquemas de planta y perfil en un recodo del cauce con evidencias de campo de las huellas del lodo dejadas en las márgenes (figuras 31, 32 y 33):

$$V = (g \times r_c \times \cos\theta \times \tan\alpha)^{0,5}$$

Donde:

V= velocidad (m/s)

g= gravedad (9,81 m/s)

r_c = radio de curvatura de la línea central del canal o quebrada (m)

$\cos \theta$ = Coseno del ángulo longitudinal del valle

$\tan\alpha = \Delta h/B$

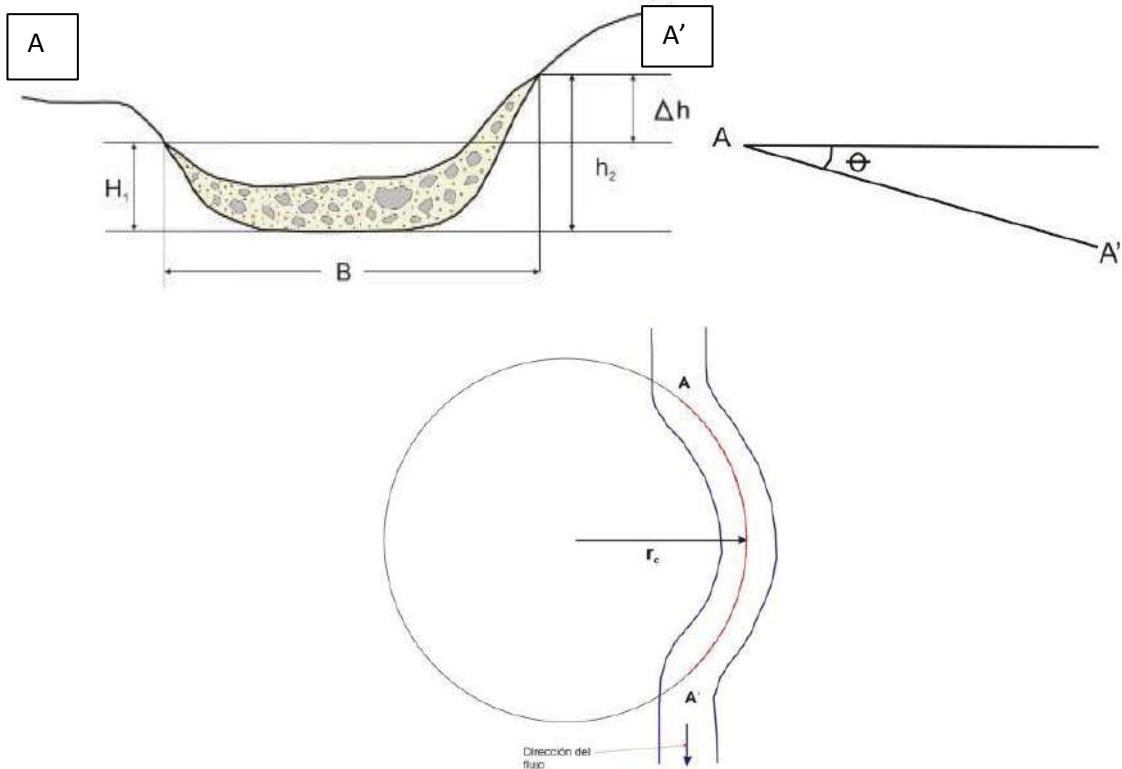


Figura 31. Esquemas de planta y perfil utilizados en el cálculo de la velocidad del flujo de detritos.

Entonces, con las mediciones obtenidas en el terreno, los valores estándar conocidos y valiéndonos de la ortofoto obtenida de la fotogrametría, tenemos:

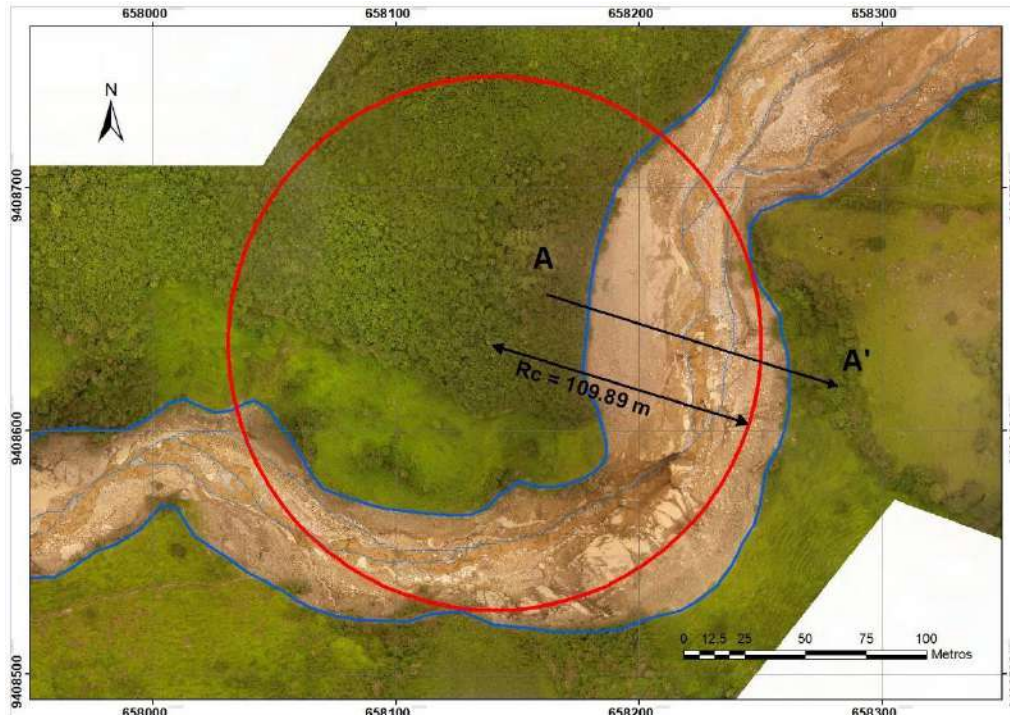


Figura 32. Ortofoto utilizada para el cálculo de los parámetros requeridos en la fórmula de Chow, a partir de datos de campo.

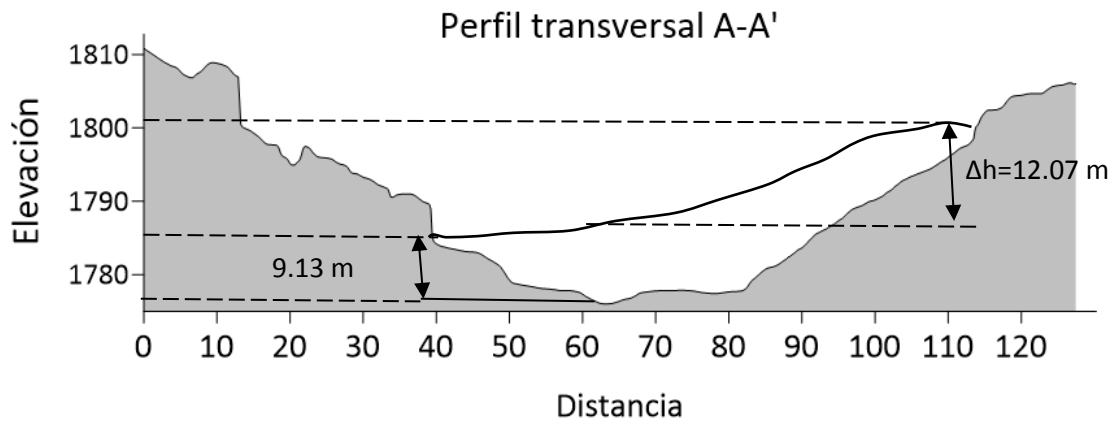


Figura 33. Sección de la quebrada ubicada en el caserío Agua Blanca, realizada para el análisis de la velocidad del flujo.

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$r_c = 109.89 \text{ m}$$

$$\theta = 13^\circ$$

$$\cos \theta = 0,907446$$

$$\tan \alpha = \Delta h/B = 12,07 \text{ m} / 72.13 \text{ m} = 0,1673$$

Aplicando la formula (1) se tiene:

$$V \text{ (m/s)} = (9,81 \text{ m/s}^2 \times 109.89 \text{ m} \times 0,907446 \times 0,1673)^{0.5}$$

$$V = 12,79 \text{ m/s (Equivalente a 46,04 Km/hora)}$$

Este cálculo se realizó en el tramo correspondiente al caserío Agua Blanca, la velocidad observada varía en función del material, forma y ancho del canal, cantidad de agua y carga volumétrica.

4.1.2.4. Cálculo de velocidad basado en registro de vídeo del flujo

El flujo de detritos fue captado mediante cámaras de celulares por los pobladores y personal de Defensa Civil de la Municipalidad Distrital de Canchaque. Estos registros se utilizaron para estimarla velocidad del flujo, se procedió a dividir el video en fotogramas para calcular la distancia recorrida dentro de un espacio de tiempo determinado, se obtuvieron 210 fotogramas en un video de 6.970 segundos (figuras 34, 35 y 36):

Fotograma 000000



Figura 34. Tránsito del flujo en el tiempo 0, fotograma 0 y la ubicación en la vista aérea.

Fotograma 000100



Figura 35. Ubicación del flujo en el tiempo 3.319 y la ubicación en la vista aérea.

Fotograma 000186



Figura 36. Ubicación del flujo en el tiempo 6.173 y la proyección de la ubicación en la vista aérea.

En el video, el flujo recorre 101.07 m en 6.173 segundo, para calcular la ubicación del flujo con respecto a cada fotograma se utilizó las fotos de campo y la ortofoto de alta resolución, identificando como referencia bloques de rocas, árboles, tanque de distribución de agua y la geoforma del cauce. La velocidad estimada del flujo es de **16.37 m/s** o 58.93 km/h.

Cruden y Varnes (1996) establecen una escala de velocidades para movimientos en masa en 7 categorías, desde extremadamente lenta (5×10 mm/s) a extremadamente rápida (mayor a 5 m/s). Sin embargo, algunos movimientos en masa importantes por su potencial destructivo, como son los flujos de detritos, se encuentran todos por encima de la categoría “extremadamente rápido”.

Este cálculo debe tomarse como referencia, ya que fue realizado en el sector Los Potreros a 7.7 km de la zona de arranque, el flujo se desplaza sobre una geoforma denominada como vertiente aluvio torrencial con un pendiente mayor a 11° .

La velocidad calculada mediante este método y la velocidad obtenida por el método de Chow (12.79 m/s y 16.37 m/s) solo difieren en 3.58 m/s, ambos cálculos se encuentran dentro del umbral esperado para este tipo de evento geodinámico. Estos datos se utilizaron para calibrar el modelamiento numérico de flujos.

4.1.2.5. Depositación

La depositación de los materiales es controlada por las geoformas de emplazamiento, en algunos sectores pueden formar depósitos laterales en forma de barreras alargadas, laterales en forma de lengua más anchos que alargados y frentes sobre elevados en curvas.

Estos depósitos, según la energía, velocidad y carga de sedimentos, pueden estar formados por mayor porcentaje de bloques, clastos y gravas en comparación con el porcentaje de sedimento fino o lodo, en otros casos en las formas laterales tienen más contenido de sedimentos fino, acompañado de detritos y clastos (figuras 37, 38 y 39).



Figura 37. Vista del emplazamiento de un flujo con frente en forma de lengua.

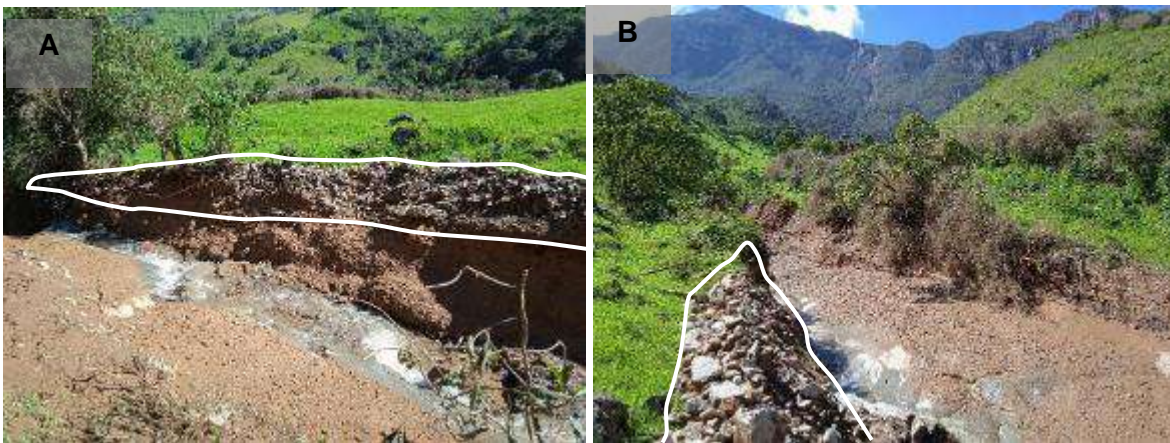


Figura 38. Vista aguas abajo (A) y aguas arriba (B) dique o albardón que se formó por el emplazamiento del flujo en los márgenes del canal.

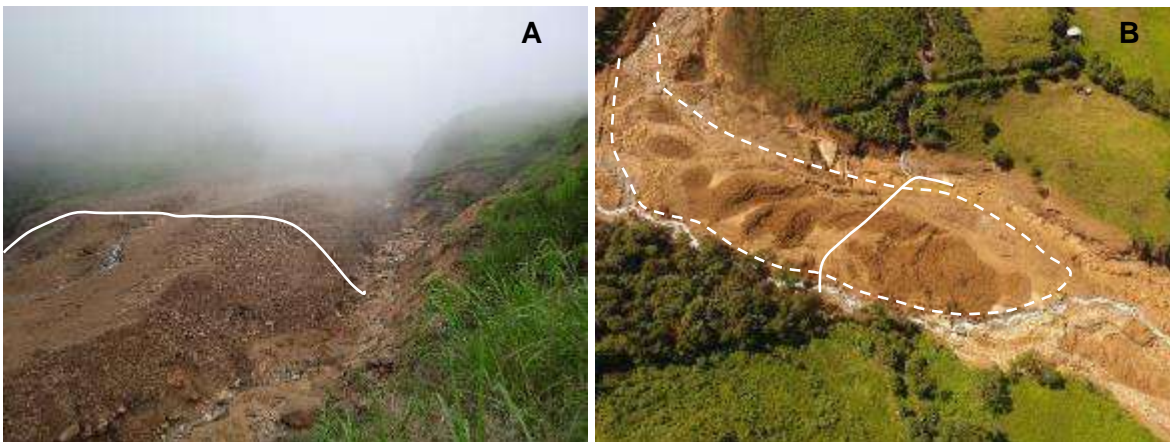


Figura 39. (A) Flujo acumulado en el centro del canal. (B) Vista aérea de los materiales distribuidos en el centro del cauce.

4.1.2.6. Depósito de bloques

Los bloques mapeados corresponden a rocas granodioritas y tonalitas de 5 m de largo y 2.5 m de alto y 3 m de ancho, estos bloques provienen de la naciente de la quebrada Pusmalca por debajo del piedemonte aluvial donde ocurrió el deslizamiento. Los depósitos mapeados como deslizamiento y avalanchas de rocas antiguas, se ubican en ambas márgenes de la quebrada, alimentando al flujo a medida que avanzaba y transportaba estos mega bloques de hasta 12 km aguas abajo (figura 40).



Figura 40. Bloques depositados en el sector Potrerros.

4.3. Deslizamientos antiguos

En la parte alta del sector Cruz Blanca, se han identificado varios deslizamientos ocurridos desde agosto del 2010 hasta marzo del 2021 (figura 38). Los deslizamientos se expresan en deformaciones, grietas y leves basculamientos en el terreno, estos procesos son precursores y advierten de la ocurrencia de eventos geodinámicos de mayor magnitud. Las grietas suelen alinearse de forma cóncava o rectilínea en función de la dirección del escarpe donde ocurren la principal deformación y donde es altamente probable que se desencadene el deslizamiento o los deslizamientos (figura 41).

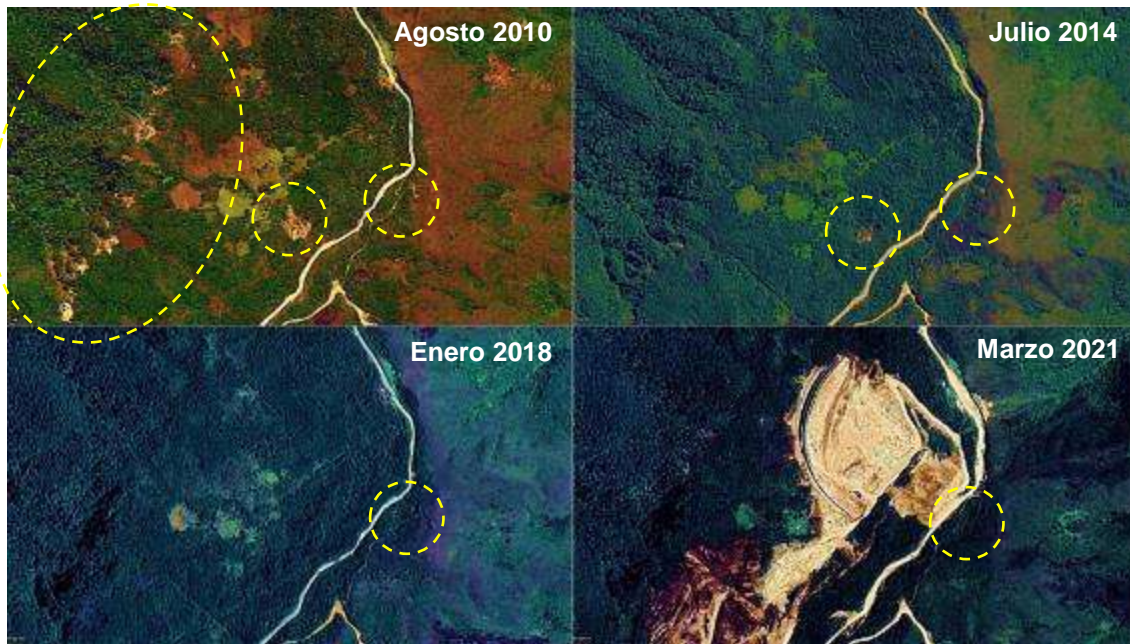


Figura 41. Imágenes multitemporales con los eventos registrados desde el año 2010 hasta la actualidad.

En el año 2010, se observan deslizamientos en el pie del talud donde se ubica el DME-111, sobre este sector se observa un cambio de pendiente de moderada a muy escarpada lo que condiciona la ocurrencia de deslizamientos (figura 42).



Figura 42. Formación de escarpe de forma cóncava en el talud superior de la vía Canchaque - Huancabamba.

4.4. Avalancha de rocas antiguas

En los trabajos de campo se identificaron depósitos de avalancha conformadas por bloques de similar dimensión que los observados en el flujo de detritos de la quebrada Pusmalca. Las zonas identificadas se ubican a ambos márgenes de la quebrada y están conformadas por bloques de andesitas, granodioritas y tonalitas de más de 3 m de diámetro (figuras 43 y 44).



Figura 43. Campo de mega bloques de andesitas en la parte alta del sector Agua Blanca.



Figura 44. Campo de mega bloques en el área urbana del caserío Agua Blanca.

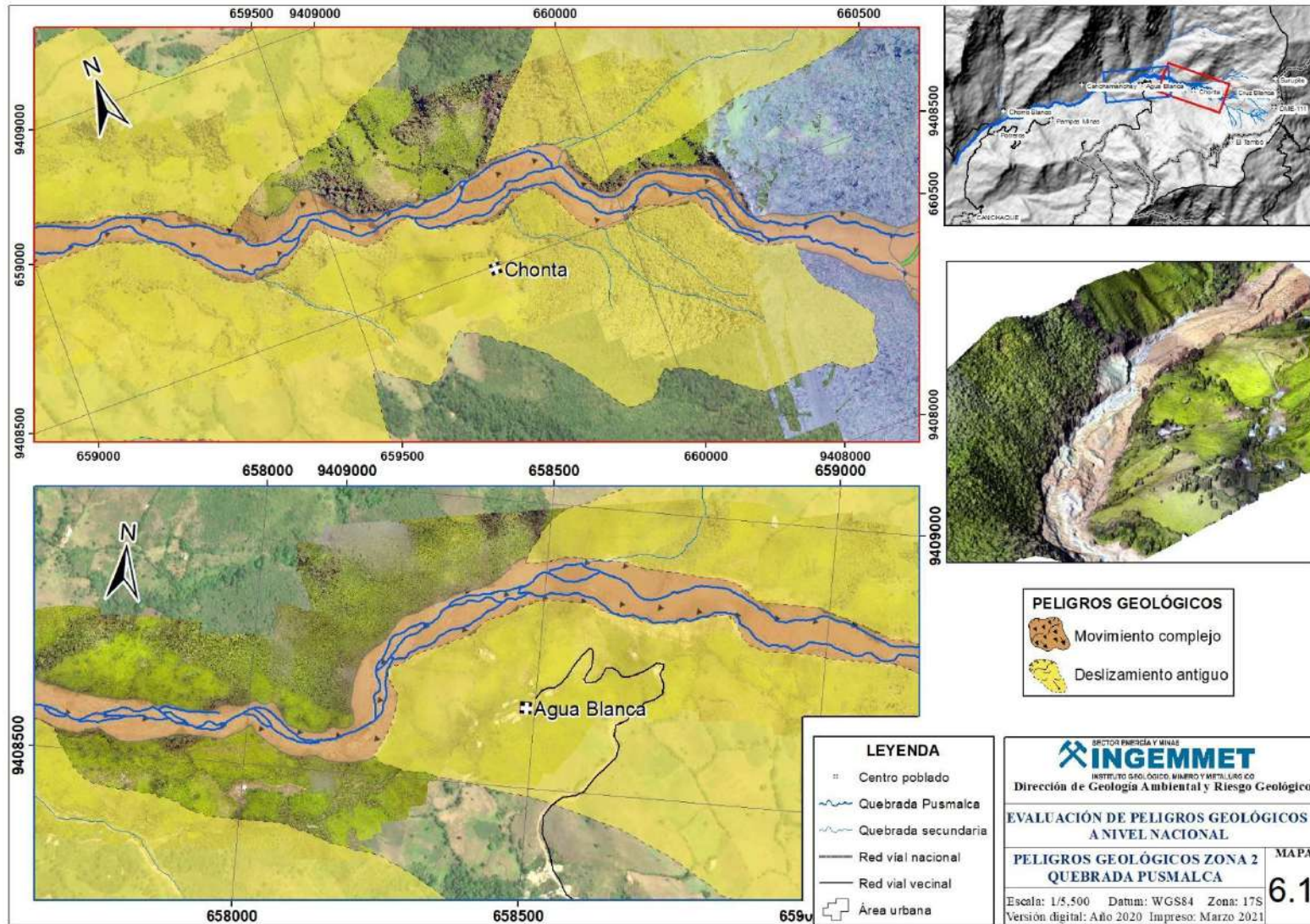


Figura 45. Mapa de peligros geológicos de la zona 2. Fase de flujo de detritos.

4.5. Factores condicionantes

4.5.1. Pendiente

El DME-111 se ubica sobre un relieve con pendientes moderadas ($5^\circ - 15^\circ$), mientras que, los relieves adyacentes por donde descendió la masa deslizada presentan pendientes muy fuertes (30° a 45°). El flujo de detritos descendió a través de un canal con pendientes moderadas a muy fuertes, los relieves adyacentes a ambos márgenes de la quebrada presentan pendientes fuertes donde se ubican los sectores y caseríos afectados por el evento ocurrido el 17 de marzo (figura 46).



Figura 46. Vista del piedemonte aluvial donde se ubica el DME-111 y el cambio de pendiente.

4.5.2. Litología

Los afloramientos cartografiados en la cabecera de la quebrada Pusmalca, correspondientes a cada unidad litológica se encuentran intensamente fracturados. Entre los sectores Surupite y El Tambo existe un contacto litológico entre los miembros inferior y superior del Centro Volcánico Sondorillo, este tipo de zonas origina áreas de fuerte debilidad donde se emplazan cuerpos litológicos muy meteorizados (figura 47).



Figura 47. Afloramiento de andesitas y piroclastos muy fracturados.

Bajo estas condiciones, las características geológicas observadas tienen un comportamiento geodinámico muy desfavorable, las rocas se fragmentan y diaclasan con pocos golpes de martillo.

Al norte del área urbana en el sector Villa deportiva se han identificado afloramientos de roca muy fracturadas, sobre la vía se observan bloques, clastos y detritos provenientes de la parte alta de la ladera.

4.6. Factores desencadenantes

El principal factor desencadenante de los movimientos en masa como los deslizamientos son las precipitaciones pluviales, para analizar la influencia que pudo tener las lluvias días previos al evento, se recopiló la información de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio. Se accedió al servidor del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Las estaciones de tipo convencional – meteorológica registran datos de precipitación diaria, medida a las 7:00 y 19:00 horas. La administración de las estaciones pluviométricas está a cargo del SENAMHI, la cual se desarrolla en direcciones regionales, cada una posee un conjunto de estaciones pluviométricas pertenecientes a zonas de similares condiciones climáticas y geográficas. De esta forma, se toma a la zonificación propuesta por SENAMHI en la cual divide al Perú en nueve (9) regiones climáticas de acuerdo con la topografía, clima, condiciones atmosféricas y geografía. Por ello, se escogió estaciones ubicadas en zonas con altitudes similares al área de evaluación, la ciudad de Canchaque se ubica a 1210 m s.n.m. mientras que, el deslizamiento ocurrió en relieves con elevaciones entre 2800 y 3000 m s.n.m.

Se eligieron las estaciones meteorológicas de Huarmaca y Sondorillo ubicadas a 23.4 y 12.1 km al sureste y este del deslizamiento del DME-111 (cuadro 03 y figura 48).

Cuadro 03. Ubicación de las estaciones meteorológicas próximas al área de estudio.

Estación: HUARMACA					
Departamento:	PIURA	Provincia:	HUANCABAMB A	Distrito:	HUARMACA
Latitud:	5°33'53.24" S	Longitud:	79°31'11.11" W	Altitud:	2232 m s.n.m.
Tipo:	Convencional - Meteorológica				
Estación: SONDORILLO					
Departamento:	PIURA	Provincia:	HUANCABAMB A	Distrito:	SONDORILLO
Latitud:	5°20'23.26" S	Longitud:	79°25'52.93" W	Altitud:	1917 m s.n.m.
Tipo:	Convencional - Meteorológica				

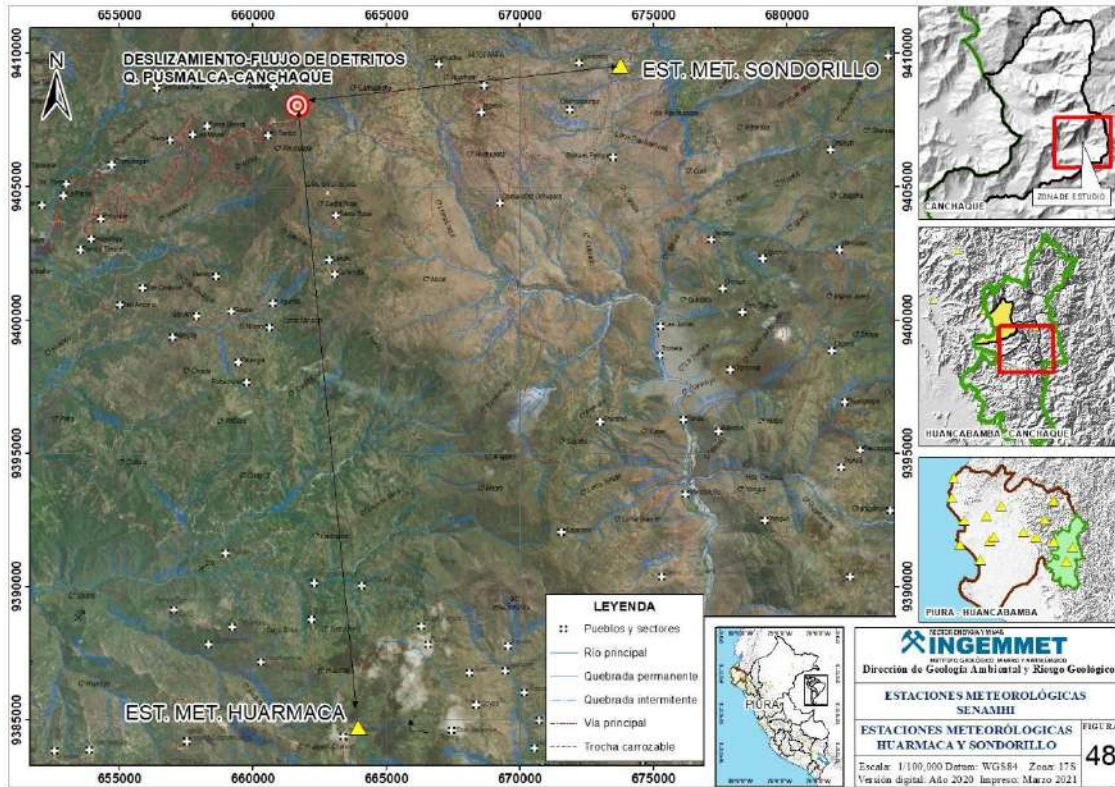


Figura 48. Ubicación de las estaciones meteorológicas de Huarmaca y Sondorillo.

En el mes de marzo, se registraron lluvias intensas que superaron los 411 mm y 115 mm mensuales en la estación Huarmaca y Sondorillo respectivamente. El deslizamiento y posterior fase de flujo de detritos, ocurrió el 17 de marzo entre las 10.30 y 10.36 de la mañana aproximadamente, según el registro de ambas estaciones el día 16 de marzo se alcanzó un pico máximo diario dentro de la serie de 16 días con precipitaciones que llegaron a 75.4 mm (Huarmaca) y 43.3 mm (Sondorillo) y acumulados hasta ese punto de 350 mm y 115 mm (serie de 16 días) (gráfico 01).

Los picos máximos observados el día 16 de marzo en ambas estaciones, probablemente sobresaturaron los depósitos y materiales ubicados en el DME-111, así como los materiales ubicados en las inmediaciones. Considerando las características geológicas descritas, las rocas altamente fracturadas que permiten la infiltración del agua al subsuelo, los materiales arcillosos pueden ingresar a estar fisuras y crear presiones internas que debieron incrementar el nivel del agua en los materiales, esto crea pérdida de fricción y aumento de carga.

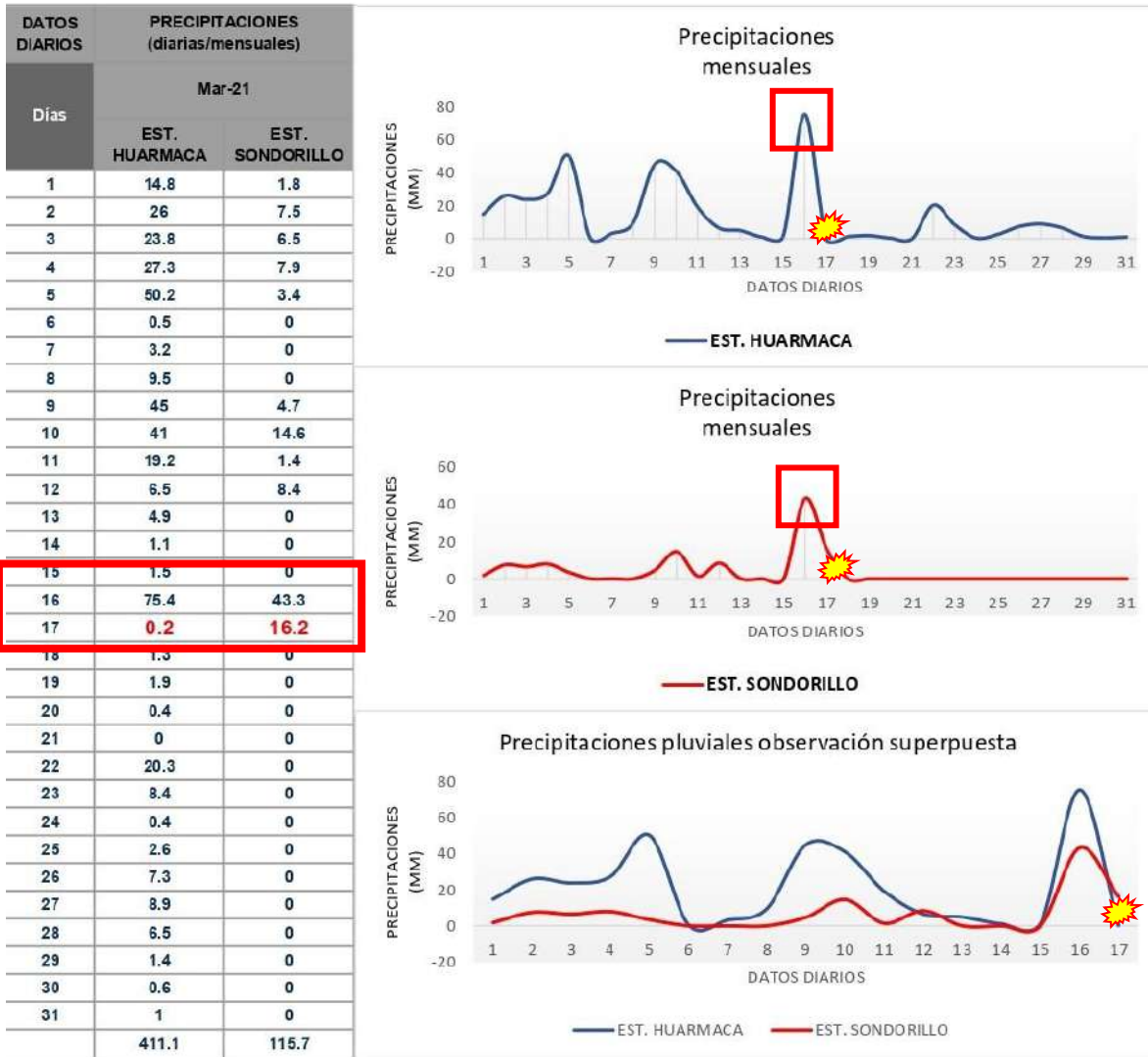


Gráfico 01. Ubicación de las estaciones meteorológicas próximas al área de estudio.

4.7. Daños por el movimiento complejo

El deslizamiento y posterior flujo de detritos dejó daños de regular magnitud a infraestructura importante de abastecimiento de agua, accesos como puentes, caminos entre otros. A continuación, se describen los daños reportados por la Municipalidad Distrital de Canchaque y la oficina de INDECI.

4.7.1. Viviendas

Según los reportes, el flujo de detritos dejó 15 vivienda desaparecidas y 60 viviendas afectadas, en la quebrada Pusalca se ubicaban viviendas próximas al cauce como es el caso del sector Potreros, los bloques de rocas de más de 3 m de diámetro destruyeron por completo dichas viviendas dejándolas inhabitables (figura 49).



Figura 49. Vivienda totalmente destruida ubicada en el sector Potreritos.

4.7.2. Puentes

Se inventariaron 08 puentes peatonales y carrozables ubicados en el antiguo cauce de la quebrada Pusmalca, el flujo modificó el ancho del cauce de 10 m a 70 m, la masa desplazada destruyó por completo dichas estructuras (figura 50).



Figura 50. Puente peatonal en el sector Santa Rosa, ubicado a 2.7 km de Canchaque.

4.7.3. Canales, drenes, bocatomas para abastecimiento de agua

Debido a la ubicación de las estructuras hidráulicas tales como bocatomas y canales de conducción de agua para riego y agua potable, todas estas fueron totalmente destruidas, varias hectáreas de cultivo se quedaron sin abastecimiento y parte de la ciudad de Canchaque se vio interrumpido en el servicio. Según el inventario se han identificado los siguientes daños: 40 bocatomas de canales de riego, 40 bocatomas de canales y 08 sistemas de agua potable y línea de conducción (figura 51).



Figura 51. Caseta de distribución de agua potable ubicada en la margen derecha de la quebrada Pusmalca.

4.7.4. Vía vecinal Canchaque – Maraypampa

El centro poblado Maraypampa se ubica a 4.7 km al noroeste de Canchaque, la principal vía desde la capital del distrito es la carretera que cruza el sector Potrerros y luego la quebrada Pusmalca, esta vía fue totalmente destruida (figura 52).



Figura 52. Tramo de la carretera Canchaque – Pusmalca – Maraypampa (km 0.23) destruida por el paso del flujo.

4.8. Depósitos de materiales excedentes en estado crítico

En la vía Canchaque – Huancabamba existen más de 10 depósitos de materiales excedentes (DME), en 03 de ellos, se identificaron evidencias de activación de deslizamientos, estos procesos pueden afectar trochas carrozables, áreas urbanas y servicios de abastecimiento básico debido al gran volumen que podrían transportar. A continuación, se describen los aspectos más resaltantes de los DME identificados:

4.8.1. DME-01

Este depósito de material excedente 01, se ubica en el sector La Pacha a 4.1 km de Canchaque, se cartografiaron grietas paralelas de forma semicircular con desplazamientos noreste a suroeste además de, cárcavas de 1.5 m de profundidad y 2.5 m de ancho (figuras 53 y 54).

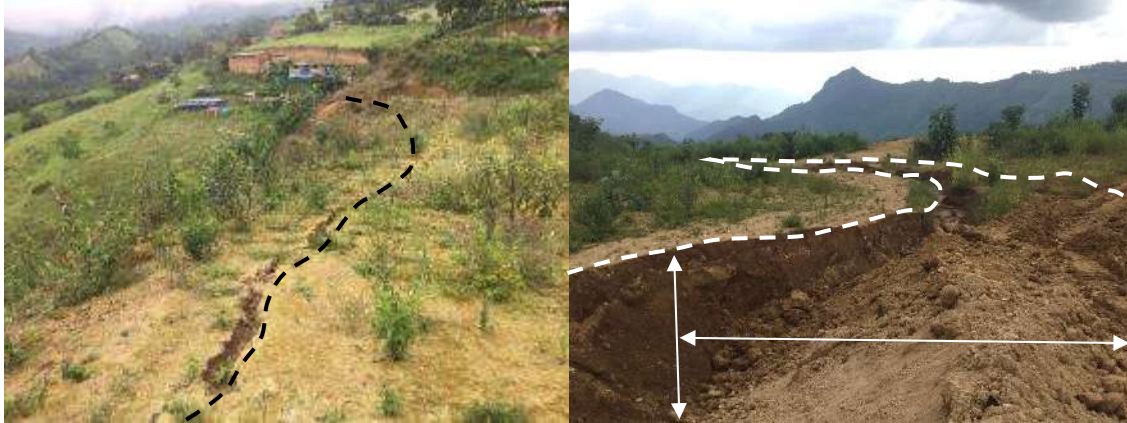


Figura 53. A. Grieta semicircular al borde del DM. B. Cárcava en la parte lateral y borde exterior del DME.



Figura 54. Mapa de peligros geológicos en el DME- 01.

4.8.2. DME-04

Se ubica en el sector Palambla, existe un escarpe de forma cóncava y continua con saltos de falla con desniveles menores a 1 m, además de grietas de 1 m de profundidad y 30 cm de ancho, se emplazan de forma paralela semicircular con desplazamientos de este a oeste (figuras 55 y 56).



Figura 55. Vista del escarpe principal del deslizamiento en el DME-04.



Figura 56. Mapa de peligros geológicos en el DME-04.

4.8.3. DME-07

Se ubica en el sector Palambá, existe un escarpe de forma cóncava y continua con saltos de falla con desniveles menores a 1 m, además de grietas de 1 m de profundidad y 5 cm m de ancho, se emplazan de forma paralela semicircular con desplazamientos de este a oeste (figuras 57 y 58).



Figura 57. Vista de los agrietamientos observados en el DME-07.



Figura 58. Mapa de peligros geológicos en el DME-07.

5. MODELAMIENTO NUMÉRICO DE FLUJO DE DETRITOS

Los modelos numéricos computacionales, se usan para predecir en caso de zonas con potencial a generar flujos o avalanchas y estimar en zonas ya deslizadas las velocidades, alturas y la energía con la cual estos eventos pueden impactar sobre zonas urbanas. Estos modelos también se emplean en el planteamiento de medidas de mitigación como muros,

presas, terraplenes, entre otros. En los últimos años, han aparecido gran cantidad de programas con diversos algoritmos que modelan en dos o tres dimensiones los movimientos en masa como las avalanchas.

Los módulos de RAMMS: AVALANCHE (Avalanchas) y RAMMS: DEBRISFLOW (flujo de detritos) están diseñados para fenómenos de flujo que contienen partículas de nieve y rocas que se mueven rápidamente. En el módulo de avalancha, el fluido es aire, mientras que en el módulo de flujo de detritos el fluido intersticial es lodo. Los módulos se utilizan para calcular el movimiento desde el inicio al final en terreno tridimensional. Los modelos usan ecuaciones promediadas en profundidad y predicen la velocidad de pendiente paralela y alturas de flujo. Esta información es suficiente para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. Se pierde información en la dirección de la pendiente perpendicular (por ejemplo, distribución de masa y velocidad). Ambos modelos requieren una representación digital precisa del terreno (SLF/WSL, 2017).

5.1. Preparación de datos

Los datos de entrada para el modelamiento del flujo de detritos son los siguientes (figura 59):

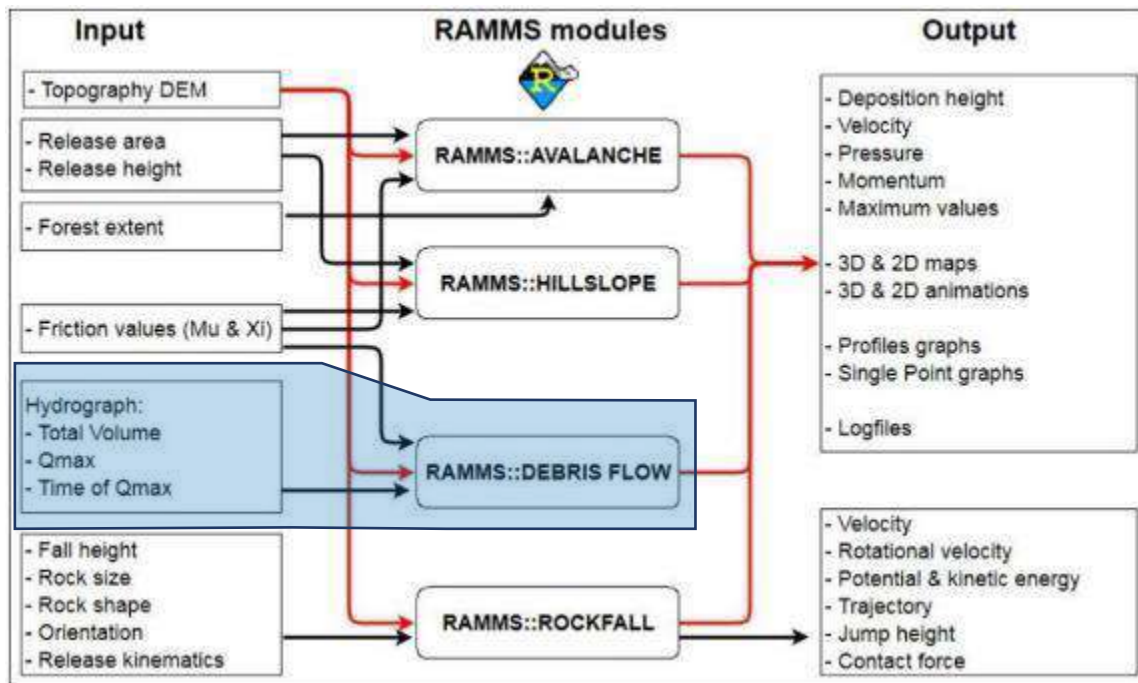


Figura 59. Flujo de trabajo del programa RAMMS con los datos de entrada y salida para cada módulo.

5.1.1. Topografía

Para la zona de deslizamiento y el canal de flujo, se utilizó el modelo digital de terreno obtenido en base a la fotogrametría aérea con dron con una resolución de muestreo en terreno de 5 cm/pix en formato .TIFF. La zona de levantamiento abarcó desde el sector Cruz Blanca hasta el caserío Agua Blanca (figura 60).

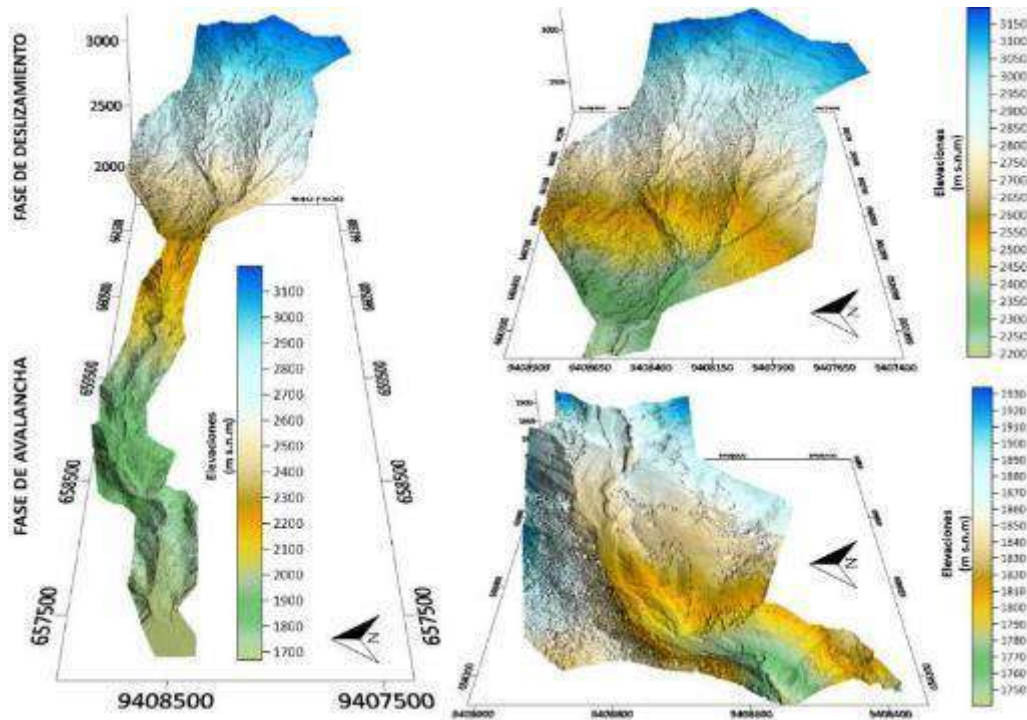


Figura 60. Modelo digital de terreno en formato GEOTIFF, obtenido de la fotogrametría con dron.

5.1.2. Área de liberación

Se definió el área de deslizamiento en base a la ortofoto obtenida de la fotogrametría con drones, la información se complementó con los trabajos de campo y la cartografía de peligros geológicos. El volumen de material fue estimado en base a imágenes satelitales pre-evento ocurrido el 17 de marzo (figura 61).



Figura 61. Imagen satelital de 01 enero 2021 donde se observa el DME-111.

Mediante el programa Autocad Civil 3D, se reconstruyó el DME-111 mediante objetos sólidos cuyas alturas y dimensiones fueron estimadas en base a imágenes satelitales y fotos del DME, este objeto fue introducido en la interfaz del programa RAMMS (figuras 62 y 63).

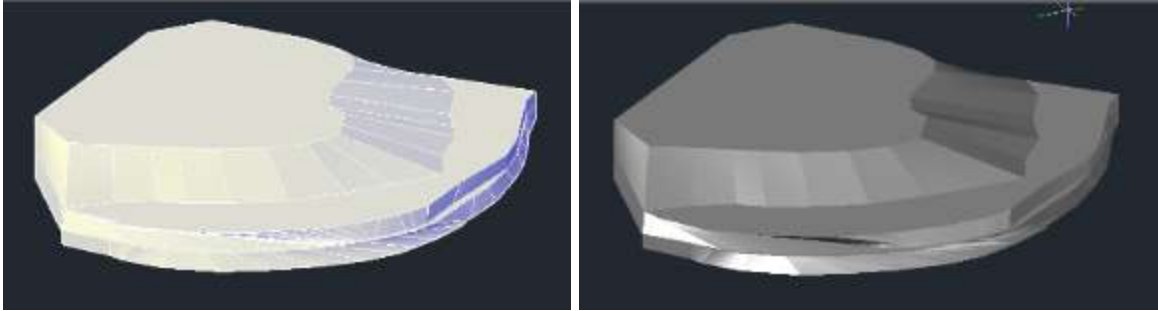


Figura 62. Vista conceptual y realista del DM-111, reconstruido con objetos sólidos.



Figura 63. Vista lateral del DME-111. Fuente: Municipalidad Distrital de Canchaque, 2021.

Los reportes del MTC indican que el DME-111 tenía una capacidad de 1 800 000 metros cúbicos. Según reportes, a la fecha, solo se había utilizado un tercio del volumen de almacenamiento total autorizado, es decir 600 000 metros cúbicos. Este volumen se ha tomado como referencia para el modelamiento mediante el módulo de DEBRIS FLOW de RAMMS.

5.1.3. Datos de densidad y fricción

Se tomaron como referencia los datos publicados por el WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF y expuesto en el manual de Debris Flow.

5.1.4. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal o área forestal, se delimitó en base a la ortofoto, ingresándola como shapefile.

5.2. Resultados

Los resultados del modelamiento fueron calibrados en base al registro de fotos y videos que se tomaron durante ocurrencia del deslizamiento y flujo de detritos, la cartografía geomorfológica del deslizamiento y el canal de transporte, la caracterización de los peligros y las alturas de los depósitos encontrados.

5.2.1. Alturas de flujo

Las alturas observadas en campo se evidenciaron en la erosión de las paredes laterales del cauce de la quebrada Pusalca. En la fase 1 de deslizamientos el cauce de la quebrada tiene una profundidad de 45 m, el material proveniente del DME-111, alcanzó una altura máxima de 43.65 m y alturas promedio de 9 m a 21 m (figuras 64, 65 y 66).

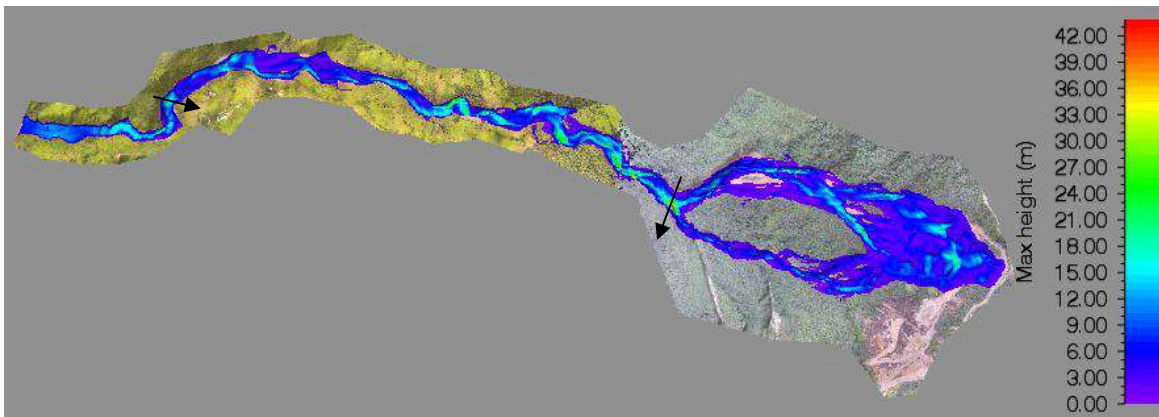


Figura 64. Vista de las alturas máximas registradas en la fase de deslizamiento y flujo de detritos.

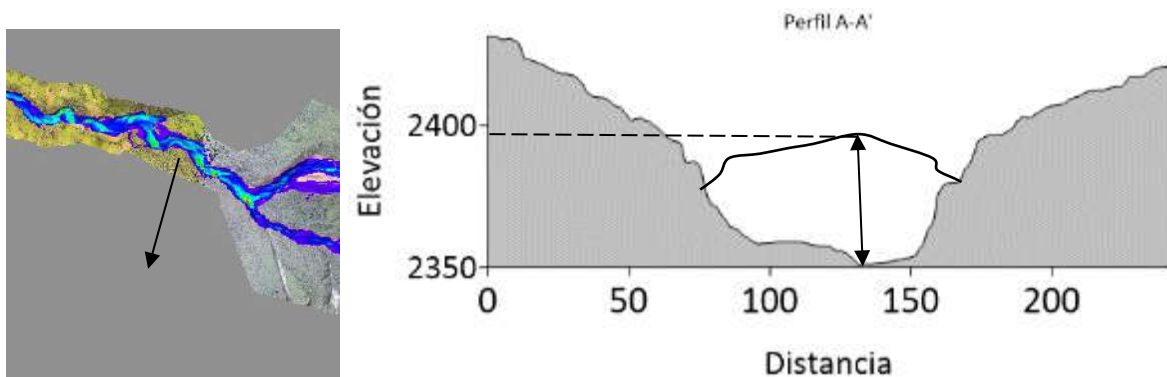


Figura 65. Vista de las alturas máximas registradas en la fase de deslizamiento.

Los materiales deslizados se acumularon en el cauce de la quebrada alcanzando una altura de 43 m, esta sección se ubica en el tramo inicial de la zona de transición donde los materiales pasan de un estado semi sólido a líquido o masa hiperconcentrada, los bloques clastos y la palizada son elementos el flujo carga a medida que erosiona la ladera de deslizamiento y canal de la quebrada Pusalca.

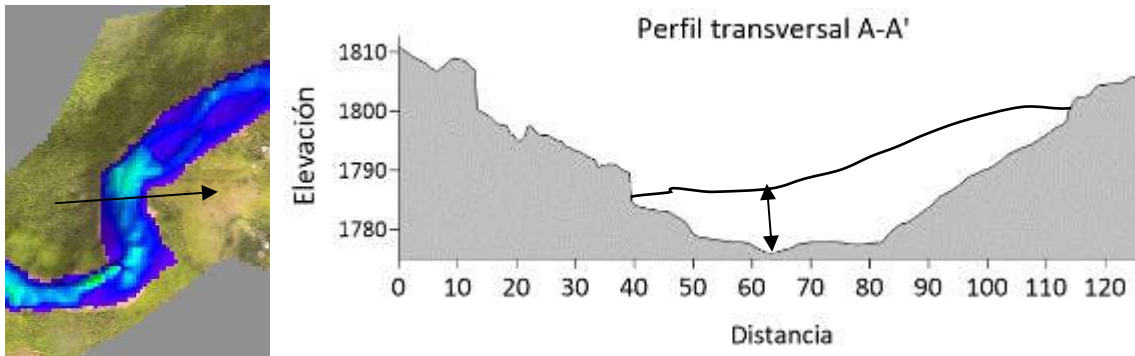


Figura 66. El flujo llegó a altura de 10 m en las proximidades del caserío Agua Blanca.

5.2.2. Velocidad del flujo

El modelamiento mediante el programa RAMMS del módulo flujo de detritos arrojó velocidades máximas de 57 m/s y promedios de 27 m/s hasta 45 m/s, esta velocidad se observan en la fase inicial cuando los materiales descienden por una pendiente muy fuerte para luego descender a velocidades entre 9 m/s y 25 m/s (figura 67).

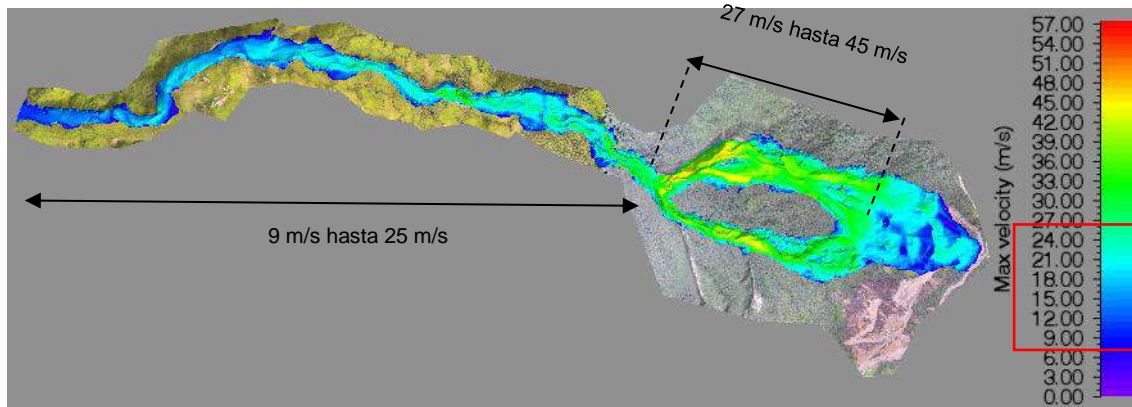


Figura 67. Velocidades modeladas por el programa RAMMS, máximas de 57 m/s y promedio de 9 m/s y 24 m/s.

Las alturas y velocidades observadas mediante el modelamiento, se aproximan al comportamiento típico de este evento que alcanza grandes alturas destruyendo todo a su paso, las velocidades del flujo disminuyen o aumentan debido al cambio de pendiente, aportes de materiales gruesos, finos y agua.

Los cálculos de velocidades realizados mediante la metodología de Chow y los registros de videos se encuentran dentro del umbral observado (12.79 m/s y 16.37 m/s), teniendo en cuenta, los diferentes tipos de litología, geformas, depósitos aportantes y cursos de agua de quebradas aportantes, este modelo puede calibrarse y optimizarse en próximas investigaciones.

El modelamiento se realizó desde el sector Cruz Blanca hasta el caserío Cruz Blanca abarcando un total de 4.7 km, se espera llegar a modelar el evento geodinámico hasta el sector Potreros.

6. CONCLUSIONES

- a) El Depósito de Materiales Excedentes – 111, se encuentra sobre andesitas con niveles piroclásticos en contacto con lavas andesíticas con piroclastos de cenizas ubicadas entre los sectores El Tambo y Surupite. Este tipo de rocas corresponden a contactos litológicos del Centro Volcánico Sondorillo, estos contactos originan áreas de fuerte debilidad debido al tipo de emplazamiento, litificación, esfuerzos de tensión y compresión que deforman las rocas. Los afloramientos se encuentran fuertemente fracturados dejan infiltrar el agua al subsuelo, los depósitos aluviales conformados por gravas, gravillas y clastos dispersos en una matriz limo arenosa y arcillosa forman también un medio poroso, poco compacto y susceptibles a erosión.
- b) El DME-111 se ubica sobre una vertiente o piedemonte aluvial (V-al) con pendientes moderadas (5° - 15°), sin embargo, a escasos metros del pie de la estructura la pendiente cambia abruptamente a muy fuerte (25° – 45°).
- c) Por la quebrada Pusmalca, descendieron flujos de detritos a gran velocidad (9 m/s a 25 m/s), los materiales deslizados forman una vertiente o piedemonte con depósitos de deslizamiento (V-dd).
- d) El flujo de detritos se canalizó por el cauce de la quebrada Pusmalca, la energía del flujo modificó el ancho del canal originando una vertiente aluvio torrencial (P-at) de hasta 110 m de ancho.
- e) En ambas márgenes de la quebrada Pusmalca, existen antiguos depósitos de movimientos en masa clasificados como vertientes o piedemontes coluvio deluviales (V-cd), limitados por montañas en rocas intrusivas (RM-ri), metamórficas (RM-rm) y volcánico sedimentarias (RM-rvs).
- f) En general, las geoformas del área evaluada presentan evidencias de una geodinámica muy activa, tanto en el pasado como en el presente con relieves con pendientes moderadas a muy escarpadas.
- g) En conjunto, las geoformas y la litología sobre las cuales se desarrolló el deslizamiento del DME-111 y la posterior fase de flujo de detritos, presentaban una susceptibilidad alta a muy alta a la generación de movimiento en masa, tal como lo muestra el mapa presentado en el informe de peligros geológicos y geo-hidrológicos detonados por el Niño Costero 2017 en la región Piura, realizado en diciembre del 2017.
- h) El tipo de movimiento en masa identificado en el DME-111, ha sido catalogado como un movimiento complejo (deslizamiento-flujo), el deslizamiento es de tipo rotacional, retrogresivo en estado activo y con posterior fase de flujo de detritos.
- i) El deslizamiento tiene una corona con longitud de 1252 m de, el escarpe tiene forma irregular, continua y alcanza una longitud de 1141 m, con salto de falla con desniveles de hasta 60 m, el área total afectada puede llegar a extenderse hasta

136 ha. El cuerpo de la masa deslizada tiene un largo de 450 m y ancho de 380 m de ancho con desplazamientos de 320 m, mientras que, la zona de acumulación llegó a los 970 m.

- j) La fase de flujo de detritos alcanzó un recorrido de 30 km aproximadamente, en el caserío Piedra Azul ubicado a 24 km se observó el paso de evento proyectándose otros 6 km hacia los caseríos ubicados aguas abajo. El flujo alcanzó un ancho de hasta 110 m, con alturas máximas de 20 m y velocidades promedio de entre 9 m/s y 24 m/s. Los materiales de la masa desplazada y depositada a lo largo de la quebrada Pusmalca corresponde a bloques de tonalitas y granitos de hasta 5 m de largo, 2.5 m ancho y 3 m de alto.
- k) El modelamiento realizado mediante el módulo DEBRIS FLOW (flujo de detritos) del programa RAMMS, alcanzó los parámetros esperados, típicos comportamientos del desarrollo de este tipo de peligros geológicos. El modelo fue calibrado mediante las observaciones y datos recopilados en campo por los especialistas de Ingemmet. Este modelamiento demostró tirantes promedio de entre 10 m y 20 m de alto y velocidades de 9 m/s a 24 m/s, las pruebas realizadas mediante el método de Chow 12.79 m/s y el análisis de video 16.02 m/s se encuentran dentro de los rangos modelados.
- l) El deslizamiento ocurrido el 17 de marzo, fue desencadenado por lluvias intensas registradas del 01 al 16 de marzo, estas alcanzaron acumulados de 350 mm y 115 mm en las estaciones Huarmaca y Sondorillo. El 16 de marzo, un día antes del deslizamiento, las precipitaciones alcanzaron el pico máximo de 75.4 mm y 43.3 mm en ambas estaciones dentro de los 16 días registrados. Esto provocó la sobresaturación de los sedimentos del depósito de materiales excedentes (DME), el aumento de carga, el aumento del tirante de agua, la disminución de la cohesión y la falla del material.
- m) Los sectores Cruz Blanca, Surupite y El Tambo tienen una alta a muy alta susceptibilidad a generar movimiento en masa.
- n) El deslizamiento del DME-111, por las condiciones geológicas y geomorfológicas descritas anteriormente, se considera de **PELIGRO MUY ALTO** a la generación de nuevos movimientos complejos. El sector es catalogado como **ZONA CRÍTICA**.
- o) Los materiales depositados en el DME-111 no han terminado de deslizarse, existen materiales disponibles y susceptibles a generar nuevos eventos.

7. RECOMENDACIONES

- A) El movimiento complejo ocurrido en la quebrada Pusalca, debe sentar un precedente importante en la planificación y desarrollo de proyectos de esta índole, teniéndose en cuenta no solo las características geotécnicas de los lugares donde se construirán este tipo de estructuras; sino también, la caracterización geodinámica de peligros geológicos recientes y antiguos, la geología y el estudio de las geoformas y los procesos que modelaron el relieve. Estos factores, delimitan las zonas susceptibles a movimientos en masa, tal como se mostró en los estudios realizados en el año 2017, que advertía que los sectores involucrados tenían una alta a muy alta probabilidad de generar eventos geodinámicos.
- B) Los depósitos materiales excedentes conocidos como DME, deben tener una instrumentación geotécnica que permita monitorear las características geológicas, geomecánicas y geofísicas de los materiales ubicados en estas estructuras, con la finalidad de advertir cualquier incremento en los niveles internos del agua, la sobresaturación de los materiales, desplazamientos o hundimientos.
- C) Se deben realizar trabajos de estabilización del talud y materiales deslizados en el DME-111, luego implementar un programa gradual de revegetación de las laderas afectadas. En los siguientes meses y durante la temporada de lluvias, se debe realizar el monitoreo interdiario del deslizamiento, para alertar futuras reactivaciones que puedan producir daños. Implementar estacas y cercos que bordeen los escarpes de los deslizamientos activos y las zonas susceptibles para estimar los desplazamientos.
- D) Construir diques transversales a lo largo de la quebrada Pusalca y de forma escalonada, para reducir la carga granular conformada por bloques y clastos. Reducir la energía de los flujos que puedan activarse por lluvias intensas.
- E) Se debe tomar en cuenta la delimitación de los peligros geológicos evaluados, sobre todo del flujo de detritos, considerando el ancho y alturas estimadas con la finalidad de implementar y restaurar las infraestructuras afectadas.
- F) Plantear la construcción de muros de contención en las quebradas Pusalca, Agua Blanca y Chorro Blanco, para mitigar el impacto posible ante flujos de detritos, además de posibles desbordes que afecten las estructuras de distribución de agua para riego y agua potable.
- G) Sensibilizar a la población y autoridades a través de talleres o charlas con el objetivo de concientizar en gestión de riesgos, para evitar asentamientos de viviendas o infraestructura en zonas de alto peligros a movimientos en masa.


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


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

8. BIBLIOGRAFÍA

Antonie, P. (1992). "Les problémes posés par l'instabilité des versants de grande ampleur-aspects géologiques". Bull. Int. Assoc. Engineering Geology, N°45. 9-24. Disponible en:

<<https://www.semanticscholar.org/paper/Les-probl%C3%A8mes-prs%C3%A9s-par-l'instabilit%C3%A9-des-versants-Antoine/2fe44989d63357b30b04abf71fbbdb63658943edf>>

Bateman, A., Medina, M., Steiner, F., Velasco, D. (2006). "Estudio Experimental sobre flujos granulares hiperconcentrados". XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela. pp. 1-10. Disponible en:

<<http://servicios.ucbtja.edu.bo:8090/sihita/css/docs/EST-00015/index.html#p=1>>

Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N., 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. Disponible en:

<<https://pubs.geoscienceworld.org/aeg/eeg/article-abstract/7/3/221/60609/A-review-of-the-classification-of-landslides-of?redirectedFrom=fulltext>>

JICA (2007). Estudio sobre medidas preventivas para desastres en carreteras en la red fundamental de la República de Bolivia informe final: manual de gestión y prevención de desastres en carreteras. Procedimiento V: Obras de Prevención de Desastres, pág. 23. Disponible en:

<<https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11866357.pdf>>

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007) - Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p., 1 CD-ROM. Disponible en:

<<https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2792;jsessionid=A71A73DD0840FE1598AAFEB5F93E0A6C>>

Reyes, L. & Caldas, J. (1987). Geología de los cuadrángulos de Las Playas, La Tina, Las Lomas, Ayabaca, San Antonio, Morropón, Huancabamba, Olmos y Pomahuaca 13-d, 13-e, 13-f, 14-d, 14-e, 14-f, 14-g, 15-d, 15-e. INGEMMET, Boletín A N° 39]. Disponible en:

<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/159/145/A-039-Boletin-Las_Playas_9c-La_Tina_9d-Las_Lomas_10c-Ayabaca_10d-San_Antonio_10e-Chulucanas....pdf>

SLF/WSL. (2017). User Manual v1.7 Debris Flow A numerical model for debris flows in research and practice. Disponible en:

<https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_DBF_Manual.pdf>

Suarez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN. Disponible en:

<<https://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html>>

Varnes, D. J. (1978). Slope movements types and processes, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, Landslides analysis and control: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 176. Disponible en: <[https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1855370](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1855370)>

Vílchez, Sosa, Jaimes, Mamani, Cerpa, Martínez (2017). Peligros geológicos y geohidrológicos detonados por el Niño Costero 2017 en la región Piura. Disponible en: <<https://hdl.handle.net/20.500.12544/1022>>

Vilchez, M., Luque, G. & Rosado, M. (2013) - Estudio de riesgo geológico en la región Piura. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 52, 250 p., 9 mapas. Disponible en: <<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/294>>

Villota, H. (2005). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. España: Instituto Geográfico Agustín Codazi. Disponible en: <<https://searchworks.stanford.edu/view/6532331>>

WP/WLI, 1990, A suggested method for reporting a landslide: Bulletin of the International Association of engineering Geology, no. 41, p. 5–12. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/290438810_A_suggested_method_for_reporting_a_landslide>

ANEXO 1: MAPAS Y PERFILES

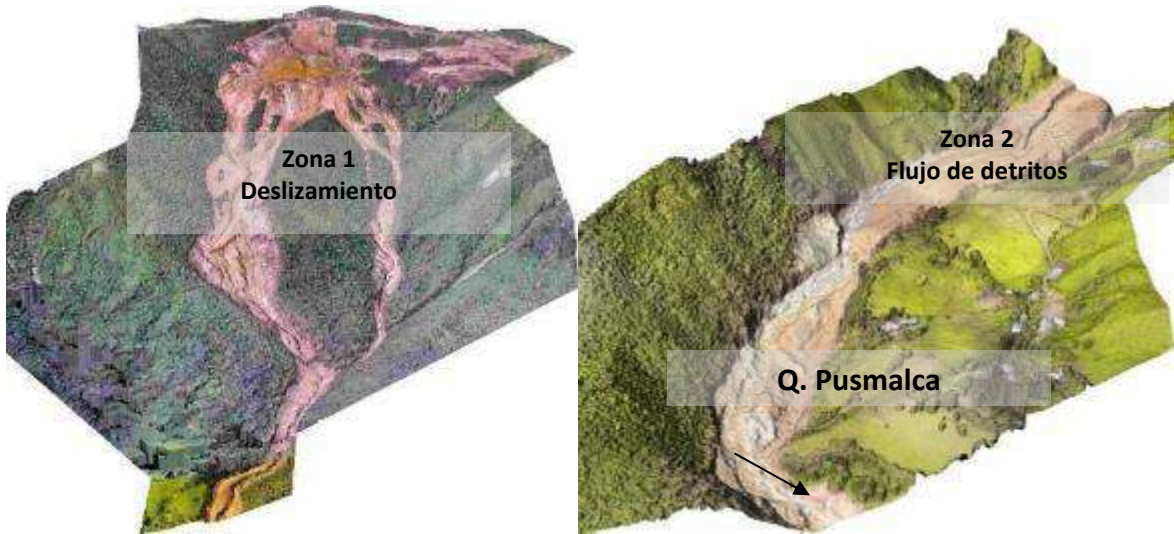


Figura 68. Vista en perspectiva de las zonas 1 y 2 del movimiento complejo (deslizamiento-flujo de detritos) en la quebrada Pusmalca.



Figura 69. Vista en perspectiva de las zonas 1 y 2 del movimiento complejo (deslizamiento-flujo de detritos) en la quebrada Pusmalca.

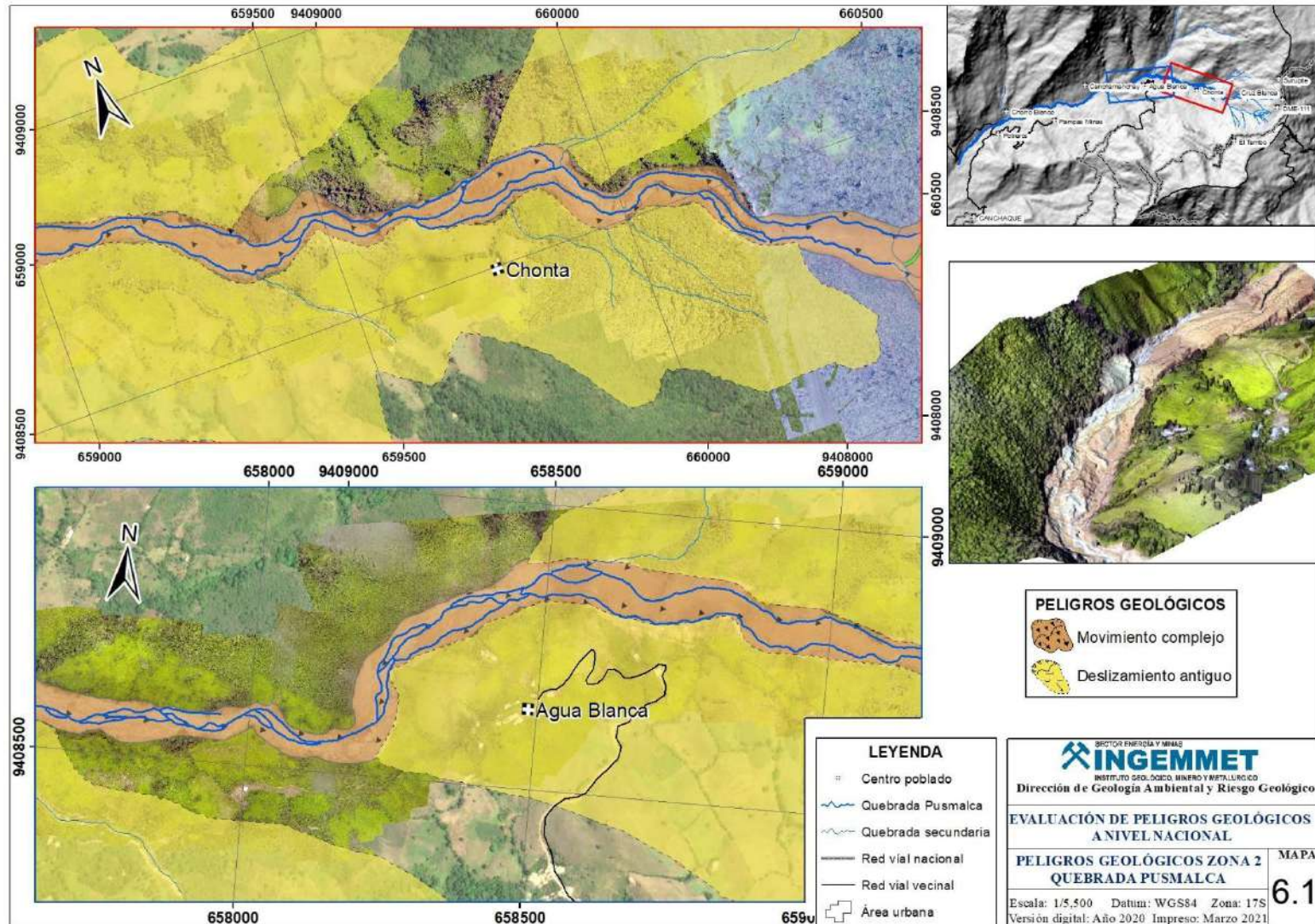


Figura 70. Mapa de peligros geológicos del tramo 6.1, zona 2 del movimiento en masa complejo, fase de flujo de detritos.

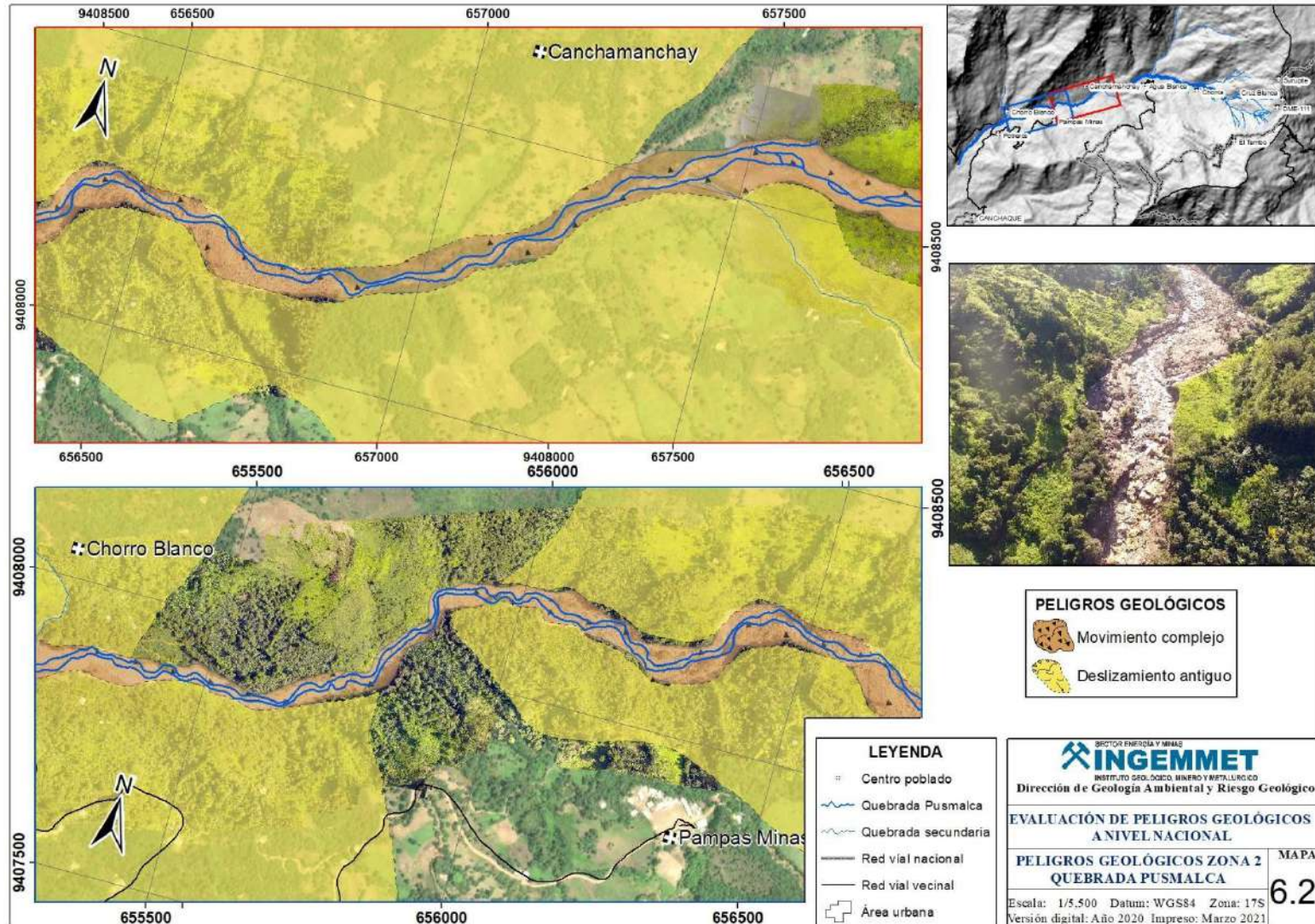


Figura 71. Mapa de peligros geológicos del tramo 6.2, zona 2 del movimiento en masa complejo, fase de flujo de detritos.

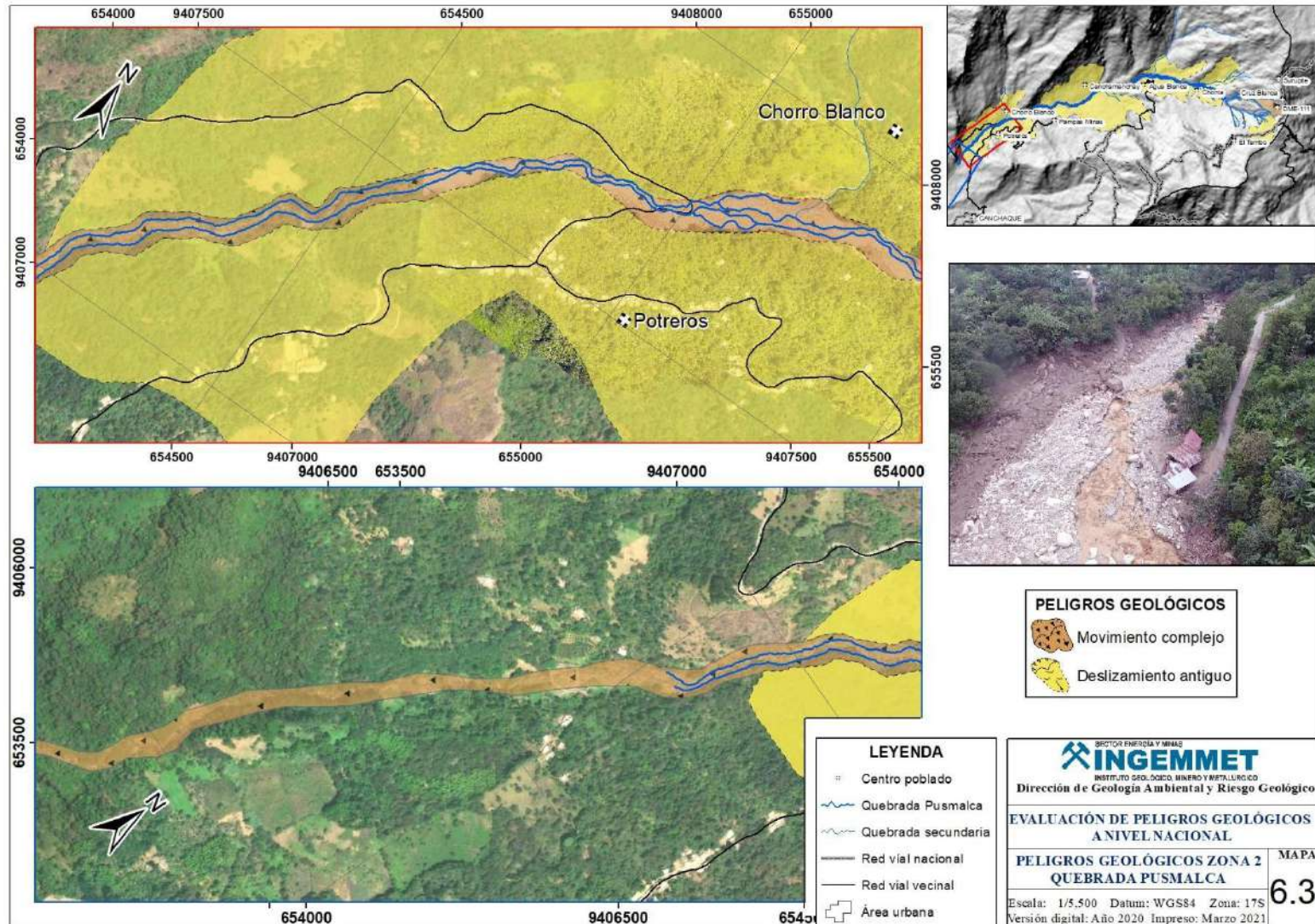


Figura 72. Mapa de peligros geológicos del tramo 6.3, zona 2 del movimiento en masa complejo, fase de flujo de detritos.

ANEXO 2: GLOSARIO

Movimiento complejo

Consiste en la combinación de una deformación gravitacional profunda y flujos asociados. Estos son complementarios, debido a que la estructuración de la masa movilizada por la deformación gravitacional en su zona distal, es aprovechada en las cabeceras o zona de arranque de los flujos (Varnes, 1978).

Son aquellos que resultan de la combinación de dos o más tipos de movimientos elementales descritos anteriormente. Estos movimientos alcanzan generalmente gran tamaño (Antoine, 1992) afectando, a veces, a laderas completas.

Deslizamiento

Según la Guía para Evaluación de Amenazas de Movimientos en Masa en la Región Andina (PMA, 2007), los deslizamientos son movimientos ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante (figura 73).

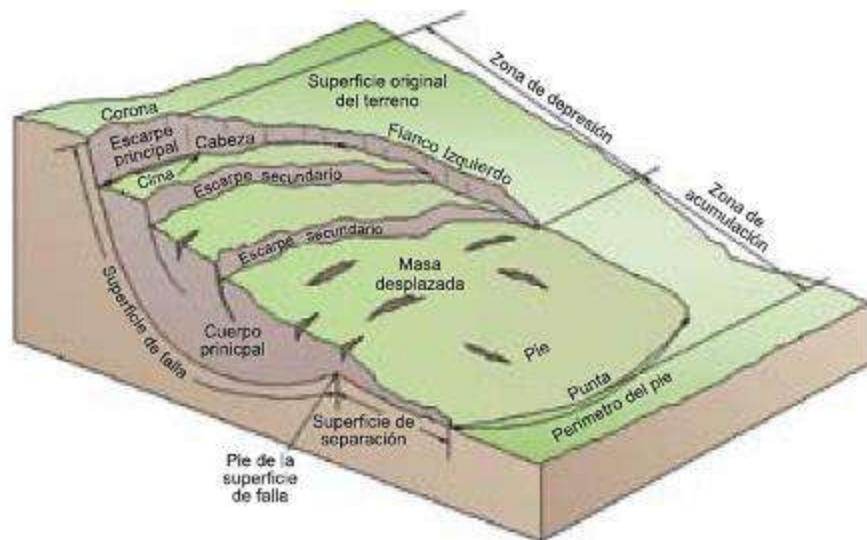


Figura 73. Diagrama de bloque de un deslizamiento (WP/WLI, 1990).

Flujo

Según Varnes (1978), un flujo es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída.

Flujo de detritos (Debris flows)

Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (índice de plasticidad menor al 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes. Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender en el canal y finalmente los depositan en abanicos de detritos (figura 74).

Sus depósitos tienen rasgos característicos como albardones o diques longitudinales, canales en forma de u, trenes de bloques rocosos y grandes bloques individuales. Los flujos de detritos desarrollan pulsos usualmente con acumulación de bloques en el frente de onda. Como resultado del desarrollo de pulsos, los caudales pico de los flujos de detritos pueden exceder en varios niveles de magnitud a los caudales pico de inundaciones grandes. Esta característica hace que los flujos de detritos tengan un alto potencial destructivo.



Figura 74. (a) Flujos de detritos, Cuenca del río Checras, Lima, Perú (Fotografía L. Fidel). (b) Flujos de detritos Tambo de Viso, Departamento de Lima, Perú, enero 16 de 1998.

ANEXO 3: ALTERNATIVAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN

Banquetas

En la parte inferior de un talud, la descarga y velocidad del agua superficial aumentan, causando el incremento de las fuerzas de socavación. En este caso, la velocidad de la corriente puede reducirse al proporcionar una banqueta casi horizontal a la mitad del talud, o la concentración de agua superficial en la parte inferior del talud puede prevenirse al construir una zanja en la banqueta para drenar el, agua hacia afuera del talud. La banqueta también puede usarse como acera para inspección o como andamio para reparación.

Por lo tanto, las banquetas deben diseñarse tomando en cuenta la dificultad de inspeccionar y reparar, la pendiente del talud, la altura de corte, los suelos del talud, los costos y otras condiciones (figura 75).

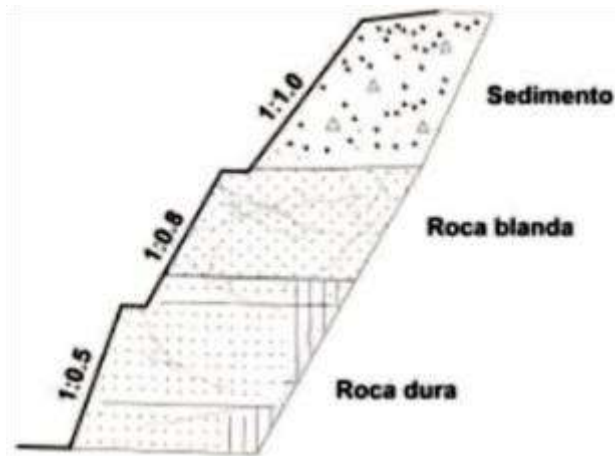


Figura 75. Condiciones de terreno y forma de taludes (JICA, 2007).

Uso de vegetación

El efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes es muy debatido; el estado del uso actual deja muchas dudas e inquietudes y la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo, no ha tenido una explicación universalmente aceptada. Sin embargo, la experiencia ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de erosión, reptación y fallas subsuperficiales (J. Suárez Díaz, 1998). Para poder analizar los fenómenos del efecto de la vegetación sobre el suelo se requiere investigar las características específicas de la vegetación en el ambiente natural que se esté estudiando. Entre los factores se sugiere analizar los siguientes:

- Volumen y densidad de follaje, tamaño, ángulo de inclinación y aspereza de las hojas, altura total de la cobertura vegetal, presencia de varias capas diferentes de cobertura vegetal, tipo, forma, profundidad, diámetro, densidad, cubrimiento y resistencia del sistema de raíces.
- El tipo de vegetación, tanto en el talud como en el área arriba del talud es un parámetro importante para su estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales: En primer lugar, tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y, además, da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces.
- Como controlador de infiltraciones tiene un efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo al tomar el agua que requiere para vivir.

Factores que aumentan la estabilidad del talud:

1. Intercepta la lluvia
2. Aumenta la capacidad de infiltración
3. Extrae la humedad del suelo
5. Las raíces refuerzan el suelo, aumentando la resistencia al esfuerzo cortante
6. Anclan el suelo superficial a mantos más profundos
7. Aumentan el peso sobre el talud
8. Trasmiten al suelo la fuerza del viento
9. Retienen las partículas del suelo disminuyendo la susceptibilidad a la erosión



Figura 76. Ladera con evidencias de deslizamientos que deben reforestarse.

Disipadores de energía

Es preciso disipar la energía en zonas de ocurrencia de flujos de detritos (huaico) y reducir el volumen de los materiales acarreados; para ello es necesario conocer la cantidad de material que será trasladado por el flujo y con esa información construir estructuras transversales al eje del cauce, en forma de diques, orientados a la disipación de energía y la retención de la mayor cantidad posible de materiales, sólidos o líquidos, (figura 77).



Figura 77. Condiciones de terreno y forma de taludes (JICA, 2007).

En caso se realice la construcción de infraestructuras viales como puentes, será necesario implementar obras que aseguren la protección de una adecuada infraestructura, anclada a rocas competentes, determinada por estudios geotécnicos y la supervisión de especialistas.

Muros de contención

El propósito de una estructura de contención es el resistir las fuerzas ejercidas por la tierra contenida, y transmitir esas fuerzas en forma segura a la fundación o a un sitio por fuera de la masa analizada de movimiento. En el caso de un deslizamiento de tierra el muro ejerce una fuerza para contener la masa inestable y transmite esa fuerza hacia una cimentación o zona de anclaje por fuera de la masa susceptible de moverse. Las deformaciones excesivas o movimientos de la estructura de contención o del suelo a su alrededor deben evitarse para garantizar su estabilidad (Díaz, 1998).

Tipos de Estructura

Existen varios tipos generales de estructura, y cada una de ellas tiene un sistema diferente de transmitir las cargas (figura 78).

Muros masivos rígidos

Son estructuras rígidas, generalmente de concreto, las cuales no permiten deformaciones importantes sin romperse. Se apoyan sobre suelos competentes para transmitir fuerzas de su cimentación al cuerpo del muro y de esta forma generar fuerzas de contención.

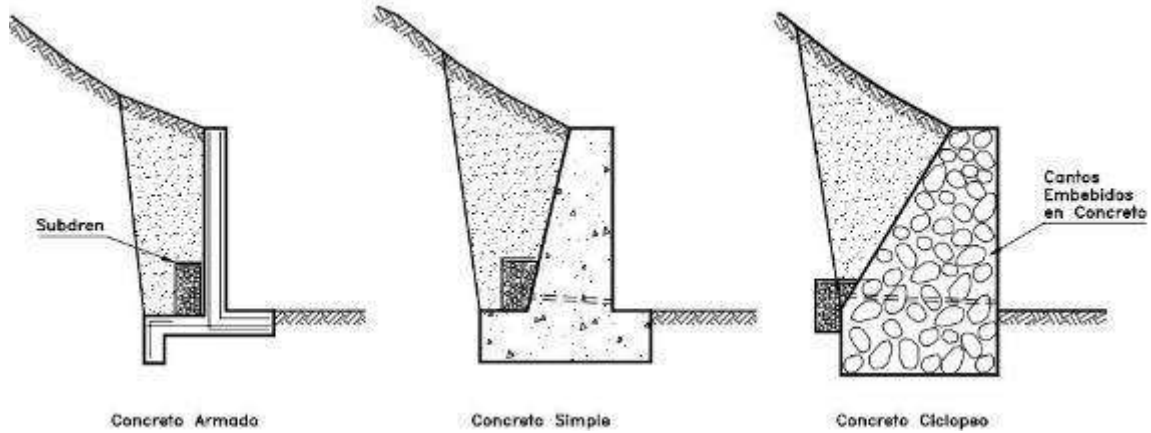


Figura 78. Esquema de muros rígidos (Díaz, 1998).

Ventajas y desventajas de los diversos tipos de muro rígido

Muro	Ventajas	Desventajas
Reforzado	Los muros de concreto armado pueden emplearse en alturas grandes (superiores a diez metros), previo su diseño estructural y estabilidad. Se utilizan métodos convencionales de construcción, en los cuales la mayoría de los maestros de construcción tienen experiencia.	Requieren de buen piso de cimentación. Son antieconómicos en alturas muy grandes y requieren de formaletas especiales. Su poco peso los hace inefectivos en muchos casos de estabilización de deslizamientos de masas grandes de suelo.
Concreto simple	Relativamente simples de construir y mantener, pueden construirse en curvas y en diferentes formas para propósitos arquitectónicos y pueden colocarse enchanes para su apariencia exterior.	Se requiere una muy buena fundación y no permite deformaciones importantes, se necesitan cantidades grandes de concreto y un tiempo de curado antes de que puedan trabajar.
Concreto ciclópeo	Similares a los de concreto simple. Utilizan bloques o cantos de roca como material embebido, disminuyendo los volúmenes de concreto.	El concreto ciclópeo (cantos de roca y concreto) no puede soportar esfuerzos de flexión grandes.