SECTOR ENERGÍA Y MINAS

INGEMMET

INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico Nº A7308

EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL SECTOR YATO

Departamento Arequipa

Provincia Castilla

Distrito Pampacolca

OCTUBRE

2022

VERSIÓN N° 001 CARÁTULA DE INFORME TÉCNICO - INGEMMET / 04.01.19

EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL SECTOR YATO

(Distrito Pampacolca, provincia Castilla, departamento Arequipa).

Elaborado por la
Dirección deGeología
Ambiental y Riesgo
Geológico del
Ingemmet

Equipo de investigación:

David Valdivia Humerez
Yhon Soncco Calsina
Pavel Dávalos

Referencia bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). Evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa en el sector Yato, distrito Pampacolca, provincia Castilla, departamento Arequipa., Lima: INGEMMET, Informe Técnico ***A7308****, 34p.*

ÍNDICE

ÍNDICE 2
RESUMEN 3
1. INTRODUCCIÓN 4
1.1 Objetivos del estudio 4
1.2 Antecedentes y trabajos anteriores 4
1.3 Aspectos generales 5
2. GLOSARIO 6
3. ASPECTOS GEOLÓGICOS 7
3.1 Unidades litoestratigráficas 8
3.1.1 Formación Puente (Jm-pu) 8
3.1.2 Formación Cachios (Jm-ca). 8
3.1.3 Formación Labra (Jm-la) 8
3.1.4 Depósito aluviales (Qh-al). 8
3.1.5 Depósito de lahar (Qh-la). 8
3.1.6 Depósito coluvio-deluviales (Qh-cd) 9
3.1.7 Depósitos fluviales (Qh-fl) 9
4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS 9
4.1 Pendientes del terreno 9
4.2 Unidades geomorfológicas 10
4.2.1 Geoformas de carácter tectónico degradacional y denudacional 10
4.2.2 Geoformas de carácter tectónico deposicional y agradacional 11
5. PELIGROS GEOLÓGICOS 12
5.1 Peligros geológicos por movimientos en masa 12
5.1.1 Deslizamiento Antiguo Inferido (DAI) 13
5.1.3 Zona de Derrumbes 18
5.1.3 Lahares 19
Figura 12. Columna estratigráfica en Escaura Chico (Tomado de Valdivia, D., 2019). 20
5.2 Factores condicionantes 21
5.3 Factores desencadenantes 22
6 CONCLUSIONES 26
7 RECOMENDACIONES 27
BIBLIOGRAFÍA 28
ANEXO 1: MAPAS 30

RESUMEN

El presente informe técnico es el resultado de la evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa, realizados en el sector de Yato, distrito de Pampacolca, provincia de Castilla, departamento Arequipa. Con este trabajo, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – Ingemmet cumple con la función de brindar asistencia técnica en el tema de peligros geológicos para los tres niveles de gobierno (local, regional y nacional).

En la zona de estudio afloran rocas sedimentarias de tipo areniscas moderadamente meteorizadas y muy fracturadas de la Formación Puente y Labra; también se tienen lutitas con intercalaciones de areniscas y limolitas moderadamente meteorizadas y muy fracturadas de la Formación Cachios. Estas formaciones, están cubiertas por depósitos coluvio-deluviales, conformados por bloques con diámetros máximo de 70 cm (3%), bolones (30%), gravas (25%), englobados en matriz limo-arenosa (42%), que son de fácil erosión; como también se presentan depósitos de lahares antiguos provenientes del Complejo Volcánico Nevado Coropuna (CVNC), que se han identificado en el sector Escaura Chico, están constituidos por bloques (5 %) con un diámetro máximo de 60 cm, bolones (10%), gravas (35%), de composición heterogénea (rocas volcánicas y sedimentarias), de forma angulosa a subangulosa; englobados en matriz arcillo-limosa (50%).

Las geoformas según su origen tectónico-degradacional, corresponden a laderas de montaña en roca sedimentaria; así como geoformas de carácter depositacional y agradacional principalmente originada por la ocurrencia de movimientos antiguos, que configuran geoformas de piedemonte (vertiente o piedemonte coluvio-deluvial) y planicie (terraza aluvial y fluvial).

En el sector Yato, los peligros geológicos identificados corresponden a deslizamientos, derrumbes y flujo de detritos (lahares); además, se han identificado procesos de erosión fluvial en el cauce del río Yato.

Los factores condicionantes que originan la ocurrencia de peligros geológicos por movimientos en masa en el sector Yato son: rocas de areniscas y lutitas moderadamente meteorizadas y muy fracturadas; así como por la presencia de depósitos de remoción antiguos y de desglaciación del CVNC, que se encuentran poco compactos, que permiten la infiltración y retención del agua, siendo fácilmente saturados y susceptibles a los movimientos en masa. Por otro lado, las pendientes de los terrenos varían desde llano a inclinado suavemente (1°-5°) en las terrazas, mientras en el cuerpo del deslizamiento varían de fuertes a muy fuertes (15°-45°), además presenta sectores con pendientes abrupta (> 45°) en las quebradas. Se suman a estos la presencia de un canal de regadío sin revestimiento, ubicado sobre la reactivación del deslizamiento antiguo en el sector de Yato, cuyas aguas son vertidas directamente sobre los terrenos saturándolos generando la reactivación del deslizamiento antiguo.

Por todo lo expuesto, el sector de Yato se considera de **Peligro Muy Alto**, debido a la ocurrencia de movimientos en masa tipo deslizamientos, derrumbes y lahares; asimismo estos pueden ser reactivados en la temporada de lluvias (enero a marzo) y por movimientos sísmicos.

Finalmente, se brinda recomendaciones que se consideran importantes que las autoridades competentes pongan en práctica en las zonas de estudio, con la finalidad de minimizar las ocurrencias de daños que pueden ocasionar los procesos identificados; así como también evitar la generación de nuevas ocurrencias o eventos futuros que causen daños.

1. INTRODUCCIÓN

El INGEMMET, ente 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 (ACT11)", 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.

Atendiendo la solicitud de la municipalidad provincial de Pampacolca, según Oficio N°048-2021-MDP/A, en el marco de nuestras competencias que se realiza una evaluación de los peligros geológicos en el sector de Yato los días 4, 5 y 6 de marzo del 2021, realizada por el Ing. Yhon Soncco y el Ing. Pavel Dávalos.

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 Provincial de Castilla, Gobierno Regional de Arequipa, oficina de INDECI y COER - Arequipa, 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 presentan en el sector de Yato, eventos que pueden comprometer la seguridad física de las poblaciones, medios de vida (cultivos agrícolas) y vías de comunicación en la zona de influencia de los eventos.
b) Determinar los factores condicionantes y detonantes que influyen en la ocurrencia de los diferentes peligros identificados.
c) Emitir las recomendaciones pertinentes para la reducción o mitigación de los daños que pueden causar los peligros geológicos identificados

1.2 Antecedentes y trabajos anteriores

A) (Concha & Vázquez, (2017). Informe técnico: "Peligros Geológicos Asociados a la Dinámica del Río Llacllajo, distrito Tipan, provincia Castilla, departamento Arequipa.", indican que la zona de Yato, que por el incremento del caudal del río del mismo nombre (año 2016) reactivó derrumbes y deslizamientos a lo largo de su recorrido, a consecuencia de las lluvias excepcionales registradas en el departamento de Arequipa.

B) Valdivia, D., (2019), Tesis: "Evaluación de peligros volcánicos por flujos de lahares del Complejo Volcánico Nevado Coropuna (CVNC)", realizó el cartografiado geológico de los depósitos dejados por lahares asociados al CVNC en los sectores de Tipan, Jollpa y Andamayo, determinó que entre las

localidades de Yato -Paracolca, se tiene un depósito de lahar que ocupa un área aproximada de 396 972 m^2. Además, realizó un mapa de peligros por lahares determinando una zona de mayor posibilidad de ser afectada por estos eventos poco voluminosos de 1.5 millones de m^3, causados por la desglaciación del CVNC o por precipitaciones intensas.

C) Zavala, B.; Vilchez, M.; Rosado, M.; Pari, W. & Peña, F. (2014). Estudio Geoambiental en la Cuenca del Río Colca, Ingemmet, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 57, 222 p., 11 mapas: Describe que el entorno del río Yato es de susceptibilidad muy alta a movimientos en masa, esto se debe a las condiciones intrínsecas del terreno. Estos movimientos en masa se concentran donde ocurrieron deslizamientos en el pasado o recientes reactivaciones al modificar sus taludes.

1.3 Aspectos generales

1.3.1. Ubicación

El sector de Yato, está ubicado en el distrito de Pampacolca, provincia de Castilla, departamento de Arequipa (Figura 1), dentro de las coordenadas siguientes:

Cuadro 1. Coordenadas del sector Yato.

N°	*UTM - WGS84 - Zona 18S*		*Geográficas*	
	Este	*Norte*	*Latitud*	*Longitud*
1	764258.00 m E	8260869.00 m S	15º 42' 59.837" S	72º 32' 3.138" W
2	764524.00 m E	8260846.00 m S	15º 43' 0.483" S	72º 31' 54.199" W
3	764242.00 m E	8260687.00 m S	15º 43' 5.761" S	72º 32' 3.603" W
4	764508.00 m E	8260663.00 m S	15º 43' 6.44" S	72º 31' 54.664" W
COORDENADA CENTRAL DE LA ZONA EVALUADA O EVENTO PRINCIPAL				
Zona central	764383.00 m E	8260766.00 m S	15º 43' 3.138" S	72º 31' 58.901" W

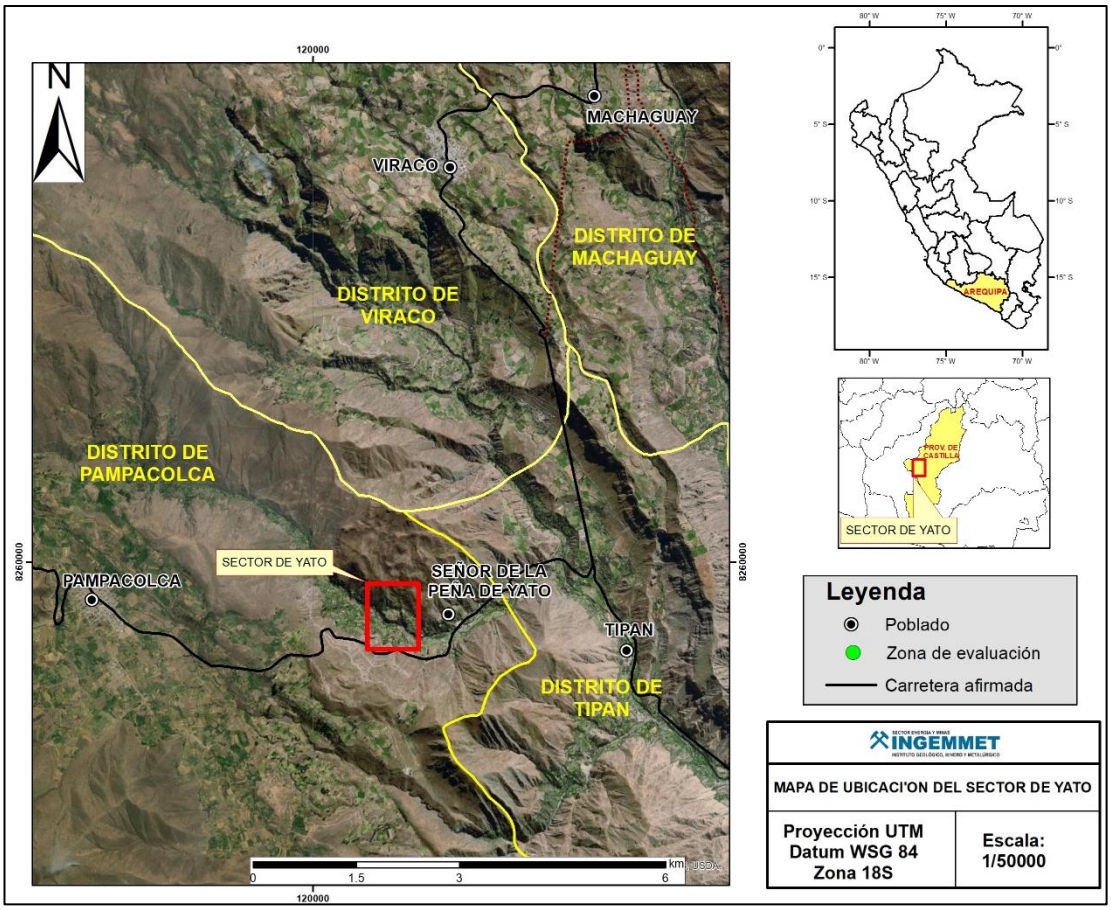


Figura 1. Mapa de ubicación del sector de Yato.

1.3.2. Accesibilidad

El acceso a la zona de Yato se realizó utilizando vehículo desde la ciudad de Arequipa, mediante la siguiente ruta:

Cuadro 2. Rutas y accesos a la zona evaluada.

Ruta	*Tipo de vía*	*Distancia (km)*	*Tiempo estimado*
Arequipa - Aplao	Asfaltada	177	3 h 7 min
Aplao – Tipán	Asfaltada	54	1 h min
Tipán – Yato	Trocha carrozable	6	20 min

2. GLOSARIO

Caídas de rocas. - La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra un desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido el material, cae desplazándose principalmente por el aire, y puede efectuar golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978). Dependiendo del material desprendido, se habla de una caída de roca, o una caída de suelo. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Cruden & Varnes, 1996), es decir, con velocidades mayores a 5 x 101 mm/s. En función al mecanismo principal y la morfología de las zonas

afectadas por el movimiento, así como del material involucrado, las caídas se subdividen en tres tipos principales: aludes, caída de rocas y derrumbes.

CVNC. - Abreviatura del Complejo Volcánico Nevado Coropuna, es uno de los 10 volcanes activos del sur del Perú (Brommley et al., 2019), comprende 5 edificios volcánicos y su última erupción fue hace aproximadamente 700 años (Úbeda, 2011).

Deslizamiento. - Llamado también fenómenos de ladera o movimientos de ladera; son desplazamientosde masas de tierra o de rocas que se encuentran en pendiente, se entiende como movimientodel terreno o desplazamientos que afectan a los materiales en laderas o escarpes. Estos desplazamientos se producen hacia el exterior de las laderas y en sentido descendente comoconsecuencia de la fuerza de la gravedad, Corominas y García Yagüe, (1997).

Derrumbe. - Son desprendimientos de masas de roca, suelo o ambas, a lo largo de superficies irregulares de arranque o desplome como una sola unidad, que involucra desde pocos metros hasta decenas y centenas de metros. Se presentan en laderas de montañas de fuerte pendiente y paredes verticales a subverticales en acantilados de valles encañonados. También se presentan a lo largo de taludes de corte realizados en laderas de montaña de moderada a fuerte pendiente, con afloramientos fracturados y alterados de diferentes tipos de rocas; así como en depósitos poco consolidados (Vilchez, 2020).

Flujo de detritos (Huaicos). - Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos, 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. Sus depósitos tienen rasgos característicos como albardones o diques longitudinales, canales en forma de “u”, trenes de bloques rocosos y grandes bloques individuales. Tiene un alto potencial destructivo. La mayoría de los flujos de detritos alcanzan velocidades en el rango de movimiento extremadamente rápido, y por naturaleza son capaces de producir la muerte de personas (Hungr, 2005).

Flujo de lahar. - Son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizados por el agua y que fluyen rápidamente (20-60 km/h) por valles y quebradas originados en los volcanes (Tilling, 1993). Se generan en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica (Tilling, 1993). El agua puede provenir de fuertes lluvias, fusión de hielo o nieve, caída de bloques de hielo, ríos o lagunas cratéricas. Los lahares viajan a lo largo de quebradas o ríos y eventualmente pueden salir de estos cauces en los abanicos de inundación, como ocurrió con los lahares que destruyeron la ciudad de Armero en Colombia, luego de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985 (Naranjo, et al., 1986; Thouret, J-C., 1990). El área afectada depende del volumen de agua y de materiales sueltos disponibles en el cauce de las quebradas o valles, así como de la pendiente y topografía del terreno. Normalmente destruyen todo a su paso (Tilling, 1993).

3. ASPECTOS GEOLÓGICOS

El análisis geológico del área de estudio, se elabora teniendo como base la geología de los cuadrángulos de Chuquibamba y Cotahuasi, hojas 32-q y 31-q elaborados a escala 1:100,000 por Olchauski & Dávila (1994) y la Evaluación de flujos de lahares en el CVNC (Valdivia, D., 2019).

3.1 Unidades litoestratigráficas

Las unidades litoestratigráficas que afloran son de origen sedimentario, como las formaciones Puente, Cachios y Labra (Grupo Yura); además, existen depósitos recientes tipo coluviales, aluviales, lahares y fluviales (Mapa 1 y Figura 2).

3.1.1 Formación Puente (Jm-pu)

Nombrada por Jenks W.F. (1948) Benavides D. (1962) y Caldas J. (1993), para describir paquetes de areniscas de color amarillentos que varían a tonos verduscos, interpuestos en capas delgadas de lutitas carbonosas oscuras. En el área de estudio aflora en el sector de Yato teniendo espesores de 300 a 600 m. Además, el macizo se encuentra deformado, muy fracturado y cubiertos por depósitos coluviales-deluviales. Los estratos tienen pendientes fuertes a muy fuertes (15° a 45°) susceptibles a la ocurrencia de peligros geológicos por movimientos en masa (caída de rocas o derrumbes).

3.1.2 Formación Cachios (Jm-ca).

Descrita por Jenks W.F. (1948), Benavides D. (1962) y Caldas J. (1993), está constituida por lutitas negras que intercalan con capas de areniscas y limolitas de tonalidades beige a blanquecinas. Esta unidad aflora al frente del santuario del señor de Yato. Las rocas se encuentran muy fracturadas, moderadamente meteorizadas; cubiertas por depósitos coluvial-deluvial.

3.1.3 Formación Labra (Jm-la).

Esta formación fue establecida por Jenks W.F. (1948), y descrita por Benavides D. (1962) y Caldas J. (1993), como una secuencia competente de areniscas cuarzosas gris claras, con variaciones a tonalidades rosadas, las areniscas en los niveles superiores están interestratificadas con paquetes de limolitas grises y en los niveles inferiores consisten de lutitas carbonosas. En el área de estudio aflora en el valle de Yato, estando cubierta depósitos de avalancha de escombros del CVNC, tienen un espesor 400 a 500 m de espesor. Esta formación se encuentra muy fracturada, deformada y moderadamente meteorizada.

3.1.4 Depósito aluviales (Qh-al).

Estos depósitos se encuentran en conos de deyección, quebradas y ríos. Son acumulaciones recientes, formadas por depósitos de bloques de tamaños métricos con un diámetro de máximo de 1.1 m de forma subredondeados a redondeados, gravas, arena y arcillas; estos depósitos presentan espesores de 50 a 70 cm. En el área de estudio se encuentran en el cauce del rio Yato formando terrazas.

3.1.5 Depósito de lahar (Qh-la).

Este depósito de flujo de lahar está asociado al CVNC, se encuentra en el sector de Escaura Chico y aflora a ambos lados del río Yato; emplazado sobre depósitos aluviales, con un espesor aproximado de 6 m, masivo, poco compacto, están compuestos por fragmentos de roca (50 %) bloques de hasta 60 cm de diámetro, además de gravas y bolones de tamaños que varían de 5 a 30 c m, englobados en una matriz arcillo-limosa (50 %), de color pardo, la forma de los fragmentos de roca son angulosas a

subangulosas, en su mayoría los bloques son de composición andesítica de textura porfirítica y algunos bloques de areniscas (Valdivia, 2019).

3.1.6 Depósito coluvio-deluviales (Qh-cd).

Los depósitos coluviales se acumulan en vertientes o márgenes de los valles, como también en laderas superiores; en muchos casos son resultado de una mezcla de ambos. Debido a su naturaleza son susceptibles a la erosión pluvial, remoción y generación de flujos de detritos (huaicos), y cuando son el resultado de antiguos movimientos en masa son susceptibles a reactivaciones detonadas por precipitaciones pluviales o al realizar modificaciones en sus taludes naturales. Estos depósitos se están compuestos por fragmentos de roca de composición sedimentaria, con bloques de tamaño máximo de 70 cm (3%), bolones (30%), gravas (25%), con formas angulosas a subangulosas, englobadas en una matriz limo-arenosa (42%).

3.1.7 Depósitos fluviales (Qh-fl)

El depósito fluvial inconsolidado, se ubica a lo largo del río Yato, litológicamente está conformada de clastos polimícticos redondeados, alargados y sobre todo imbricados en una matriz de arenosa.

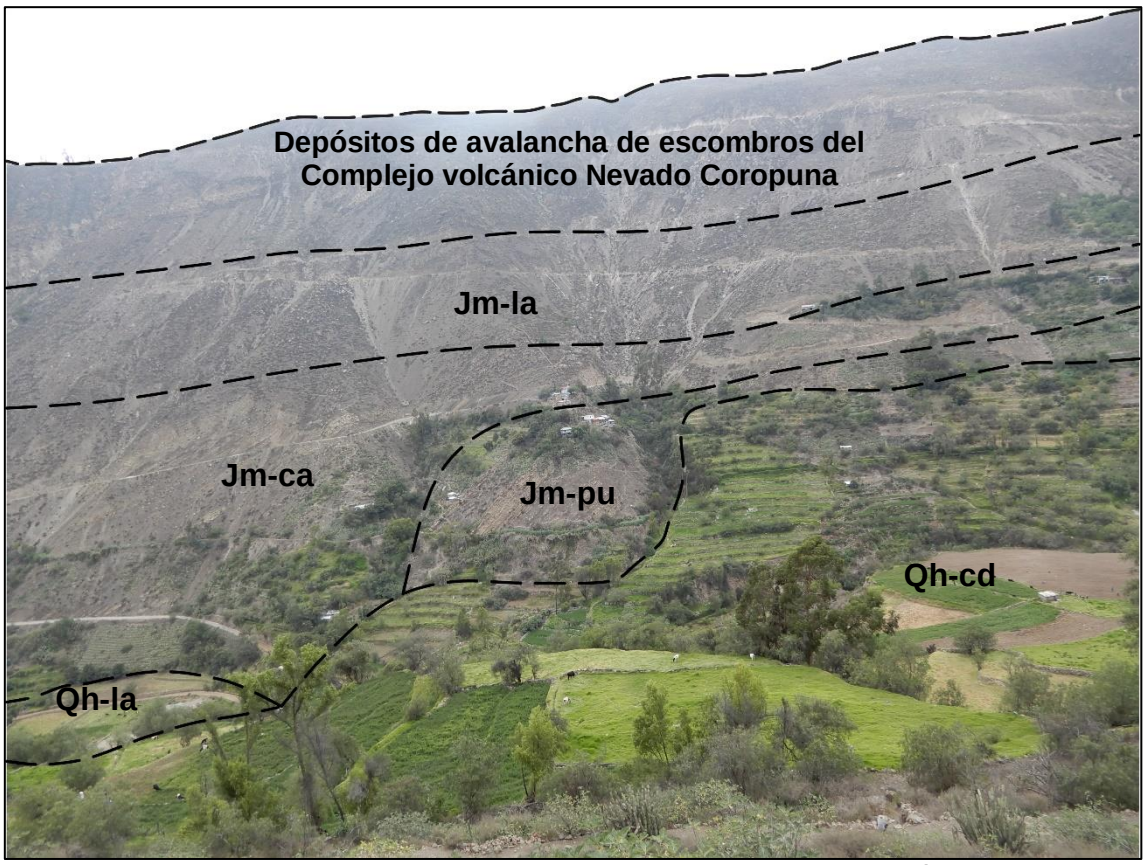


Figura 2. Afloramientos de las formaciones del Grupo Yura, depósitos coluviodeluviales y de lahar en el sector de Yato.

4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

4.1 Pendientes del terreno

Las pendientes de los terrenos varían desde llano a inclinado suavemente (1°-5°) en

las terrazas, mientras en el cuerpo del deslizamiento varían de fuertes a muy fuertes (15°-45°), además presenta sectores con pendientes abrupta (> 45°) en las quebradas. Se elaboró un mapa de pendientes con base al modelo de elevación digital (DEM) de 3 m, a partir de imágenes satelitales Pléiades, realizado por el laboratorio de teledetección del INGEMMET en el 2016. (Mapa 3).

4.2 Unidades geomorfológicas

Para la clasificación y caracterización de las unidades geomorfológicas en el sector, se ha empleado la propuesta de Villota (2005) y la clasificación de unidades geomorfológicas utilizadas en los estudios del Ingemmet; cuyas concepciones se basan en considerar el efecto de los procesos morfodinámicos siguientes:

- Degradacionales o denudativos
- Agradacionales o deposicionales

El área de estudio se encuentra por encima de los 2800 m s.n.m. con vertientes montañosas, elevadas y abruptas, asociadas a la incisión del río Yato que desciende desde el CVNC.

Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial (V-cd), terrazas fluviales (T-fl), vertiente o pie de monte (V-cd) y montañas en roca sedimentaria (RME-rs). En Yato, las subunidades con mayor susceptibilidad a genera movimientos en masa son: Vertiente o piedemonte coluvio y montaña estructuran en roca sedimentaria (RME-rs) (Mapa 3 y Figura 3).

4.2.1 Geoformas de carácter tectónico degradacional y denudacional

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 totalde estos a través del tiempo geológico y bajo condiciones climáticas cambiantes, Villota, (2005). Así en el área evaluada se tienen las siguientes unidades:

4.2.1.1 Unidad de Montaña

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

Sub Unidad de ladera de montaña en roca sedimentaria (RM-rs): En el área de estudio se identificó la unidad morfológica de montaña desarrollada en rocas sedimentarias. Litológicamente corresponde a rocas sedimentarias representadas por areniscas y lutitas. El patrón de drenaje subparalelo, típico de estas unidades, con escarpas en forma de V, muestra en sus laderas pendientes que varían entre 25° a 45°. Dentro de esta unidad geomorfológica las elevaciones existentes son parte de la cordillera, levantadas por la actividad tectónica y modeladas por procesos exógenos degradacionales determinados por la lluvia-escorrentía. Las estructuras tectónicas en

el área de estudio tienen el dominio del alineamiento de las estructuras andinas (NO-SE). En esta unidad se asocia la ocurrencia de movimientos en masa de tipo deslizamientos, flujos y derrumbes. Además de procesos de erosión de ladera en cárcavas.

4.2.2 Geoformas de carácter tectónico deposicional y agradacional

Están representadas por las formas de terreno resultados de la acumulación de materiales provenientes de los procesos denudativos y erosiónales que afectan las geoformas anteriores; se tienen las siguientes unidades y subunidades:

4.2.2.1 Unidad de Piedemonte

Ambiente de agradación que constituye una transición entre los relieves montañosos, accidentados y las áreas bajas circundantes; en este ambiente predominan los depósitos continentales coluviales y las acumulaciones forzadas, las cuales están relacionadas con el repentino cambio de los perfiles longitudinales. Las unidades de piedemonte identificadas son las siguientes:

Sub Unidad de Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial (V-cd): Acumulación de laderas formadas intercaladas de materiales de origen coluvial y deluvial; se encuentran interestratificados y no es posible separarlos como unidades individuales. Estos se encuentran acumulados al pie de las laderas en el sector de Yato, están compuestos por rocas sedimentarias (areniscas y lutitas), englobados en una matriz limo-arenosa. (Figura 3).

4.2.2.2 Unidad de planicies

Terraza aluvial y lahares (T-al): Subunidad geomorfológica caracterizada por presentar relieve plano con escasos sectores ondulados, constituida por acumulación de material aluvial y de lahar sin consolidación (Figura 3), sus pendientes corresponden a inclinación moderada (5°-15°), presenta un ancho de aproximadamente 150 m y un largo de 6 km llegando hasta la localidad de Paracolca (D. Valdivia, 2019).

Terraza fluvial (T-fl): Son terrenos con pendientes bajas a subhorizontales (5° a 10°), se encuentran en el cauce del río Yato, dispuestos en la llanura de inundación. Representan niveles recientes inconsolidados de material fluvial, con procesos erosivos como consecuencia de la profundización del río. Está conformada de clastos polimícticos de formas redondeados, alargados y sobre todo imbricados en una matriz de arenosa.

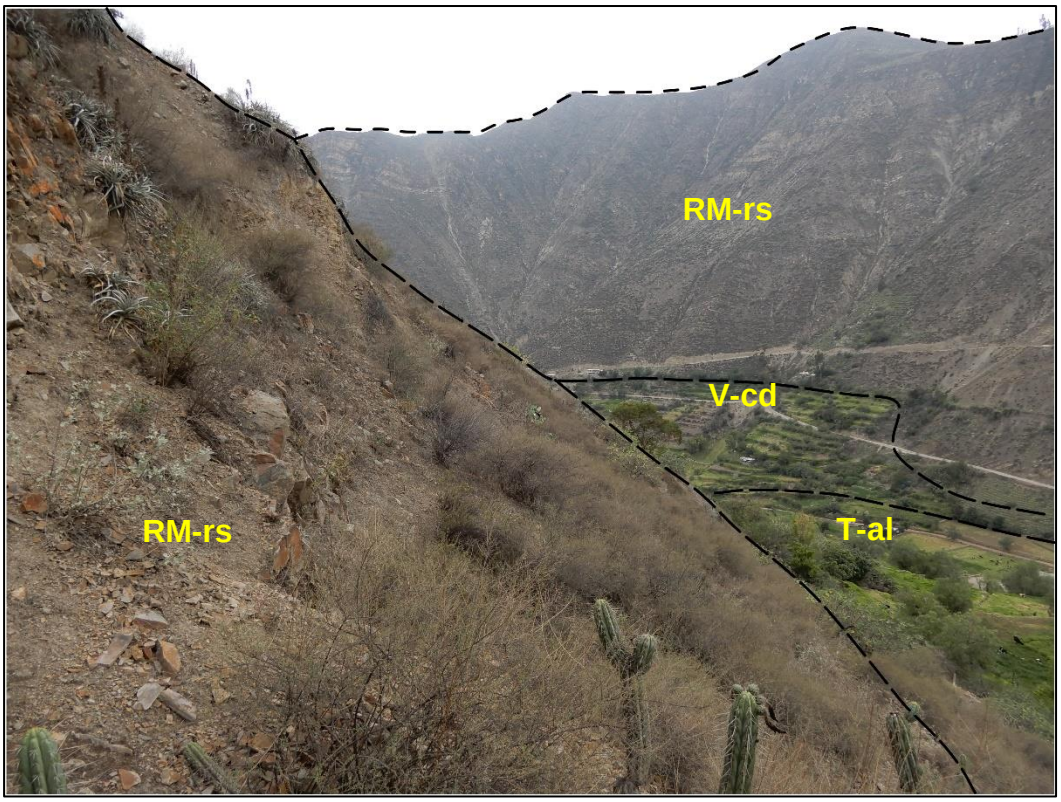


Figura 3. Unidades geomorfológicas en el sector de Yato.
RM-rs: relieve montañoso en roca sedimentaria.
V-cd: Vertiente coluviodeluvial.
T-al: Terraza aluvial alta.

5. PELIGROS GEOLÓGICOS

Los peligros geológicos reconocidos en el sector de Yato corresponden a movimientos en masa, tipo deslizamientos, caídas (derrumbes) y flujo (flujo de detritos y /o lahares). Estos procesos son resultado del modelamiento del terreno, así como la incisión sufrida en los cursos de agua en la Cordillera de los Andes, que conllevó a la generación de diversos movimientos en masa, que modificaron la topografía de los terrenos y movilizaron cantidades variables de materiales desde las laderas hacia el curso de los ríos. Estos movimientos en masa tienen como causas o condicionantes factores intrínsecos, como la geometría y pendiente del terreno, tipo de roca, tipo de suelo, el drenaje superficial–subterráneo y la cobertura vegetal. Se tiene como "detonantes" de estos eventos las precipitaciones pluviales periódicas, extraordinarias que caen en la zona y la actividad sísmica. (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).

5.1 Peligros geológicos por movimientos en masa

La zona de estudio y alrededores son susceptibles a la ocurrencia de peligros geológicos tipo deslizamientos, derrumbes y flujos, condicionado por las características morfológicas, litológicas y pendiente, se han identificado y caracterizado los siguientes peligros geológicos:

5.1.1 Deslizamiento Antiguo Inferido (DAI)

En el cerro Carhuani, se evidencia una depresión con forma irregular que corresponde a un deslizamiento antiguo inferido (**DAI**), donde la corona y el salto de escarpe, no se observan claramente debido a los procesos de erosión y meteorización que afectó el lugar. La masa deslizada, va hacia el suroeste con dirección hasta el cauce del río Yato, presenta ondulaciones o desniveles en el cuerpo del deslizamiento (Figura 4, Mapa 4).

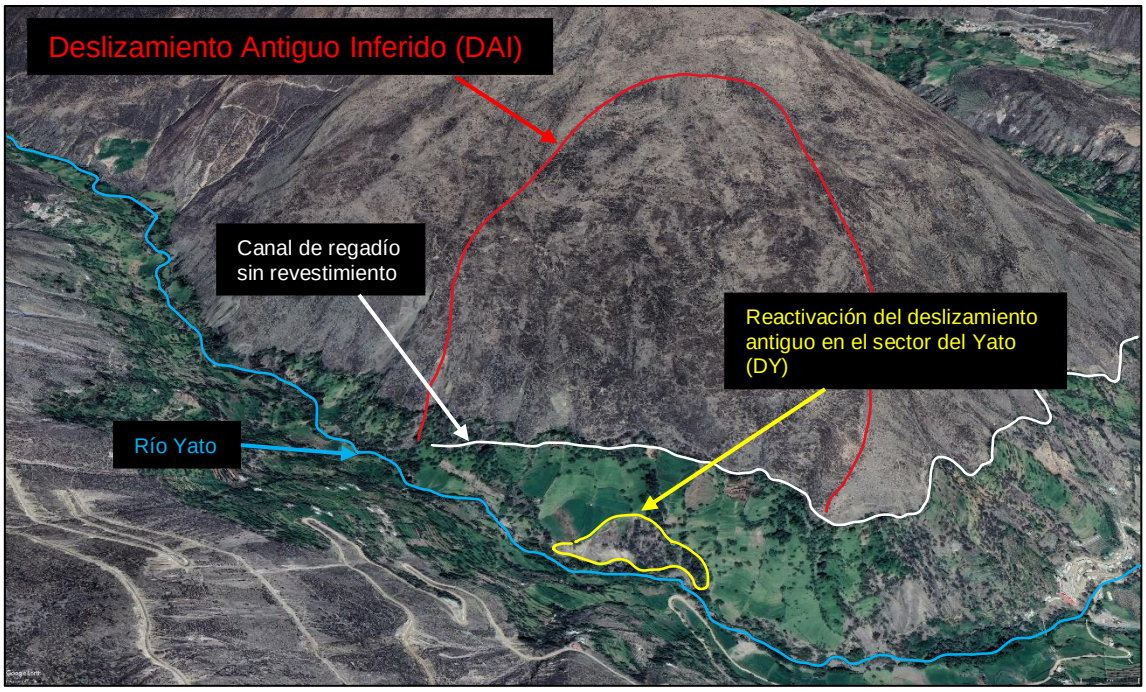


Figura 4. Deslizamiento antiguo Inferido (**DAI**) y deslizamiento en el sector de Yato (**DY**) (coordenadas UTM E: 764529, N: 8261104)

5.1.2 Reactivación del deslizamiento antiguo en el sector de Yato (DY)

En el sector de Yato, se evidencia una depresión con forma irregular que corresponde a la reactivación del deslizamiento antiguo en el sector de Yato (**DY),** el cual se reactivó producto del socavamiento fluvial ocasionado por un aluvión en el 2016 (Figuras 5 y 6), afectando aproximadamente 0.33 ha de cultivo. La corona del deslizamiento tiene una longitud aproximada de 150 m y el salto de escarpe de 35 m, definida entre las cotas 2293 m y 2257 m (Figura 7, Mapa 5), este evento se desarrolló sobre depósitos de antiguos movimientos en masa (depósitos coluvio-deluvial) en dirección suroeste.

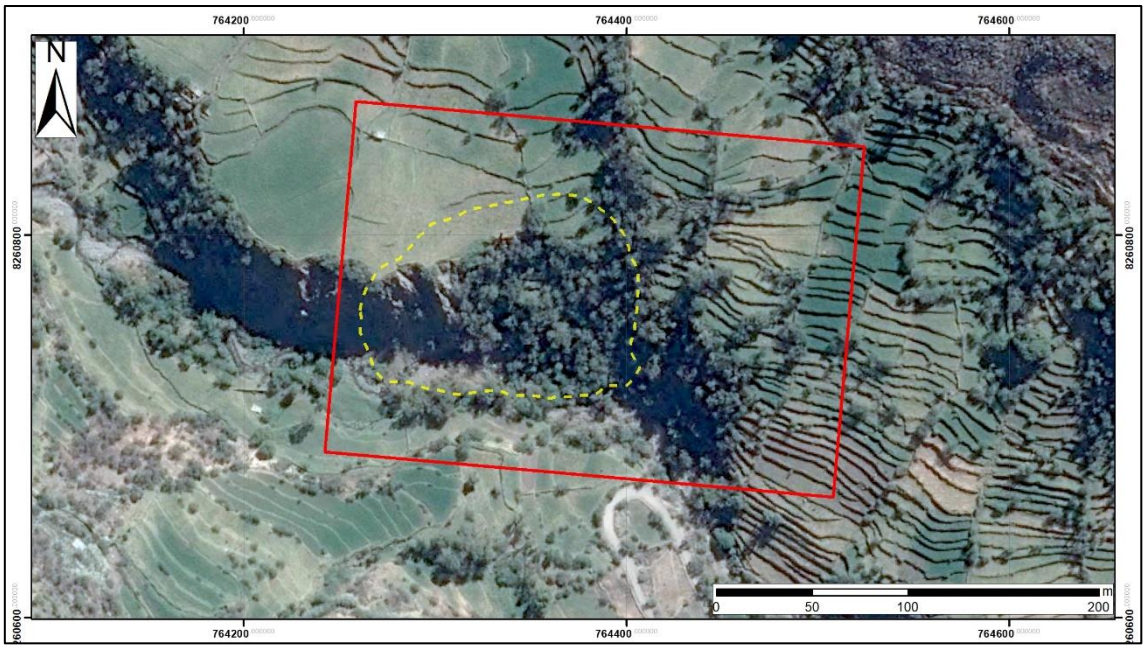


Figura 5. Imagen Google Earth del año 2013, no se observa la reactivación deslizamiento en el sector de Yato.

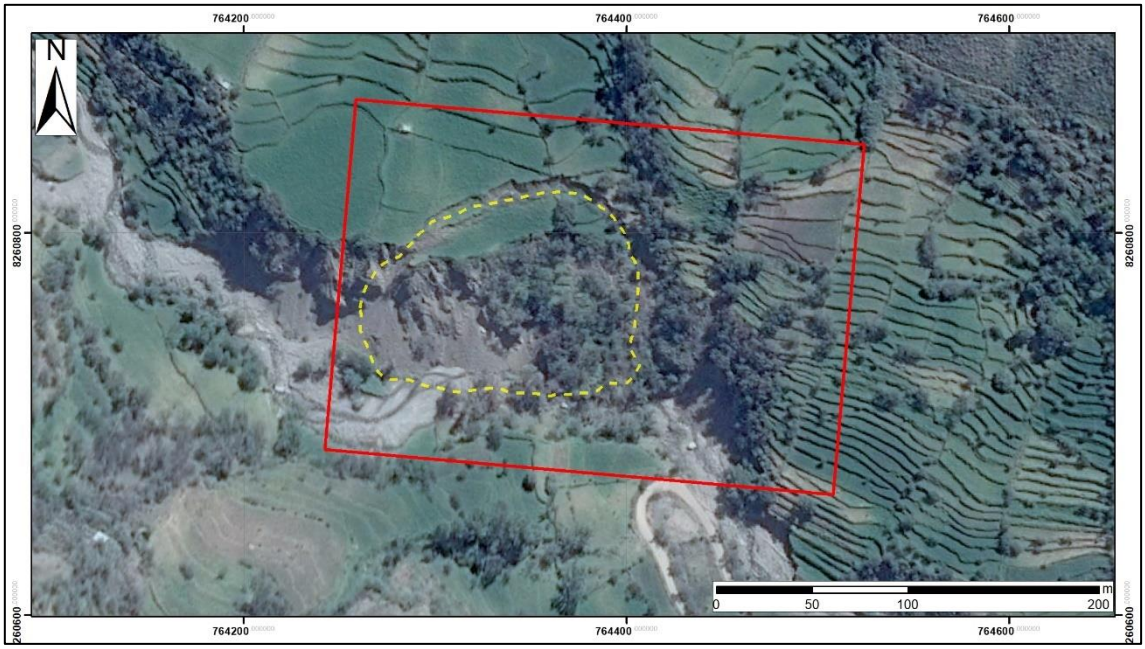


Figura 6. Imagen Google Earth del año 2016, se observa la reactivación del Deslizamiento Antiguo en el sector de Yato debido al socavamiento fluvial.

La masa deslizada o removida, llega hasta el cauce del río Yato, sin represarlo, sin embargo, en el pie del deslizamiento se observa pequeños derrumbes a causa de la erosión fluvial (río Yato).,

Figura 7. Reactivación del deslizamiento antiguo en el sector Yato. (coordenadas UTM E: 775456, N: 8258978)

La masa deslizada, está conformado por bloques angulosos y erráticos con diámetros hasta 70 cm de bloques, gravas englobadas en una matriz limo-arenosa. (Figura 8).

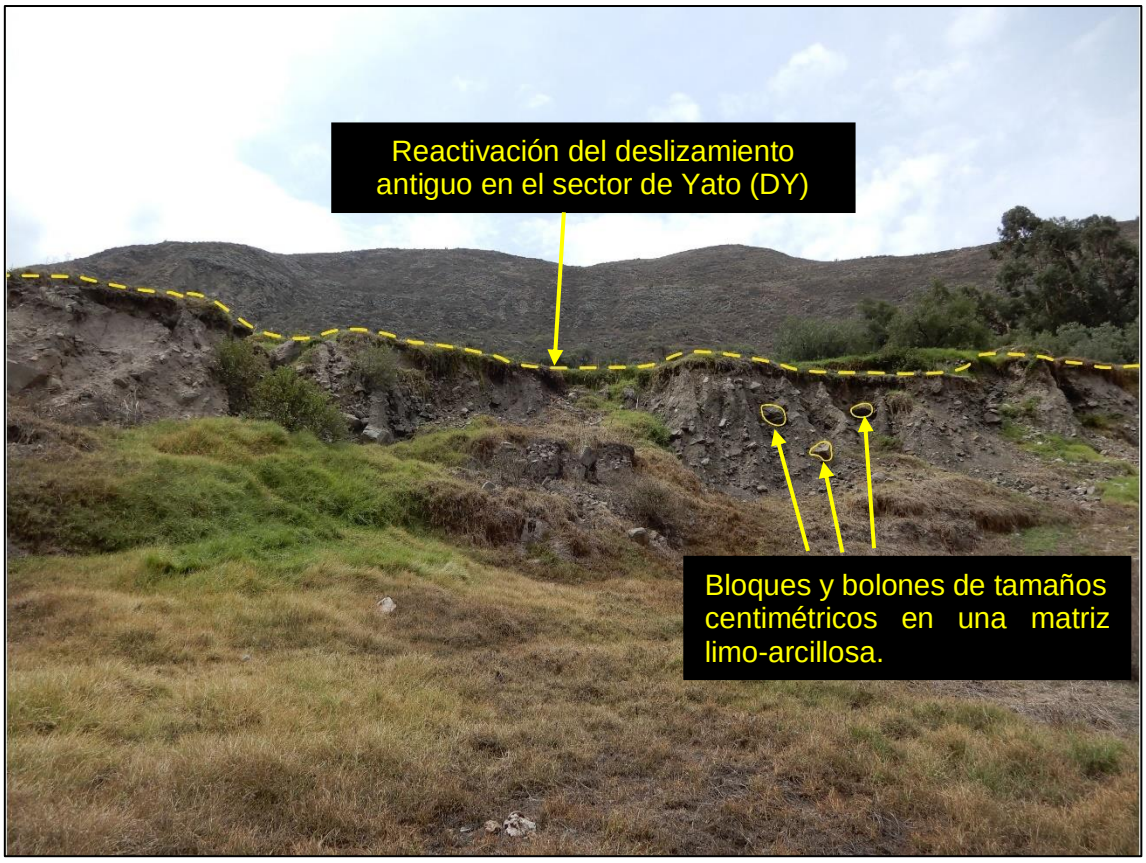


Figura 8. Depósitos del deslizamiento en el sector de Yato (DY). (coordenadas UTM E: 774878, N: 8258511)

Los componentes encontrados en el cuerpo del deslizamiento, corresponden a fragmentos de rocas de areniscas cuarzosas de color beige y lutitas negras, se encuentran altamente meteorizadas y muy fracturadas, que afloran en la parte alta y media de las laderas del sector, a manera de suelo no consolidado, poco compactado, fácil de removilizarse si son saturados de agua; los mismos que podrían generar nuevos deslizamientos.

Cabe resaltar que en el sector de Yato, en la parte alta de la reactivación del deslizamiento antiguo existe un canal de agua sin revestimiento (Figura 9); de caudal considerable, que vierte sus aguas infiltrando y saturando los terrenos agrícolas generando que el terreno pierda sus propiedades cohesivas; siendo una de las causas de la reactivación del deslizamiento.

Figura 9. Canal de regadío sin revestimiento encima del deslizamiento en el sector de Yato. (coordenadas UTM E: 774878, N: 8258511)

En los puntos: N: 8260789, E: 764438; N: 8260809, E: 764423; N: 8260835, E: 764401; N: 8260837, E: 764386; se evidencian agrietamientos con longitud de 7 a 9 m, con separaciones hasta de 30 cm (Figura 10). Estos se desarrollan sobre el cuerpo del deslizamiento y podrían generar nuevos deslizamientos secundarios.

Figura 10. Agrietamientos sobre el cuerpo del deslizamiento reciente (DY). (coordenadas UTM E: 774878, N: 8258511)

5.1.3 Zona de Derrumbes

Estos eventos se presentan a lo largo del río Yato, se desarrollan sobre depósitos coluviales no consolidados adosados a las laderas y removidos por la erosión fluvial (Figura 11). La ocurrencia de derrumbes podría generar un embalse temporal del río, esto podría generar que, el agua embalsada sature las paredes de las márgenes que contiene depósitos no consolidados, lo que traería una pérdida de cohesión de estos materiales, lo que generaría nuevos derrumbes.

Figura 11. Zona de derrumbes en la parte baja del sector Yato. (coordenadas UTM E: 774909, N: 8258363).

5.1.3 Lahares

El 20 de diciembre del 2016, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) localmente en el sector Nevados, aguas arriba del río Yato, se identificaron depósitos de aluviones (lahares) recientes, los cuales se habrían producido por el desprendimiento de un bloque de hielo ubicado en la vertiente sur del CVNC (Concha y Vásquez, 2017). También en el sector de Yato se ha encontrado un depósito de lahar antiguo proveniente del CVNC, tiene un espesor de casi 6 m (Figura 12 y 13), está constituido por bloques (5 %) con un diámetro máximo de 60 cm, bolones (10%), gravas (35%), de composición heterogénea (rocas volcánicas y sedimentarias), de forma angulosa a subangulosa, de englobados en matriz arcillo-limosa (50%), formando terrazas susceptibles a la erosión fluvial e inundaciones.

Figura 12. Columna estratigráfica en Escaura Chico (Tomado de Valdivia, D., 2019).

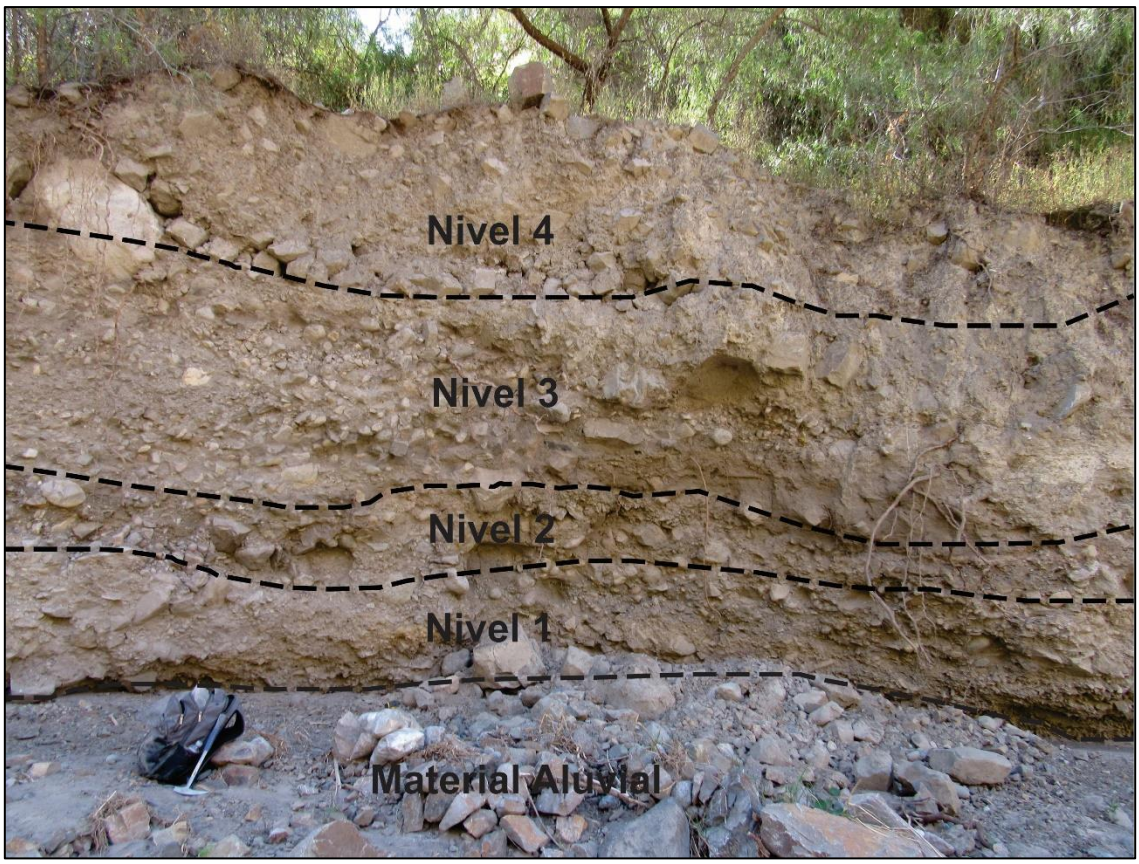


Figura 13. Depósito de lahar en Escaura Chico (Tomado de Valdivia, D., 2019).

5.1.4 Simulación de flujos de lahares en el río Yato

Adicionalmente, en el presente informe se presentan escenarios de flujos de lahares para la zona evaluada, para lo cual se utiliza topográfica de data obtenida de un modelo de elevación de 3 m de resolución elaborado por el Laboratorio de Teledetección del INGEMMET y el método de simulación numérica del código Lahar

Z (Iverson et., al., 1998). Se determinó un escenario por flujos de lahares poco voluminosos causados por la desglaciación del CVNC o por precipitaciones intensas, tomando en cuenta el volumen calculado por Valdivia, 2019 de 1.5 Mm^3 (Figura 14).

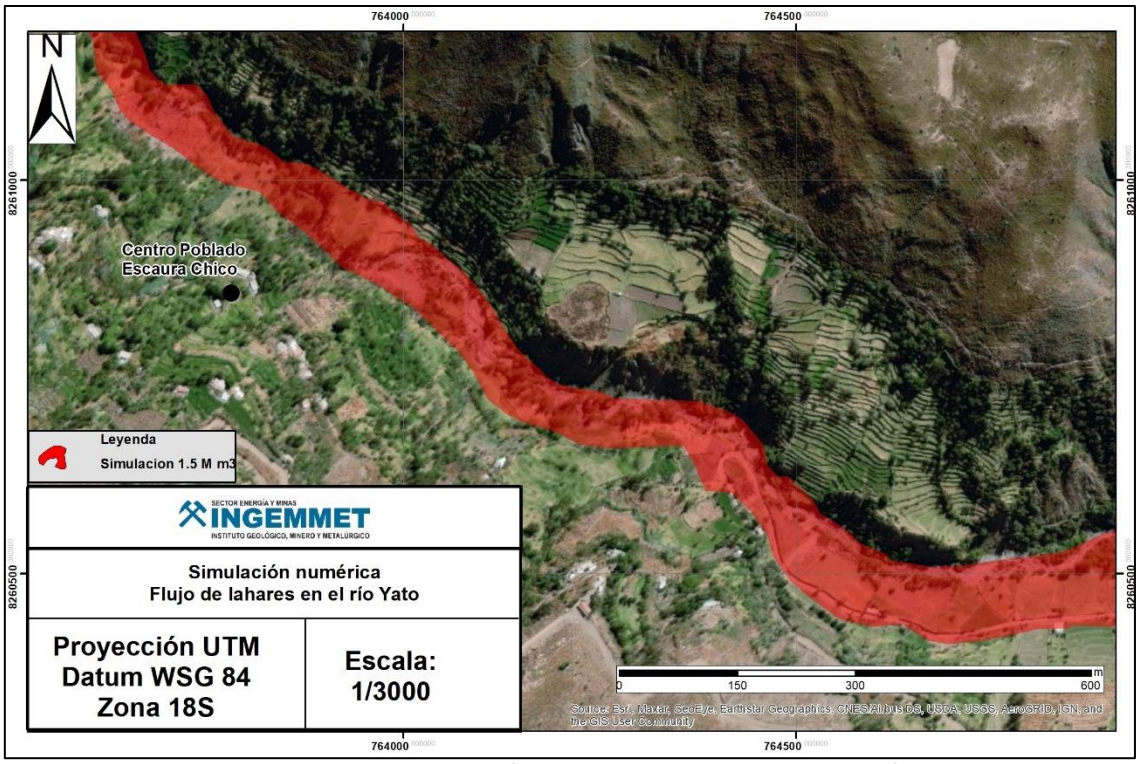


Figura 14. Mapa de Simulación de flujos de lahares en el río Yato.

La simulación de flujos de 1.5 Mm^3 de volumen provenientes del CVNC en el río Yato, muestran que las zonas afectadas serian: a) Zonas de cultivo aledañas al río Yato, b) Tramo de carretera Tipan – Pampacolca. (Figura 14)

5.2 Factores condicionantes

Factor litológico-estructural

Presencia de afloramientos de por areniscas cuarzosas moderadamente meteorizadas y medianamente fracturadas; y lutitas negras altamente meteorizadas y muy fracturadas; han generado depósitos de deslizamientos antiguos conformados por bloques (3%), bolones (30%), gravas (25%), englobados en una matriz limo-arenosa (42%), son poco compactos, además, permiten la infiltración y saturación de agua, de esta manera los terrenos susceptibles a los movimientos en masa.

Factor geomorfológico

La pendiente de los terrenos en el sector Yato, el cual varía desde llano a inclinado suavemente (1°-5°) en las terrazas, mientras en el cuerpo del deslizamiento antiguo presenta pendientes de fuerte a muy fuerte (15°-45°), también en algunos sectores las quebradas las pendientes son abruptas (>45°).

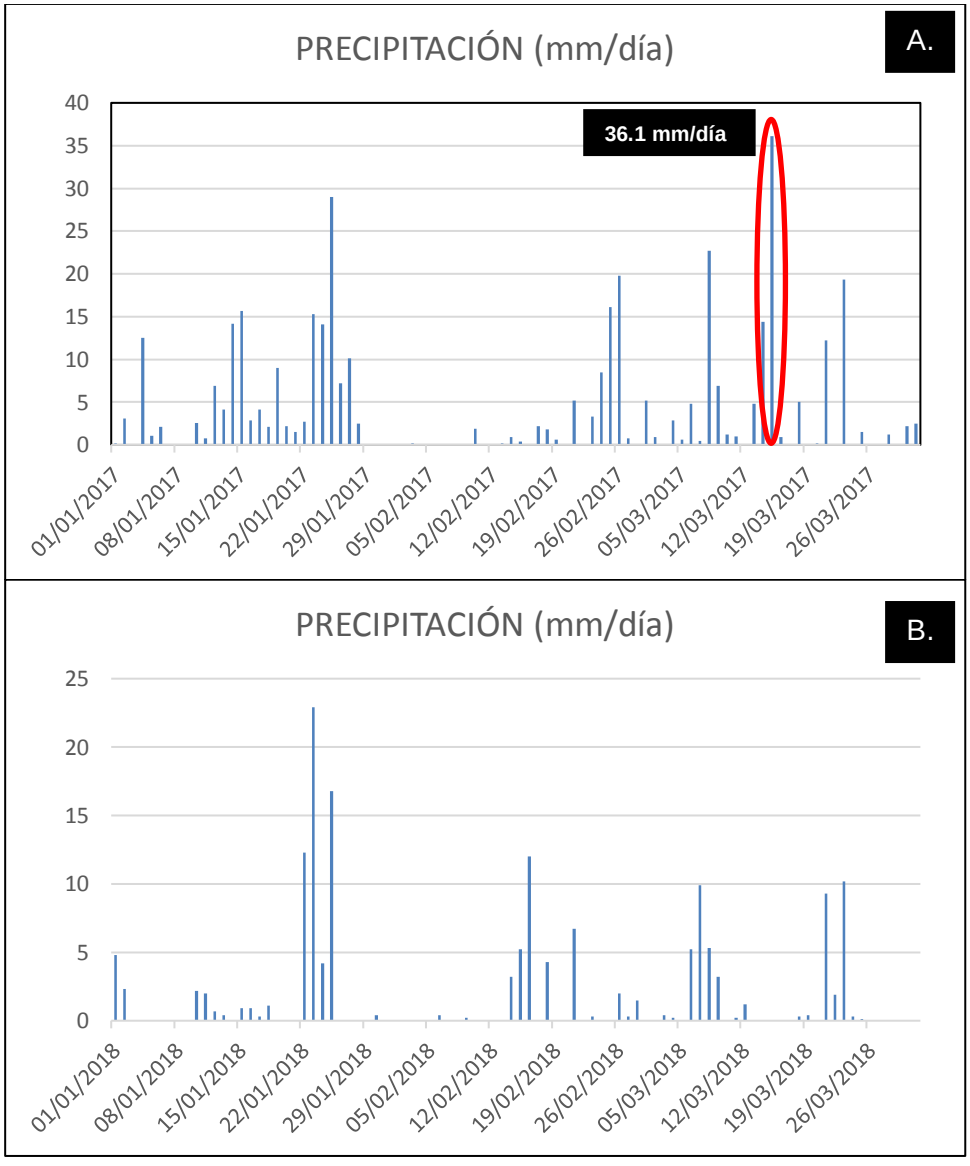
Factor antrópico

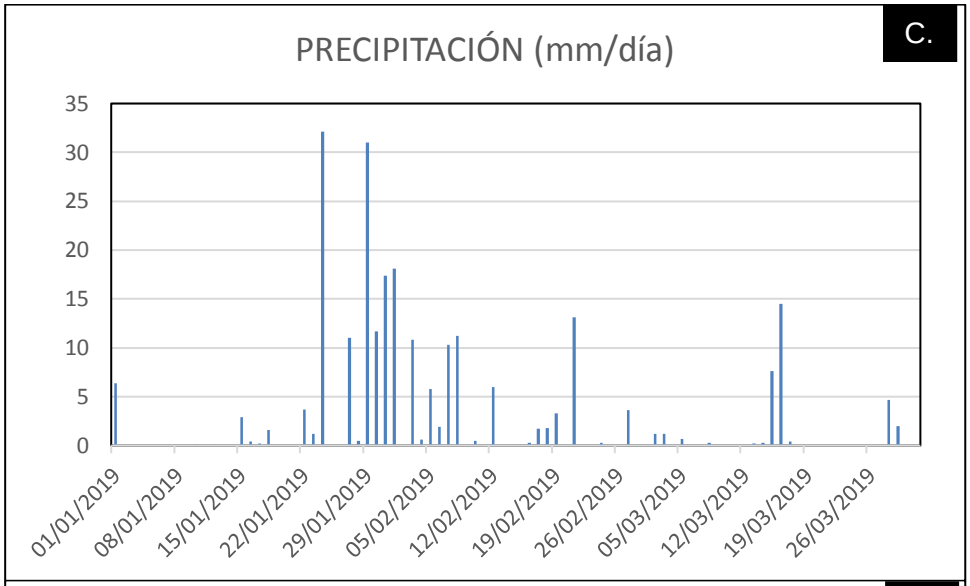
Presencia de canal de regadío ubicado en la parte alta de la reactivación del

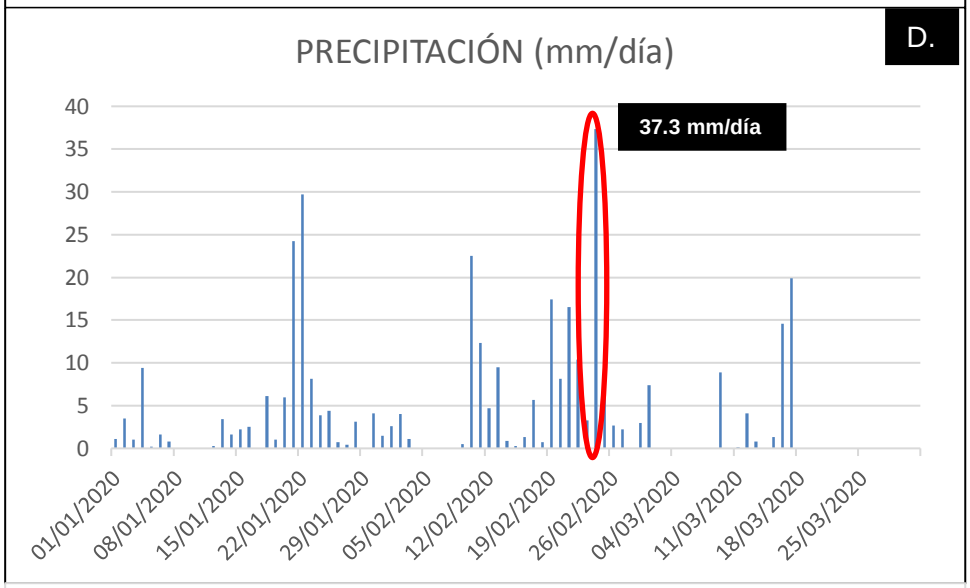
deslizamiento antiguo en el sector de Yato, sin revestimiento y con filtraciones de agua, que saturan los terrenos.

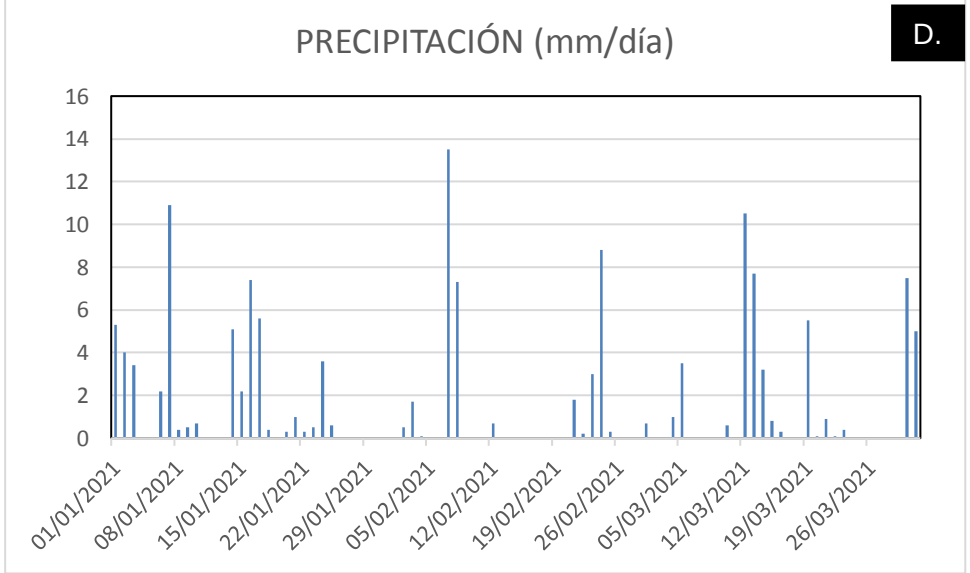
5.3 Factores desencadenantes

- Lluvias intensas, prolongadas o extraordinarias generadas en el periodo de diciembre a abril de los años 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022; para el 24 de febrero del 2020 determinan como valor medio de precipitación máxima de 37.3 mm/día, y el 15 de marzo del 2017 fue de 36.1 mm/día (Figura 19). Estas lluvias saturaron los terrenos, generando un aumento del peso del material susceptible a movilizarse.




C.
PRECIPITACIÓN (mm/día)
35
30
25
20
15
10
5
0
01/01/2019
08/01/2019
15/01/2019
22/01/2019
29/01/2019
05/02/2019
12/02/2019
19/02/2019
26/02/2019
05/03/2019
12/03/2019
19/03/2019
26/03/2019


D.
PRECIPITACIÓN (mm/día)
37.3 mm/día
40
35
30
25
20
15
10
5
0
01/01/2020
08/01/2020
15/01/2020
22/01/2020
29/01/2020
05/02/2020
12/02/2020
19/02/2020
26/02/2020
04/03/2020
11/03/2020
18/03/2020
25/03/2020


D.
PRECIPITACIÓN (mm/día)
16
14
12
10
8
6
4
2
0
01/01/2021
08/01/2021
15/01/2021
22/01/2021
29/01/2021
05/02/2021
12/02/2021
19/02/2021
26/02/2021
05/03/2021
12/03/2021
19/03/2021
26/03/2021

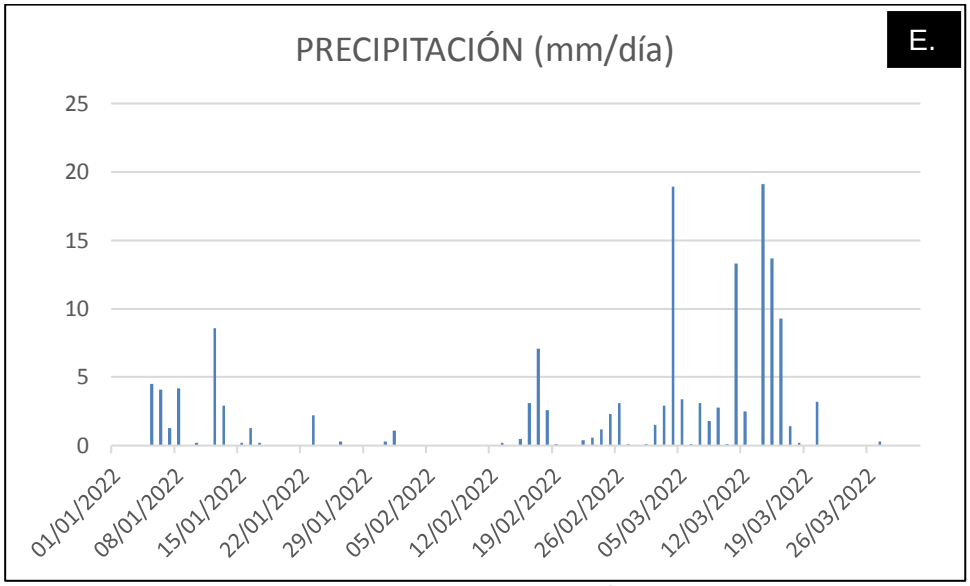


Figura 15. Registro de precipitaciones de estación **Pampacolca,** en el distrito de Pampacolca, durante los años 2017(A), 2018(B) y 2019(C), 2020(D) y 2021(E)(SENAMHI).

- Efectos de cambio climático de desglaciación del casquete glaciar del CVNC, ocasionando la caída de bloques de hielo que pueden generar flujos de detritos (lahares), similares a los ocasionados en el año 2016.

- Los movimientos sísmicos pueden generar desprendimientos de rocas desde las partes altas, así como también bloques de hielo del glaciar de CVNC. Según Alva et al. (1984) el departamento de Arequipa se ubica en las zonas de sismicidad alta a muy alta (Figura 16). El sector de Yato se encuentra en la zona de sismicidad alta donde podrían generarse sismos de gran magnitud.

Figura 16. Zonificación Sísmica del Perú. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016).

6 CONCLUSIONES

1. La meteorización de areniscas cuarzosas de las formaciones Puente y Labra; así como las lutitas negras de la Formación Cachios; presencia de depósitos aluviales, depósitos de lahar, coluviales y fluviales han generado suelos conformados, por arenas y limos, poco compactados. Son depósitos conformado por material que permite la infiltración y retención del agua, de esta manera los terrenos se saturan fácilmente.

2. Los peligros geológicos por movimientos en masa identificados en el área evaluada comprenden a deslizamientos, derrumbes y flujo de detritos (lahar); causados por la erosión fluvial, que genera el río Yato.

3. La pendiente de los terrenos en el sector Yato, varía desde llano a inclinado (1°-5°) en las terrazas, mientras en el cuerpo del deslizamiento antiguo presenta pendientes de fuerte a muy fuerte (15°-45°), también en algunos sectores las quebradas las pendientes son abruptas (>45°).

4. Se identificó la reactivación del deslizamiento antiguo en el sector de Yato (DY), cuya corona tiene una longitud de 150 m y desnivel de 45 m, una de las causas de esta reactivación es la filtración de agua producido por el canal sin revestimiento en la parte de arriba de este y el sistema de riego por inundación. Esta reactivación que viene afectando 0.33 ha de terrenos de cultivo, además podría afectar la bocatoma de captación de agua y canales de regadío.

5. Se identificó un lahar antiguo originado en el CVNC, que descendió por la quebrada del río Yato y emplazándose en el cauce del sector Escaura Chico hasta alcanzar la localidad de Paracolca, formando terrazas, usadas actualmente para la agricultura.

6. Se realizó la simulación de un lahar, que podría descender del Complejo volcánico Nevado Coropuna, tomando como volumen de 1.5 Mm^3, similar como el sucedido el año 2016; el evento simulado afectaría áreas agrícolas aledañas al río Yato y el tramo de la vía Tipan - Pampacolca.

7. Se concluye que, el sector Yato, es de **Peligro Muy Alto**, puede ser afectado nuevas reactivaciones del deslizamiento antiguo; también por lahares, que pueden ocurrir en la temporada de lluvias y por la caída de bloques de hielo producto de la desglaciación del CVNC.

7 RECOMENDACIONES

1. Para controlar la erosión y socavamiento del río en Yato; se deben construir muros de protección ribereña, para ello se tienen que realizar estudios detallados (diseño de muros de protección ribereña). También se debe realizar la limpieza y descolmatación periódica del cauce del río Yato.

2. Evitar la utilización de las terrazas de origen aluvial y lahar, como terrenos de cultivo y para la construcción viviendas (cerca al borde del río Yato); además, evitar el arrojo de basura y desperdicios en el río en mención, porque de darse un nuevo lahar, este material contribuye a incrementar el volumen del flujo.

3. En las zonas definidas y delimitadas como susceptibles a la ocurrencia de peligros por movimiento en masa, clasificadas como zonas de **Peligro Muy Alto** por ocurrencia de procesos de remoción en masa, restringir y/o prohibir la construcción de infraestructuras o viviendas; lo cual la autoridad local de acuerdo a sus competencias debe emitir una ordenanza municipal para dicho fin.

4. Construir un drenaje pluvial, para evitar infiltraciones al subsuelo. Además, canal de agua, que se encuentra encima de del sector reactivado del deslizamiento antiguo, debe ser revestido o entubado.

5. Promoverse la migración a nuevas técnicas de regadío, evitando las prácticas de riego por inundación. Es decir, cambiar el tipo de cultivo, que no necesite mucha agua.

6. Sensibilizar a la población 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 riesgo.

7. Implementar un sistema de alerta temprana ante lahares (huaicos) provenientes del CVNC.

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

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

BIBLIOGRAFÍA

Benavides, V. (1962). Estratigrafía Pre-terciaria de la región de Arequipa. Boletín Sociedad Geológica del Perú, 5-63.

Bromley, G., Thouret, J-C., Schimmelpfening I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker K., Lopez, S., Aumaitre, G., Bourles, D., Keddadouche, K., 2019. In situ cosmogenic ^{3}He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. Bulletin of Volcanology. 16p.

Caldas, J. (1993). Geología de los cuadrángulos de Huambo y Orcopampa 32- r, 31-r. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Perú. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n° 46, 78 p.

Concha, R., Vazquez, P. (2017). Peligros Geológicos Asociados a la Dinámica del Río Llacllajo, distrito Tipan, provincia Castilla, región Arequipa. Informe Técnico; N° A6742 – INGEMMET. 28p.

Corominas, J. & García Yagüe A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. I V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. 3,1051-1072

Cruden, D. M., Varnes, D.J., (1996). Landslides types and processes, en Turner, K., y Schuster, R.L., ed., Landslide's investigation and mitigation: Washintong D. C, National Academy Press, Transportatión researchs board Special Report 247, p. 36-75.

Iverson, R. M., Schilling, S. P., & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of laha inundation hazard zones. GSA Bulletin 100, 972-984.

Jenks, W. (1948). Geologia de la hoja de Arequipa. Instituto Geológico del Perú. Boletin n°9, Lima.

Naranjo, J., Sigurdssons, H., Carey N., Fritz, W. (1986). Eruption of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, On 13 November 1985: Tephra Fall and Lahars. SCIENCE. pp. 961-963

Olchauski, E., & Dávila, D. (1994). Geología de los cuadrángulos de Chuquibamba y Cotahuasi 32-q, 31-q. Instituto Geológico, Mineros y Metalúrgico, Perú.Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n° 50, 52p.

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.

Thouret, J-C. (1990). Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Pages 177-201.

Tilling, R.I., ed. (1993) - Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos, Santa Fé, Nuevo México, 2-3 julio 1989. [s.l.]: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 125 p.

Varnes, D. J. (1978). Slope movements types and processes, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ad, Landslides analisys and control: Washintong D. C, National Academy Press, Transportatión researchs board Special Report 176, p. 9-33

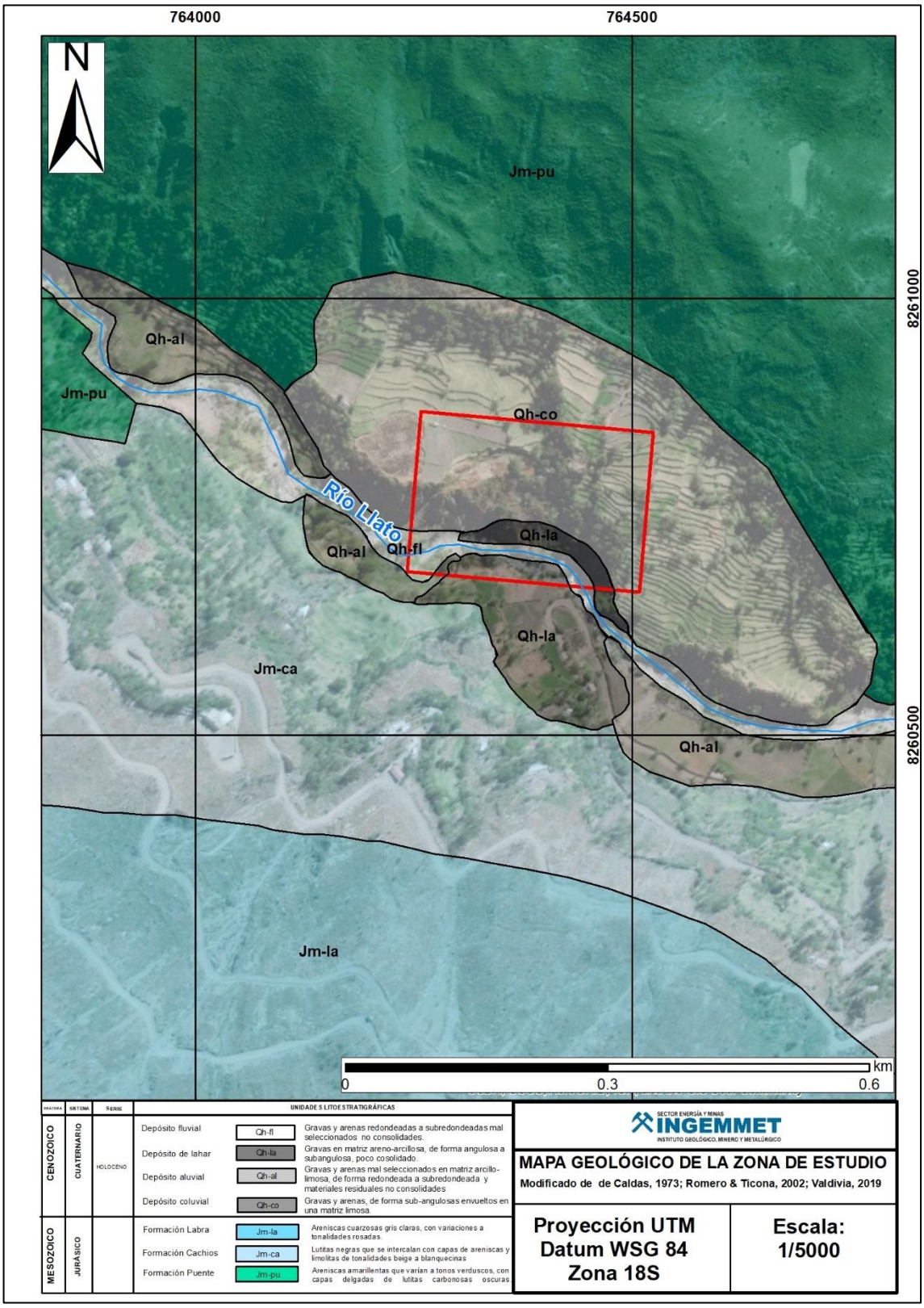
Vílchez, M.; Sosa, N.; Pari, W. & Peña, F. (2020) - Peligro geológico en la región Cusco. INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingenieria Geológica, 74, 155 p.

Valdivia, D. (2019). Evaluación de peligros volcánicos por flujos de Lahares del Complejo Volcánico Nevado Coropuna. Universidad Nacional de san Agustin – Arequipa, 105p.

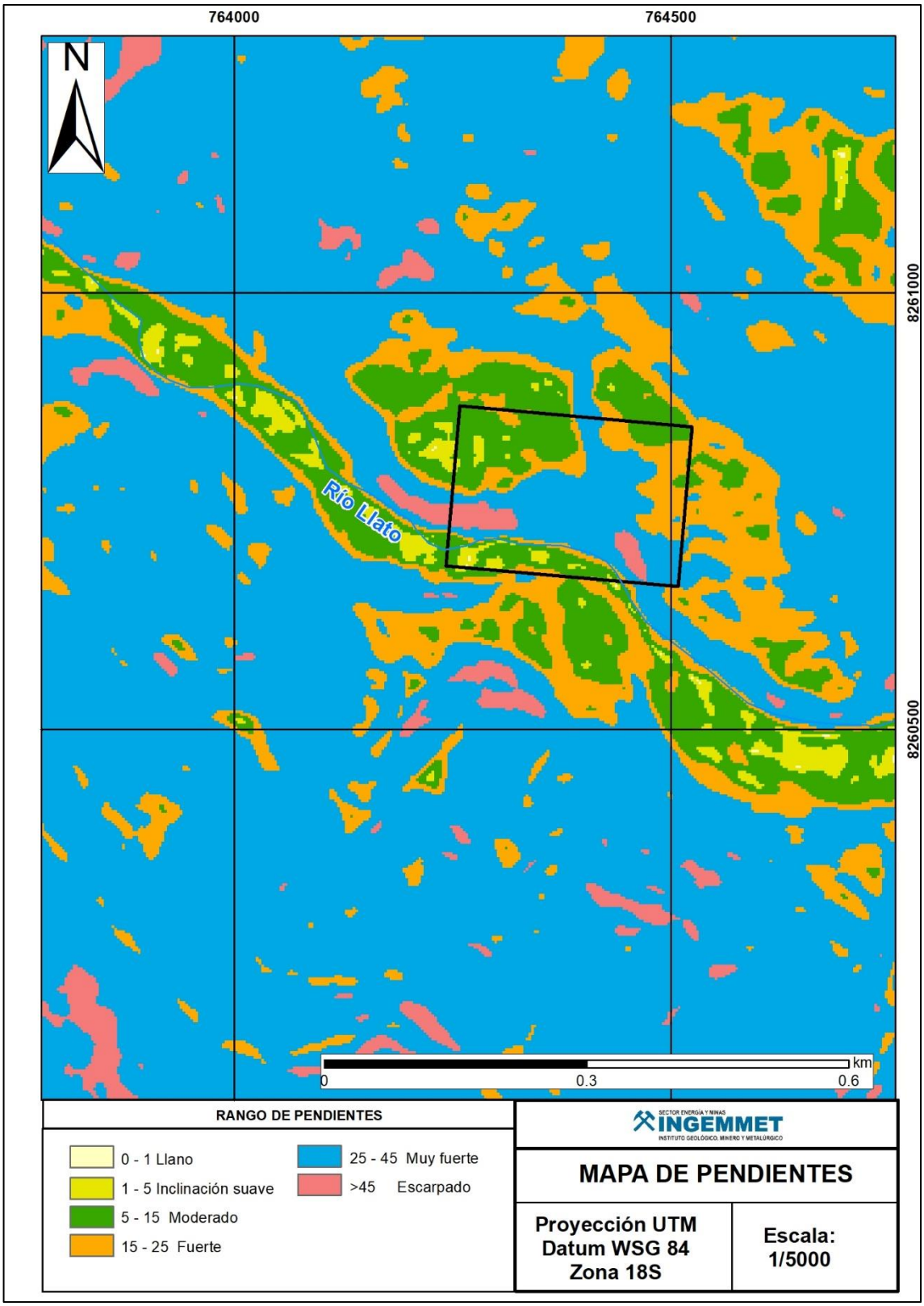
Úbeda, J. (2011): El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera Occidental de los Andes, Sur del Perú)» Tesis Doctoral. Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid, Madrid (España). 558 pp. Disponible online en el enlace: http://eprints. ucm.es/12076/

Zavala, B.; Vilchez, M.; Rosado, M.; Pari, W. & Peña, F. (2014). Estudio geoambiental en la cuenca del río Colca, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 57, 222 p., 11 mapas.

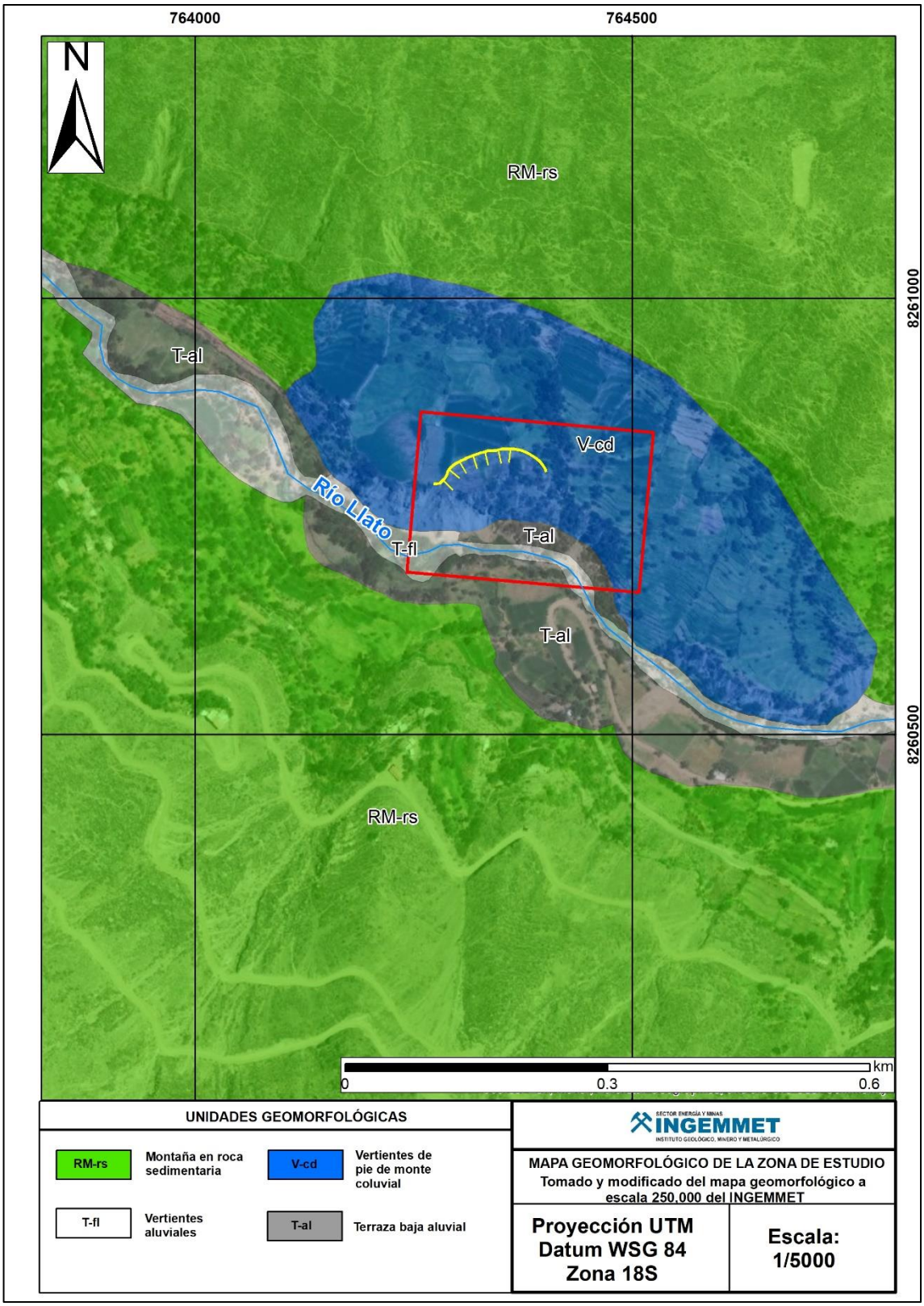
ANEXO 1: MAPAS



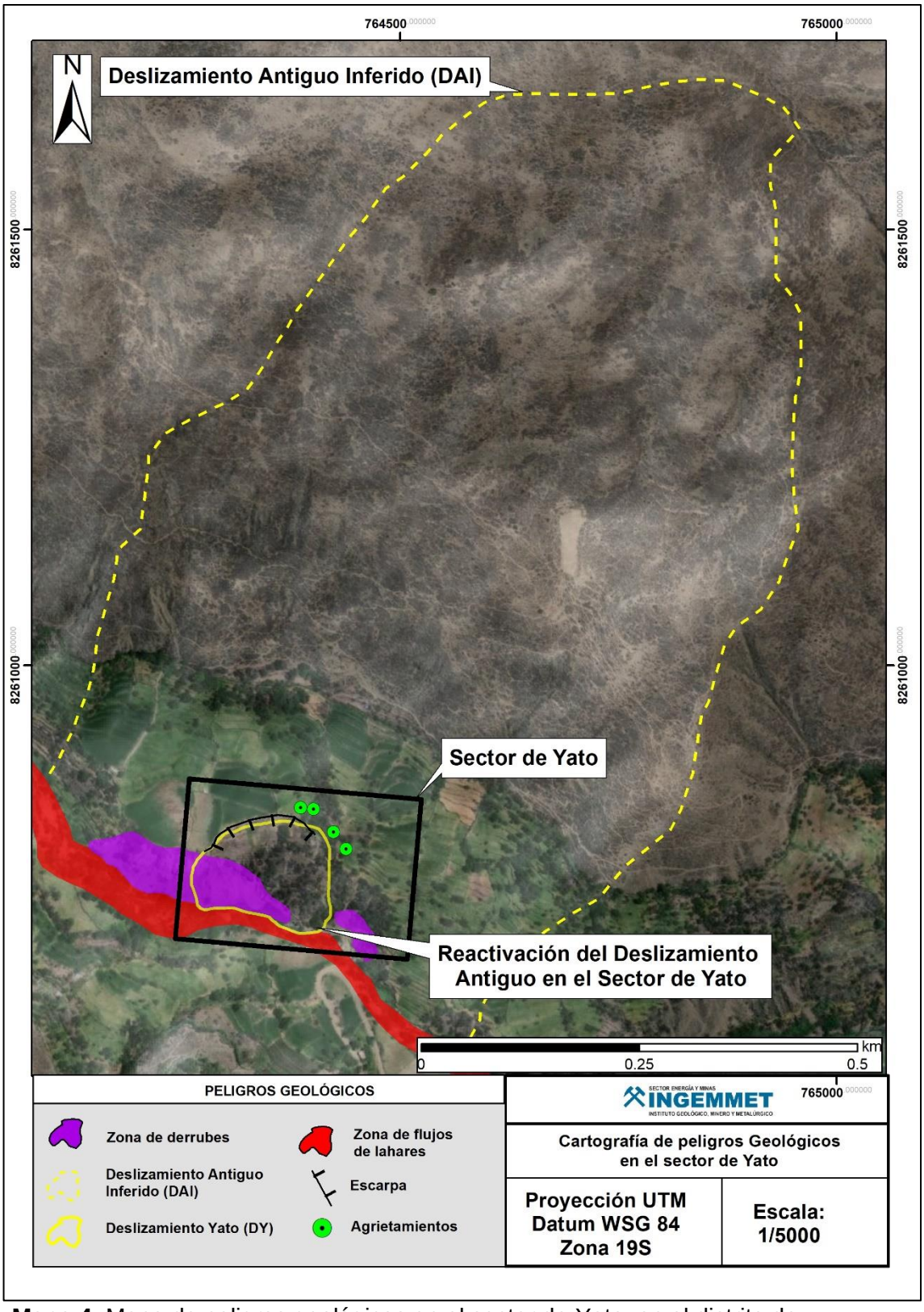
Mapa 1. Mapa geológico de la zona de Evaluación, en el distrito de Pampacolca, provincia de Castilla, departamento Arequipa.



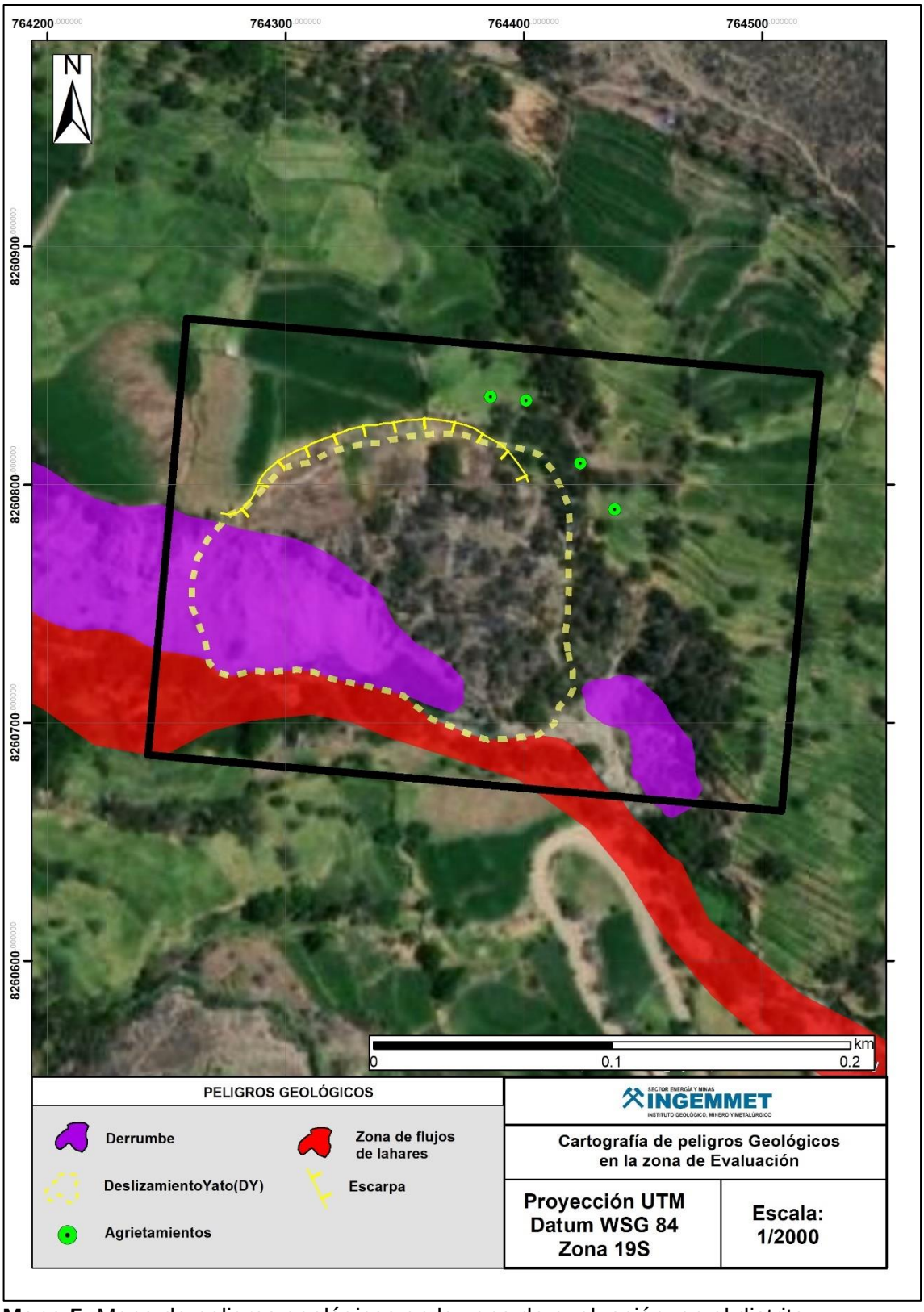
Mapa 2. Mapas pendientes de la zona de Evaluación, en el distrito de Pampacolca, provincia de Castilla, departamento Arequipa.



Mapa 3. Mapa geomorfológico de la zona de Evaluación, en el distrito de Pampacolca, provincia de Castilla, departamento Arequipa.



Mapa 4. Mapa de peligros geológicos en el sector de Yato, en el distrito de Pampacolca, provincia de Castilla, departamento Arequipa.



Mapa 5. Mapa de peligros geológicos en la zona de evaluación, en el distrito de Pampacolca, provincia de Castilla, departamento Arequipa.