

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

**Informe Técnico N° A7406**

# EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR LAHARES (HUAYCOS) EN EL DISTRITO DE YANAHUARA

Departamento Arequipa  
Provincia Arequipa  
Distrito Yanahuara



AGOSTO  
2023

# EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR LAHARES (HUAYCOS) EN EL DISTRITO DE YANAHUARA

*Distrito Yanahuara, provincia Arequipa, departamento Arequipa*

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

*Equipo de investigación:*

*Nélida Manrique Llerena*

*David Arteaga Utani*

## **Referencia bibliográfica**

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2023) - *Evaluación de peligro geológico por lahares (huaycos) en el distrito de Yanahuara, provincia Arequipa, departamento Arequipa*. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7406, 37 p.

## INDICE

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Antecedentes y trabajo anteriores.....	3
1.3. <i>Ubicación</i> .....	4
<i>Accesibilidad</i> .....	5
1.4. <i>Aspectos socioeconómicos</i> .....	5
1.5. <i>Precipitación pluvial</i> .....	7
2. DEFINICIONES .....	8
2.1. Erupción volcánica .....	8
2.2. Complejo Volcánico Chachani.....	8
2.3. Lahares .....	9
2.3.1. Lahares primarios .....	10
2.3.2. Lahares secundarios.....	10
2.4. Corriente de densidad piroclástica (PDC) .....	10
3. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO .....	11
3.1. Pendiente del terreno .....	11
3.2. Unidades geomorfológicas.....	11
4. CONTEXTO GEOLÓGICO .....	14
4.1. Unidades Litoestratigráficas .....	14
5. PELIGROS GEOLÓGICOS.....	14
5.1. Peligros geológicos por flujo de detritos (lahares).....	14
5.2. Cañón del Río Chili .....	15
6. SIMULACIONES DE FLUJOS POR FLUJOS DE DETRITOS (LAHARES). ....	16
6.1. Procedimientos previos a las simulaciones por flujos de detritos (lahares).....	17
6.2. Volúmenes empleados en la simulación de flujos de detritos (lahares)	19
6.3. Resultados de simulación de flujo de detritos (lahares) en el distrito de Yanahuara. ....	20
7. POSIBLE INFRAESTRUCTURA AFECTADA POR FLUJOS DE DETRITOS (LAHARES).....	21
7.1. Simulación en la quebrada Chullo.....	22
8. CONCLUSIONES.....	25
9. RECOMENDACIONES .....	26
BIBLIOGRAFÍA.....	27



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del distrito de Yanahuara, provincia y región Arequipa. ...	4
Figura 2. Histograma de precipitación diaria de la estación pampilla (SENAMHI).....	8
Figura 3. Erupción volcánica del volcán Sabancaya. ....	8
Figura 4. Edificios del sur del Complejo Volcánico Chachani. ....	9
Figura 5. Trayectoria de un lahar idealizado y relaciones geométricas entre H y L, que describen la extensión de la zona de peligro proximal. A y B, describen la extensión de la zona de peligro de inundación del lahar distal. (Iverson, et al, 1998).....	9
Figura 6. Lahares primarios generados en el volcán Ampato.....	10
Figura 7. Lahares secundarios en el flanco oeste del volcán Ubinas.....	10
Figura 8. Planicie ignimbrítica al sureste del distrito de Yanahuara. ....	12
Figura 9. Ladera piroclástica y volcanoclástica al margen izquierdo del río Chili. ....	13
Figura 10. Áreas de agricultura sobre las planicies aluviales al este del distrito de Yanahuara. ....	13
Figura 11. Vista de sur a norte del del valle encañonado desde el puente Chilina. ....	13
Figura 12. Muros improvisados que encauzan la quebrada Chullo. ....	15
Figura 13. Cañón del Río Chili desde el puente Chilina. ....	16
Figura 14. Esquema generalizado del área de generación de un flujo de detritos y lahares secundarios. (tomado de Soncco., Y. et al 2021. Libro de resúmenes extendidos XX Congreso Peruano de Geología, (2021).....	18
Figura 15. Mapa de peligros por flujo de detritos (lahares) en el distrito de Yanahuara. ....	20
Figura 16. Mapa de puntos críticos en las quebradas del distrito de Yanahuara. ....	22
Figura 17. Simulación de lahares (peligros bajo, moderado y alto) en la quebrada Chullo perteneciente al distrito de Yanahuara.....	23
Figura 18. Cruce afirmado, observándose muros improvisados que encauzan las quebradas Coord. UTM: 227534.8 E, 8185486.6 N .....	23
Figura 19. La infraestructura de una institución educativa construida cerca al cauce de la Qda. Chullo, observándose muros improvisados. Coord. UTM: 227507.9 E, 8185062.4 N.....	24
Figura 20. Viviendas sobrepasando el muro en la Qda. Chullo. Coord. UTM: 227551.5 E, 8185249.5 N.....	24

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Coordenadas de la plaza principal de Yanahuara, del distrito de Yanahuara, provincia y región de Arequipa.....	4
Cuadro 2. Rutas y accesos al distrito de Yanahuara, provincia y región de Arequipa. ..	5
Cuadro 3. Población urbana, según distritos, 2017. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. ....	5
Cuadro 4. Viviendas particulares, según área urbana, rural y tipo de vivienda del distrito de Yanahuara. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.....	6
Cuadro 5. Material de construcción en las paredes de las viviendas del distrito de Yanahura. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. ....	6
Cuadro 6. Material de construcción en los techos de las viviendas del distrito de Yanahuara. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. ....	6

Cuadro 7. PEA de 14 a más años de edad, por grupos de edad y ocupación principal. Fuente INEI - Censos Nacionales 2017: XII de Población y VII de Vivienda. ....	7
Cuadro 8. Cálculo de volumen del lahar de las quebradas del distrito de Yanahuara, resultado de la multiplicación del área de generación de lahares por los distintos grados de precipitación (baja, media y alta). ....	19
Cuadro 9. Ubicación (UTM WGS84) de los puntos críticos y el nivel de peligrosidad en las quebradas que atraviesan el distrito de Yanahuara. ....	21

## RESUMEN

El presente informe es el resultado de la evaluación de peligros geológicos por lahares en las 2 quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani y que cruzan el distrito Yanahuara (provincia y departamento Arequipa). Con este trabajo, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – Ingemmet, cumple con una de sus funciones que consiste en brindar asistencia técnica en peligros geológicos en los tres niveles de gobierno.

La población de Yanahuara se encuentra asentada sobre geoformas de carácter volcánico entre ellas: la planicie ignimbrítica y ladera piroclástica y volcanoclástica; geoformas de carácter fluvial y deposicional como planicie aluvial y valle-cañón o valle encañonado.

En el distrito de Yanahuara, se tienen torrenteras (quebradas) por donde discurren flujos de detritos (lahares) y forman depósitos proluviales, estos materiales pueden ser removidos fácilmente. Se caracterizan por estar conformados por bloques (2%), cantos (5%), gravas (15%) de formas subredondeadas de origen lávico y heterométricos (centimétrico a decimétrico) en matriz limosa a arcillosa (78%).

Se tienen también depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza de la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa, conformada por dos unidades, la primera de color blanco bien solidificado con fragmentos de pómez y xenolitos centimétricos y la ignimbrita de color rosado (salmón) menos compacto, que se encuentra sobre la unidad blanca con fragmentos de pómez y xenolitos de diámetros centimétricos de fácil erosión. También depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza correspondientes a los edificios domos-colada Cabrerías y Potrerros, con bloques angulosos, de tamaños métricos de baja meteorización, de fracturamiento moderado y alto por el proceso de formación de estos depósitos.

Durante los trabajos de campo, se identificaron 2 quebradas, que atraviesan el distrito, donde se realizó una simulación, usando el software VolcFlow, y comprobado en campo se determinó que en el distrito de Yanahuara, se presentan 15 puntos críticos, dentro de las cuales se encuentran 11 instituciones educativas (inicial, primario y secundario), 3 cruces afirmados y 1 compañía de bomberos; representando peligro de nivel bajo, moderado y alto; en caso ocurriera un peligro de este tipo, dañaría de forma directa e indirecta estas infraestructuras y a la población del distrito.

Finalmente, se brinda algunas recomendaciones a fin de que las autoridades competentes pongan en práctica, tales como: evitar la construcción de infraestructuras o viviendas en zonas de alto peligro no mitigable; implementar medidas estructurales para el control de flujo de detritos, realizar la EVAR correspondiente y proponer la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT).

## 1. INTRODUCCIÓN

El Complejo Volcánico Chachani (CVC) forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVCA), es uno de los trece volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú (de Silva y Francis, 1991). La subducción de la placa Oceánica de Nazca debajo de la placa Continental Sudamericana ha generado la existencia de un Arco Volcánico calco-alcalino desde el Jurásico al Reciente, situado sobre la Cordillera Occidental de los Andes.

La historia geológica del Complejo Volcánico Chachani evidencia que su actividad ha sido explosiva y efusiva, generando depósitos de tefra, flujos de lava, flujos de domo, corrientes de densidad piroclástica y lahares. Aunque el Chachani es considerado un volcán potencialmente activo, no se descarta una posible erupción, que podría generar muchos daños a la población de la ciudad de Arequipa, porque los distritos de Cayma, Yanahuara, Cerro Colorado y Yura se encuentran asentados en los alrededores de este complejo.

Aún, cuando los volcanes Misti y Chachani no se encuentran en proceso eruptivo, las quebradas que descienden del Chachani, se encuentran susceptibles a activarse y canalizar lahares que ponen en peligro alrededor de 25% de toda la población de la ciudad y dañar infraestructuras de los distritos antes mencionados. Además, se tiene conocimiento que, en febrero del año 2020, las lluvias intensas desencadenaron flujos de detritos (lahares), uno de ellos en la quebrada Chullo, socavó las bases de viviendas, ocasionando el derrumbe de 7 viviendas en la urbanización Independencia (Aguilar y Valdivia, 2020).

El distrito de Yanahuara se encuentra asentado sobre depósitos volcánicos de los volcanes Misti y Chachani, por donde descienden quebradas que atraviesan el área urbana del distrito. La mayor parte del año las quebradas están secas debido al clima árido de Arequipa, sin embargo, durante los periodos de lluvias, estas quebradas se reactivan generando lahares que afectan infraestructura y viviendas de la población que están en el cauce o alrededores de las quebradas.

El presente estudio “Evaluación de peligro geológico por lahares (huayco) en el distrito de Yanahuara”, referido al Complejo Volcánico Chachani forma parte del proyecto de investigación GA-17F: “Estudiar y evaluar los peligros asociados a los volcanes Chachani y Casiri” efectuado por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET a través del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET. En él, se busca estudiar y evaluar los peligros por lahares en las quebradas que descienden del CVC e identificar puntos críticos en el distrito de Yanahuara.



## **1.1. Objetivos**

- a) Realizar la identificación y tipificación de los peligros geológicos en las quebradas que se encuentran en el distrito de Yanahuara.
- b) Realizar la simulación de flujos de detritos en las quebradas que recorren el área urbana del distrito de Yanahuara: Chullo y río Chili.
- c) Realizar la identificación de los puntos críticos (infraestructura) en las quebradas simuladas del distrito de Yanahuara.

## **1.2. Antecedentes y trabajo anteriores**

- Luque, G.; Pari, W. & Dueñas, K. (2021) - Peligro geológico en la región Arequipa. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 81, 300 p., 9 mapas. En este boletín se realiza un estudio integral de los peligros volcánicos en la región de Arequipa, mediante la a revisión de publicaciones científicas, la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales, y mapas de cartografía de peligros geológicos de estudios preliminares. De este modo, han podido realizar un análisis espacial con el fin de interpretar la evolución de los paisajes geomorfológicos, detectar los procesos que pueden causar desastres y proponer medidas para su prevención y mitigación.
- Vílchez, M. & Sosa, N. (2021) - Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 85, 236 p., 5 mapas. En este trabajo se identificó y caracterizó los tipos de peligros geológicos por movimientos en masa y geohidrológicos ocurridos en la ciudad de Arequipa (Incluido el distrito de Yanahuara); se realizó un inventario de peligros en detalle; determinación de zonas críticas; zonificar el territorio según rangos de susceptibilidad y peligro a los movimientos en masa; finalmente proponen acciones a tomar para la prevención de los peligros por movimientos en masa.
- Aguilar, R & Valdivia, D (2020) - Opinión Técnica N° 006-2020, Problemática de la torrencera Chullo. Este documento se desarrolló en base al Oficio N° 106-2020-DDCPD-GPSC-MDY, con la inspección técnica de la torrencera Chullo en el tramo entre la Calle Grande hasta el cruce de la Av. Metropolitana con Víctor Andrés Belaunde, del distrito de Yanahuara, identificando el estrechamiento del cauce de la quebrada Chullo y socavamiento de las bases en 7 viviendas de la urbanización Independencia a consecuencia de la erosión lateral que ocasionó el huayco de febrero del 2020.
- Vela, J & Valdivia, D, (2020) – Informe técnico N° A7040 “Inspección geológica y evaluación de daño en los distritos de Paucarpata, Socabaya, Jacobo Hunter, Cerro Colorado y Yanahuara afectados por huaicos del 23 al 25 de febrero del 2020”, realizado en el año 2020. Considerando las características geodinámicas de la quebrada Chullo, se concluye que esta quebrada es afectada por flujos de detritos y lahares que descienden en temporadas de lluvia y generan

socavamiento o erosión lateral sobre las laderas, bases de muros de contención, así como bases de las viviendas.

### 1.3. Ubicación

La zona de estudio se ubica en el distrito de Yanahuara, provincia y departamento Arequipa (Figura. 1), a 18,6 km al suroeste del volcán Misti y a 20,3 km al sureste del Complejo Volcánico Chachani. Las coordenadas UTM y geográficas de la zona de estudio son (cuadro 1):

Cuadro 1. Coordenadas de la plaza principal de Yanahuara, del distrito de Yanahuara, provincia y región de Arequipa.

UTM – WGS84 – ZONA 19S		Geográficas	
Este	Norte	Latitud	Longitud
228396 m	8186540 m	-16.387135°	-71.542803°

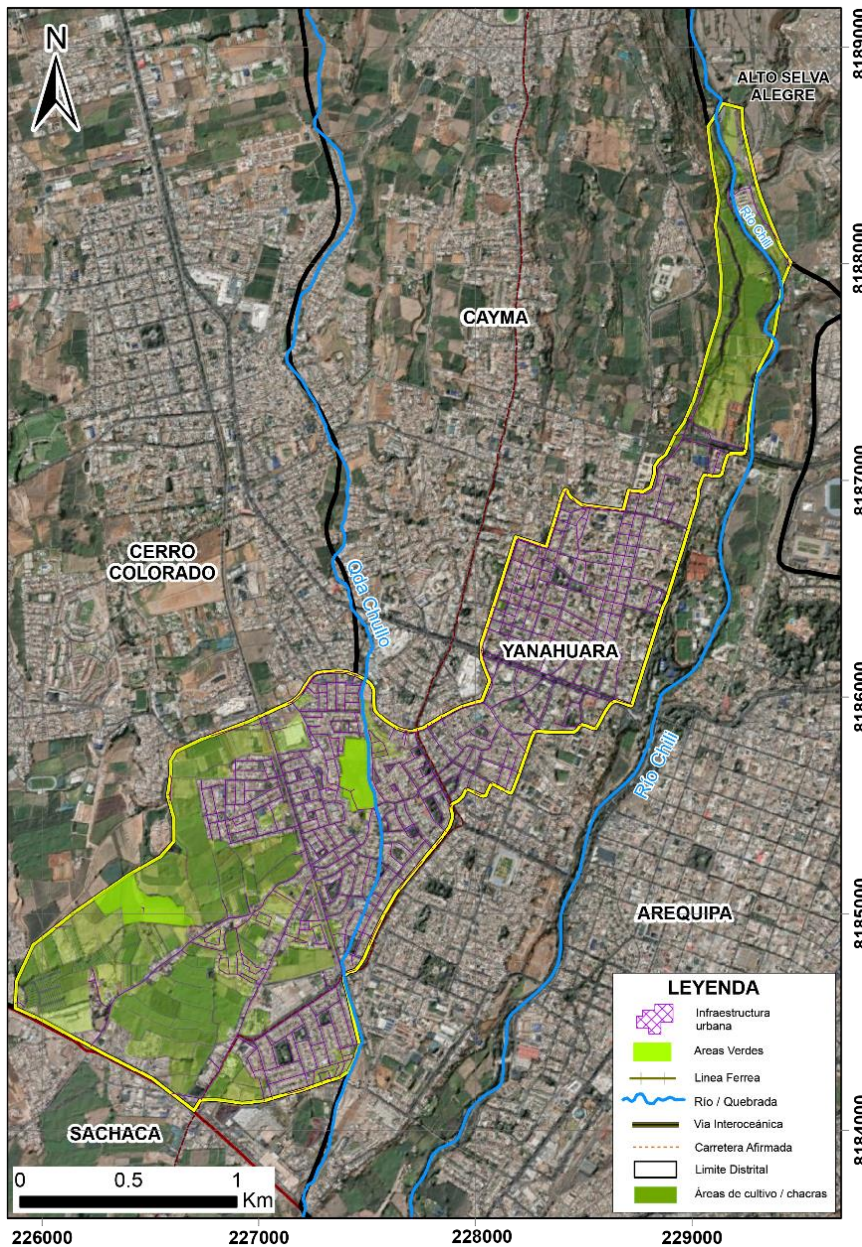


Figura 1. Mapa de ubicación del distrito de Yanahuara, provincia y región Arequipa.

## **Accesibilidad**

El acceso vía terrestre al distrito de Yanahuara (Plaza principal), desde el observatorio (OVI), INGEMMET, sigue la siguiente ruta (Cuadro 2):

*Cuadro 2. Rutas y accesos al distrito de Yanahuara, provincia y región de Arequipa.*

<b>Ruta</b>	<b>Tipo de vía</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Tiempo estimado</b>
OVI – Av. José Abelardo Quiñones	Asfaltada	0.20	5 mín.
Av. José Abelardo Quiñones – Cuesta del Ángel (Plaza principal)	Asfaltada	1.40	20 mín.

### **1.4. Aspectos socioeconómicos**

#### **a) Indicadores de la población**

De acuerdo con el XII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda (CNPV, 2017), el distrito de Yanahuara el 53,66 % (13 639) son mujeres y el 46,34 % (11 778) hombres. Siendo una de los distritos urbanos menos poblados que concentra el menor número de habitantes.

La densidad poblacional del distrito de Yanahuara es de 11553.18 hab./km<sup>2</sup> (Cuadro 3). El 100 % de sus habitantes vive en áreas urbanas.

*Cuadro 3. Población urbana, según distritos, 2017. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.*

<b>Distrito</b>	<b>Población total</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidad poblacional (hab./km<sup>2</sup>)</b>	<b>Urbana</b>	
				<b>Pob. censada</b>	<b>%</b>
<b>Yanahuara</b>	25417	2,2	11553,18	25417	100

En cuanto a la composición de la población por edades, el distrito de Yanahuara dentro de la zona de estudio, según el Censo XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas (2017), resalta una población demográfica joven menor a 35 años.

#### **b) Indicadores de vivienda**

De acuerdo con el censo de población y vivienda del año 2017, existen 9033 viviendas particulares en el distrito de Yanahuara. La mayoría con 64,8% (5849) son casas independientes, seguido de departamentos en edificio 31,6% (2856), las viviendas en quinta 2,7% (242), vivienda en casa de vecindad 0,5% (50), vivienda improvisada 0,3% (25), local no destinado para habilitación urbana 0,1% (10) y otro tipo representan el 0% (1) ver (Cuadro 4).

*Cuadro 4. Viviendas particulares, según área urbana, rural y tipo de vivienda del distrito de Yanahuara. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.*

Tipo de vivienda	Total	Urbana	
		Viviendas	%
<b>Total</b>	9033	9033	100
Casa independiente	5849	5849	64,8
Departamento en edificio	2856	2856	31,6
Vivienda en quinta	242	242	2,7
Vivienda en casa de vecindad	50	50	0,5
Vivienda improvisada	25	25	0,3
Local no dest. Para hab. Humana	10	10	0,1
Otro tipo	1	1	0

Las paredes de las viviendas censadas predominantes en el distrito de Yanahuara, son de ladrillo o bloque de cemento con un 94,5 %, el 3,2 % son de piedra o sillar con cal o cemento y el 1,5 % viviendas de adobe y 0,5 % Madera, el porcentaje restante corresponde a otros materiales (Cuadro 5).

*Cuadro 5. Material de construcción en las paredes de las viviendas del distrito de Yanahura. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.*

Material de construcción predominante en las paredes	N° de viviendas	%
Ladrillo o bloque de cemento	13622	94,5
Piedra o sillar con cal o cemento	462	3,2
Adobe	214	1,5
Tapia	0	0
Quincha (Caña con barro)	0	0
Piedra con barro	4	0
Madera (pona, tornillo, etc.)	66	0,5
Triplay	40	0,3
Otro	2	0
<b>Total</b>	<b>14410</b>	<b>100</b>

El material de construcción en predominante en los techos de las viviendas censadas en el distrito de Yanahuara es: 96,1 % de concreto armado, 2,2% son planchas de calamina, fibra de cemento o similares, 0,6 % de tejas, 0,5 % de madera, el material restante es de otros materiales (Cuadro 6).

*Cuadro 6. Material de construcción en los techos de las viviendas del distrito de Yanahuara. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.*

Material de construcción predominante en los techos	N° de viviendas	%
Concreto armado	13856	96,1
Madera	68	0,5
Tejas	84	0,6
Planchas de calamina, fibra de cemento o similares	315	2,2
Caña o esfera con torta de barro o cemento	42	0,3
Triplay/estera /carrizo	40	0,3
Paja, hoja de palmera y similares	5	0
<b>Total</b>	<b>14410</b>	<b>100</b>

### c) Población económicamente activa

En base al Censo Nacional del 2017, en el distrito de Yanahuara la mayor cantidad de la población 4756 habitantes son profesionales científicos e intelectuales, 1981 profesionales técnicos, 1831 habitantes son trabajadores de servicios, vendedores de comercios y mercado, 1321 habitantes son jefes y empleados administrativos, 742 habitantes son trabajadores no calificados servicios, peón, vendedores ambulantes y afines ocupacionales elementales, 589 habitantes desempleados, 573 personas son trabajadores de la construcción edificaciones, productores artesanales, electrónicos y las telecomunicaciones, el resto de personas poseen una ocupación o son agricultores o ganaderos (Cuadro 7).

*Cuadro 7. PEA de 14 a más años de edad, por grupos de edad y ocupación principal.  
Fuente INEI - Censos Nacionales 2017: XII de Población y VII de Vivienda.*

Ocupación principal	Total	Grupos de edad			
		14-29 años	30-44 años	45-64 años	65 y más años
Miembros del poder ejecutivo, legislativo, judicial y personal directores de la administración pública y privada	341	27	121	168	25
Profesionales científicos e intelectuales	4756	765	1826	1861	304
Profesionales técnicos	1981	560	689	646	86
Jefes y empleados administrativos	1321	347	462	451	61
Trabajos de servicios, vendedores de comercios y mercado.	1831	455	534	710	132
Agricultores y trabajadores calificados, agropecuario, forestales y pesqueros.	277	12	33	133	99
Trabajadores de la construcción edificaciones, productores artesanales, electr. y las telecomunicaciones.	573	103	174	243	53
Operadores de maquina industrial, ensambladores, y conductores de transporte.	543	76	153	260	54
Trabajadores no calificados servicios, peón, vendedores ambulantes y afines ocupac. Elementales.	742	205	192	264	81
Ocupaciones militares y policiales	66	5	24	37	-
Desocupado	589	285	163	114	27
Total	<b>13020</b>	<b>2840</b>	<b>4371</b>	<b>4887</b>	<b>922</b>

### 1.5. Precipitación pluvial

En el distrito de Yanahuara el periodo de precipitaciones ocurre entre los meses de diciembre a marzo (época húmeda) y durante los meses de abril a noviembre hay ausencia de las mismas (época seca). Según la información disponible del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), la estación Pampilla entre los años 1931 al 2020 (Figura. 2), muestra que en el distrito de Yanahuara se ha generado una precipitación máxima de 125 mm, precipitación intermedia de 50 mm y la precipitación mínima de 25 mm.

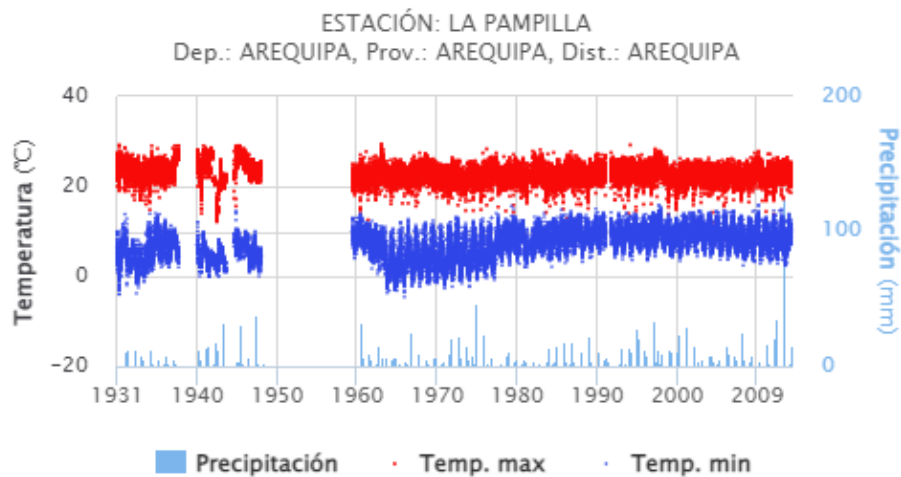


Figura 2. Histograma de precipitación diaria de la estación pampilla (SENAMHI).

## 2. DEFINICIONES

### 2.1. Erupción volcánica

Son los procesos durante los cuales el magma y sus gases asociados (Figura. 3) ascienden hacia la corteza y son emitidos hacia la superficie de la Tierra y Atmósfera. Las erupciones volcánicas varían ampliamente, tanto en magnitud como en duración y muestran un amplio espectro de estilos eruptivos y procesos. Los vulcanólogos describen tradicionalmente las erupciones en términos derivados de los tipos de actividad característicos de volcanes particulares o regiones volcánicas (Siebert et al, 2015).



Figura 3. Erupción volcánica del volcán Sabancaya.

### 2.2. Complejo Volcánico Chachani

Es un aparato volcánico que se encuentra formado por al menos 12 edificios volcánicos, divididos por edificios antiguos y recientes (Figura. 4), entre ellos cinco conos compuestos, cuatro cúmulo-domos y un voluminoso conjunto de domos-colada, además, un extenso campo de lavas hacia el oeste, sur y suroeste. El Complejo Volcánico Chachani es considerado como un sistema de larga duración, cuya actividad habría durado al menos 1.2 Ma de edad.

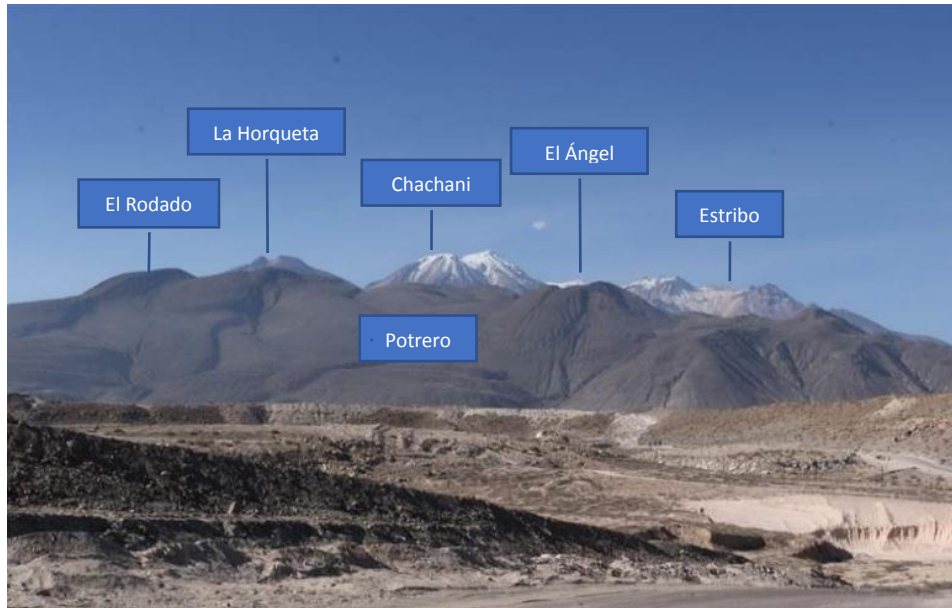


Figura 4. Edificios del sur del Complejo Volcánico Chachani.

### 2.3. Lahares

Los lahares se producen durante una erupción o tranquilidad volcánica (Tilling, 1993). Ocurren cuando grandes masas de agua mezclados con sedimentos volcánicos se desplazan quebrada abajo, que comúnmente incorporan agua y sedimentos adicionales (Figura. 5). Los fragmentos de roca contenidos en los lahares los hacen especialmente destructivos; el abundante líquido contenido en estos les permite fluir sobre pendientes suaves e inundar áreas lejanas a su origen. Pueden comprender uno o más tipos de flujos, los que incluyen ‘flujos de detritos’ y ‘flujos hiperconcentrados’ o ‘transicionales’. Las transiciones entre los tipos de flujos son definidos en base a la fracción de sólidos que poseen; sin embargo, estas transiciones son gradacionales y dependen de otros factores, como el tamaño de los sedimentos, mineralogía de arcillas, agitación de las partículas y la energía del flujo (Vallance & Iverson, 2015).

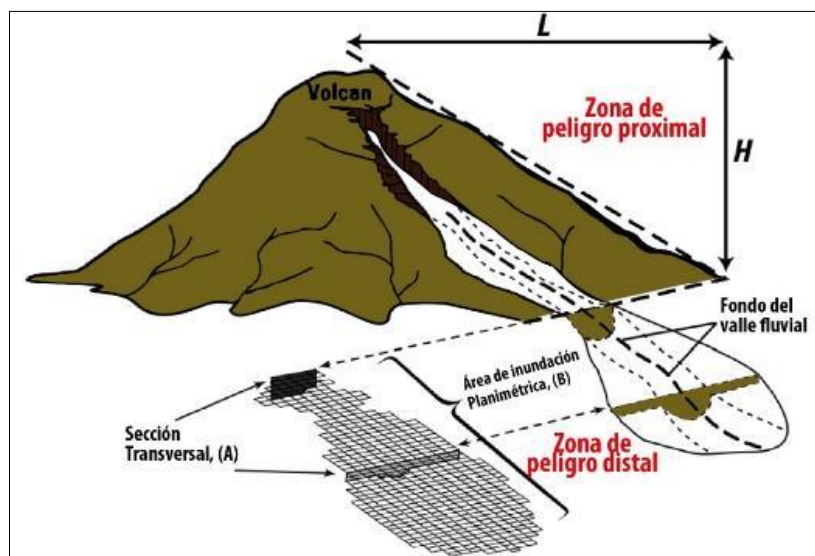


Figura 5. Trayectoria de un lahar idealizado y relaciones geométricas entre  $H$  y  $L$ , que describen la extensión de la zona de peligro proximal.  $A$  y  $B$ , describen la extensión de la zona de peligro de inundación del lahar distal. (Iverson, et al, 1998).

### 2.3.1. Lahares primarios

Los lahares primarios se originan durante erupciones de volcanes nevados (Figura. 6), son el resultado de la combinación de mecanismos físicos relacionados con el fenómeno eruptivo como la expulsión de ceniza, material piroclástico y flujos de lava incandescente que provocan el derretimiento súbito de una porción del glaciar (Vera et al, 2019).



Figura 6. Lahares primarios generados en el volcán Ampato.

### 2.3.2. Lahares secundarios

Los lahares secundarios son mezclas de fragmentos volcánicos (ceniza, lapilli y bloques) transportados por el agua (precipitación fluvial), fluyen rápidamente (10 - 20 m/s) por los flancos, quebradas y valles que descienden de un volcán (Figura. 7). Pueden destruir todo a su paso y alcanzar grandes distancias.



Figura 7. Lahares secundarios en el flanco oeste del volcán Ubinas.

### 2.4. Corriente de densidad piroclástica (PDC)

Son corrientes extremadamente calientes, llegan a tener temperaturas entre 300° y 700°C, conformadas por una mezcla de ceniza, fragmentos de rocas y gases. Descienden por los flancos del volcán a grandes velocidades, se construye por una parte inferior densa y otra menos densa conocida como oleada piroclástica, compuesta por



una nube de gases y ceniza destruyendo, calcinando y enterrando todo lo que se encuentra a su paso.

### **3. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO**

#### **3.1. Pendiente del terreno**

La pendiente de los terrenos es uno de los principales factores dinámicos y particularmente de los flujos de detritos (lahares), ya que determinan la cantidad de energía cinética y potencial de una masa inestable (Sánchez et al, 2002).

Para la elaboración del mapa de pendientes del distrito de Yanahuara se utilizó un mapa topográfico Escala 1:15 000 y el modelo de elevación digital (DEM), obtenido por medio de imágenes satelitales SPOT 10 m, utilizando el software ArcGIS 10.5, para realizar este mapa no se ha discriminado las alturas de viviendas o infraestructura.

El nivel de jerarquización del mapa de pendientes (Anexo: Mapa 1) fue siguiendo a (Martín-Serrano et al., 2004), adaptado en ficha de inventarios de peligros geológicos y geohidrológicos en el Perú, clasificando en 6 rangos o grados de pendiente: Llano, suavemente inclinado, moderado, fuerte, muy fuerte y muy escarpado; estos se describen a continuación.

➤ **Llano (<1°)**

Son terrenos planos, se presentan en pequeños sectores del distrito de Yanahuara, identificándose en zonas puntuales, siendo unos de los rangos de menor área dentro del distrito.

➤ **Suavemente inclinado (1° - 5°)**

Este grado de pendientes se presenta en las geoformas de planicies aluviales e ignimbríticas. Ocupando dentro del distrito la mayor extensión.

➤ **Moderado (5° - 15°)**

Este grado de pendientes es el segundo de mayor extensión en todo el distrito, se encuentran sobre la planicie aluvial y las laderas de la quebrada Chullo y el Río Chili.

➤ **Fuerte (15° - 25°)**

Este grado de pendientes se encuentra en el área urbana del distrito, es el tercer rango de pendiente con mayor extensión.

➤ **Muy fuerte (25° - 45°)**

Este grado de pendientes se presenta por sectores de las laderas del Río Chili y el puente Chilina, sobre la geoforma valle encañonado, en el sector este y noreste del distrito de Yanahuara.

➤ **Muy escarpado (>45°)**

Este grado de pendientes no se presentan en el distrito de Yanahuara.

#### **3.2. Unidades geomorfológicas**

Para la caracterización y determinación de unidades geomorfológicas (Anexo: Mapa 2), se ha empleado las especificaciones técnicas DGAR-ET-002 V-2 para clasificar y caracterizar las unidades geomorfológicas elaboradas por el INGEMMET a escala 1:25,000.

### 3.2.1. Geformas de carácter volcánico

#### ➤ Planicie ignimbrítica (PL-ig)

Esta geoforma es la segunda en extensión del distrito de Yanahuara, se ubican al sureste del distrito de Yanahuara, poseen pendientes suavemente inclinadas ( $1^{\circ}$ -  $5^{\circ}$ ). Está formada por depósitos de composición riolítica, surcada por quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani (Figura. 8).



Figura 8. Planicie ignimbrítica al sureste del distrito de Yanahuara.

#### ➤ Ladera piroclástica y volcanoclástica (LA-pv)

Esta geoforma, se encuentra relacionada a depósitos de corrientes de densidad piroclástica (PDC) de bloques y ceniza, de tefra, de lahares y depósitos volcanoclásticos del Chachani. Se caracteriza por presentar material poco consolidado, se ubica en el sector noreste del distrito de Yanahuara (Figura. 9). Presenta pendientes fuertes ( $15^{\circ}$ -  $25^{\circ}$ ) y muy fuertes ( $25^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ).



Figura 9. Ladera piroclástica y volcanoclástica al margen izquierdo del río Chili.

### 3.2.2. Geoformas de carácter fluvial y deposicional

#### ➤ Planicie aluvial (PL-a)

Esta geoforma presenta en general superficies suavemente inclinadas (Figura. 10), por sectores con pendientes fuertes ( $15^{\circ}$ - $25^{\circ}$ ) y muy fuerte ( $25^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ), formado por clastos centimétricos de origen lávico redondeados y subredondeados, llegando a alcanzar espesores de hasta 20 m con un drenaje paralelo. La planicie aluvial ocupa la mayor extensión del distrito de Yanahuara.



Figura 10. Áreas de agricultura sobre las planicies aluviales al este del distrito de Yanahuara.

#### ➤ Valle-cañón o valle encañonado (VII-e)

Este valle fluvial presenta laderas de pendiente fuertes ( $15^{\circ}$ - $25^{\circ}$ ) a muy fuertes ( $25^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ) (Figura. 11), se originan por efecto de la fuerte erosión fluvial que principalmente excava y profundiza el lecho del río Chili. Esta geoforma se encuentra al este del distrito.



Figura 11. Vista de sur a norte del del valle encañonado desde el puente Chilina.

## **4. CONTEXTO GEOLÓGICO**

Para el análisis geológico se hizo uso de cartas geológicas del cuadrángulo de Arequipa (33-s-1 y 33-s-2). elaboradas por INGEMMET a escala 1: 50 000. Posteriormente en el proyecto GA17D “Estudio de peligros del Complejo Volcánico Chachani” (2018, 2019, 2020 y 2021) y el proyecto GA17F “: Estudiar y Evaluar los peligros asociados a los volcanes Chachani y Casiri”, desarrollado a escala 1: 25 000 (Anexo: Mapa 3) se localizan las siguientes formaciones y/o secuencias.

### **4.1. Unidades Litoestratigráficas**

#### **4.1.1. Ignimbrita La Joya (Np-IJL)**

Esta ignimbrita aflora en extensas zonas del norte, noreste del Chachani con una extensión de 800 km<sup>2</sup>, con espesores entre 5 a 80 m se ubica en el cañón del río Chili, en el distrito de Yanahuara solo aflora en la margen izquierda del cañón, esta formación fue datada en 4.89 Ma (Paquereau Lebti et al, 2006).

#### **4.1.2. Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (Qp-IAA)**

Esta ignimbrita posee una composición riolítica cuyos afloramientos se encuentran al sur y suroeste del Chachani y la unidad de mayor extensión aflorante en el distrito de Yanahuara. Esta ignimbrita consta de dos unidades con edades medias ponderadas de 1.66 Ma para la unidad blanca inferior, y 1.63 Ma para la unidad rosa superior (Paquereau Lebti et al, 2006).

#### **4.1.3. Domos-colada Cabrerías (Qp-Cab)**

En el distrito de Yanahuara hacia el este se encuentra aflorando un depósito piroclástico de bloques y ceniza, producto del colapso de un domo, formado por bloques densos porfíricos, de composición dacítica, con hasta 1.5 m de diámetro. Este depósito es de matriz soportada con matriz (60%) y bloques (40%) en promedio.

#### **4.1.4. Depósitos aluviales (H-AI)**

Estos depósitos ocupan la mayor extensión del distrito. Litológicamente están conformados por una mezcla de fragmentos heterométricos, de origen lávico redondeados a subredondeados. Estos depósitos se encuentran adyacente a la quebrada Chullo y el Cañón del río Chili.

## **5. PELIGROS GEOLÓGICOS**

### **5.1. Peligros geológicos por flujo de detritos (lahares)**

El principal peligro geológico identificado corresponde a un movimiento en masa, tipo flujos de detritos (lahares), cuyo factor desencadenante son las precipitaciones pluviales (lluvias), que contribuyen a la desestabilización de las laderas o taludes. Identificándose lahares antiguos del Pleistoceno y del Holoceno, así como depósitos de lahares recientes que se encuentran en el cauce de las quebradas.

Para el Complejo Volcánico Chachani, se ha elaborado el mapa de peligros volcánicos por lahares (Anexo: Mapa 4), considerándose 2 quebradas: Chullo y río Chili.

#### **5.1.1. Quebrada Chullo**

La quebrada Chullo discurre material detrítico no consolidado. En sus márgenes se evidencian depósitos de lahares antiguos y recientes, que indica que este evento es recurrente.

El cauce se encuentra estrechado o reducido a lo largo de su recorrido por la zona urbana desde 7 m en el sector norte del distrito y 4 m al sur del mismo (Figura. 12). El

material predominante es limo-arcilloso con gravas, cantos y bloques subredondeados en menor proporción. Se tiene en ambas márgenes construcciones de muros de contención sin ningún análisis técnico, lo cual origina el socavamiento (profundización del cauce), que a futuro podría generar el colapso de los muros improvisados.

Del mismo modo varias viviendas fueron construidas al borde la quebrada y sobre material no consolidado, que también podrían verse afectadas por la erosión lateral que causa el paso del flujo. los cimientos.



Figura 12. Muros improvisados que encauzan la quebrada Chullo.

## 5.2. Cañón del Río Chili

Este cañón presenta un ancho de 300 m con una profundidad de hasta 80 m en el sector alto de la ciudad de Arequipa. Se encuentra formada por terrazas originadas por el emplazamiento de lahares ocurridos en épocas históricas y en el Holoceno, en su gran mayoría (Figura. 13).

El cauce de la quebrada presenta en el sector norte del distrito 12 m y en el sector bajo del distrito (sur) se estrecha presentando 8 m.

Se encuentran aflorando en la margen izquierda la ignimbrita del río Chili y en el lecho se observan bloques subredondeados y redondeados de espesores decímetros a varios metros distribuidos en una matriz de arena y limo. Presentan estratificación cruzada y laminar.



Figura 13. Cañón del Río Chili desde el puente Chilina.

## 6. SIMULACIONES DE FLUJOS POR FLUJOS DE DETRITOS (LAHARES).

La simulación de lahares para el distrito de Yanahuara (Anexo: Mapa 4), se realizó en el código VolcFlow (Kelfoun & Druit, 2005), es un modelo que fue desarrollado para la simulación de flujos volcánicos en el Laboratorio de magmas y volcanes, de la universidad Blaise Pascal, en Clermont-Ferrand (Francia), por el Dr. Karim Kelfoun y colaboradores, para delimitar objetivamente las zonas de amenaza de lahares.

La simulación con el VolcFlow permite simular la trayectoria de flujos densos, flujos diluidos a partir de los flujos densos y la sedimentación de los flujos diluidos, basado en el promedio vertical de las ecuaciones de conservación de la masa (Ecuación 1) y la cantidad de movimiento (Ecuaciones 2 y 3) (INGEMMET, 2022). Los parámetros utilizados para el modelado de los diferentes flujos se describen a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh \sin \alpha_x - \frac{1}{2} Kactpass \frac{\partial}{\partial x}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_x}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) = gh \sin \alpha_y - \frac{1}{2} Kactpass \frac{\partial}{\partial y}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_y}{\rho} \quad (3)$$

Donde:

- h: Es el espesor del flujo
- u = (u, v) es la velocidad del flujo
- $\alpha$ : Pendiente del terreno
- $\rho$ : Densidad aparente
- T: Retardo de esfuerzo - "Savage y Hunter (1989)" Kactpass: Coeficiente de presión terrestre - "Inversión y Denlinger (2001)".

## **6.1. Procedimientos previos a las simulaciones por flujos de detritos (lahares).**

### **6.1.1. Determinación de volumen de lahar**

La precipitación en la zona generará los flujos de detritos (lahares secundarios), en el distrito de Yanahuara. En base a esto para determinar el volumen adecuado para las simulaciones de lahares secundarios, es necesario tener depósitos de otros fenómenos volcánicos como de bloques y ceniza, que pueden ser removilizados con la presencia de lluvias. El volumen de esta será por la mezcla de material depositado no consolidado propenso a removilización y de la precipitación pluvial en cada drenaje en los alrededores del distrito de Yanahuara, debido a esto es necesario determinar estos 2 volúmenes.

Según algunos autores el porcentaje varía desde 40 % de sedimentos y 60 % de agua (Vásconez et al, 2009); 50 % de agua y 50 % de sedimentos (Vallance J. W., 2001); 70 % de agua y 30 % de sedimentos (Córdoba et al, 2015).

### **6.1.2. Determinación de quebradas y volúmenes para Lahares secundarios**

Para la determinación de las zonas susceptibles a lahares se realizó un análisis de las quebradas provenientes del complejo volcánico Chachani, que contemplan la jurisdicción del distrito de Yanahuara.

**En consecuencia, se ha determinado un total de drenajes por donde podrían ocurrir este tipo de peligros. Las quebradas como Chullo y río Chili.**

En cuanto a la definición de volúmenes para simulaciones numéricas, primero se ha calculado el volumen de agua entrante en cada cuenca hidrográfica, considerando la precipitación máxima diaria comprendida en la estación La Pampilla desde 1931 a 2020 (SENAMHI, 2020), el área de las líneas divisorias que trazan la separación entre dos vertientes o cuencas fluviales limítrofes. Producto de esto se obtendrá la cantidad o volumen de máxima escurrida y disponible en superficie.

Posteriormente se ha calculado el volumen de material disponible en cada cuenca hidrográfica adoptando espesores aproximados de los depósitos en cada cuenca, producto de este cálculo se obtiene volúmenes máximos de material disponible para ser mezclado con agua y generar lahares.

Finalmente, en función de la ubicación de cada cuenca hidrográfica y del tipo de material volcánico que cada una de estas puedan llegar a tener en las quebradas del CVC se ha utilizado el 60 % volumen de agua y 40 % de volumen de escombros, el cual representa el 100 % del volumen total de lahar producido.

$$\begin{aligned} V_t(\text{lahar}) &= V_{\text{Agua}} + V_{\text{sedimentos}} \\ 100 \% &= 60 \% + 40 \% \end{aligned}$$

Sin embargo, el cálculo de volumen de H<sub>2</sub>O es igual a la precipitación por el área de la zona de generación de lahares.

$$V_{H_2O} = Pr * A_{(\text{Lahares})}$$

**Donde:**

V<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = Volumen de H<sub>2</sub>O

Pr = Precipitación

$A_{(\text{Lahares})}$  = Área de la zona de generación de lahares (Figura. 14).

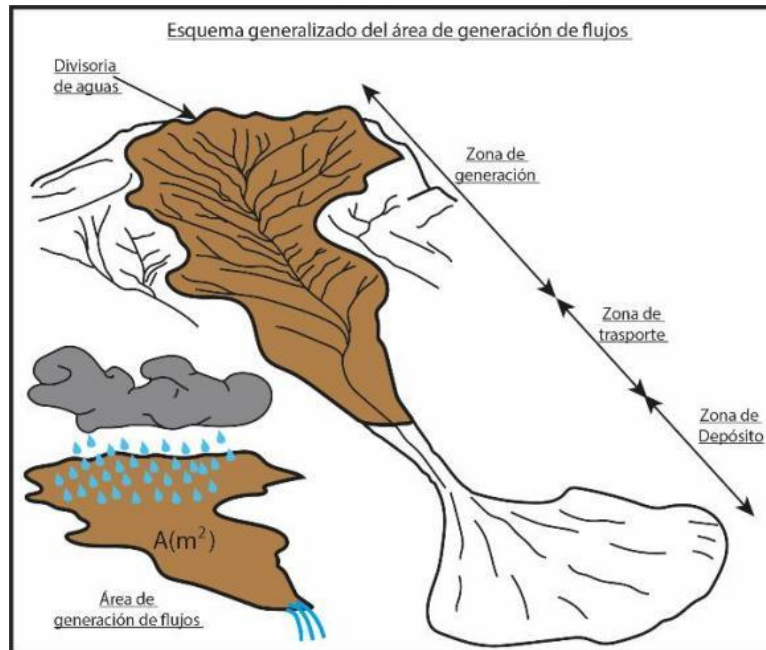


Figura 14. Esquema generalizado del área de generación de un flujo de detritos y lahares secundarios. (tomado de Soncco, Y. et al 2021. Libro de resúmenes extendidos XX Congreso Peruano de Geología, (2021).

### 6.1.3. Procedimiento para simulación en VolcFlow

#### 6.1.3.1. Preparación del modelo digital de elevación DEM

Previo a la simulación de los lahares en el VolcFlow, se debe preparar el modelo digital de elevación, con la finalidad de optimizar el tiempo de duración de las simulaciones y el reconocimiento correcto por el programa VolcFlow. Dicha preparación del DEM se realiza en el software Surfer, herramienta informática que permite la creación de mapas, visualización de datos en 2D Y 3D, geoprocésamiento. El procesamiento de cambio de formato necesario del DEM es el siguiente:

1. Abrir el DEM que por defecto se encuentra en formato .tiff
2. Se guarda sin modificar, en formato GRD Surfer 6 Binary Grid (.grd); ya que este es el formato que ha sido programado para que VolcFlow reconozca el DEM.
3. Posteriormente tendremos ya exportado el DEM en formato “.grd” listo para ingresarlo a nuestros parámetros de entrada de VolcFlow.

#### 6.1.3.2. Definición de la fuente

La fuente debe ser definida con un área específica para ser ingresada en VolcFlow. Dicha área debe estar representada de color negro en un archivo ráster .tiff, con transparencia y del mismo tamaño que nuestro DEM a utilizar en las simulaciones, lo cual podremos realizarlo en el software Adobe Photoshop CS6.



Con el procedimiento antes indicado se logra obtener un archivo .tiff de nuestra área fuente, con transparencia y del mismo tamaño de nuestro DEM que se ingresa en VolcFlow, lo cual es clave para VolcFlow corra correctamente sin errores.

### 6.1.3.3. Ingreso de datos en VolcFlow

Para realizar simulaciones con el código VolcFlow, se necesita de un script adicional de fuente que debe ser desarrollado particularmente, en el cual se especifican archivos de entrada como un Modelo Digital de Elevación (DEM), el área de la fuente que se va a simular y se especifican los archivos de salida, que pueden ser una serie de datos a exportar o simplemente un video de la simulación realizada; teniendo la opción de al final de cada simulación poder manipular los resultados, existen opciones en MatLab para exportar archivos .tiff .img .jpg de los depósitos de cada simulación o incluso realizar representaciones en 3D.

Aquí se especifica el DEM del área en la cual realizaremos la simulación en formato (.grd), el área de la fuente del material en formato .tiff, las dimensiones en pixeles del área de la simulación (tamaño en pixeles de nuestro DEM), el tiempo activo de alimentación del material, el volumen del material (Cuadro 8), tiempo máximo de la simulación y el valor de la gravedad.

## 6.2. Volúmenes empleados en la simulación de flujos de detritos (lahares)

*Cuadro 8. Cálculo de volumen del lahar de las quebradas del distrito de Yanahuara, resultado de la multiplicación del área de generación de lahares por los distintos grados de precipitación (baja, media y alta).*

Qda/Río	Área de generación de lahares	Precipitación			Volumen		
		BAJA	MODERADA	ALTA	Alto peligro	Moderado peligro	Bajo peligro
Qda Chullo	21905611	0.025	0.05	0.125	912733.8	1825467.6	4563669.0
Cañón del Río Chili	95206775	0.025	0.05	0.125	3306139.3	6612278.6	16530696.5

Según la simulación de flujo de detritos (lahares) para el distrito de Yanahuara, el área afectada ante un nivel de peligro alto sería de 0.3 km<sup>2</sup>, para el nivel de peligro moderado la zona afectada sería 0.5 km<sup>2</sup> y para el nivel de peligro bajo la zona afectada se extendería a 1.1 km<sup>2</sup> (Figura 15).

### 6.3. Resultados de simulación de flujo de detritos (lahares) en el distrito de Yanahuara.

#### MAPA DE LAHARES DEL DISTRITO DE YANAHUARA

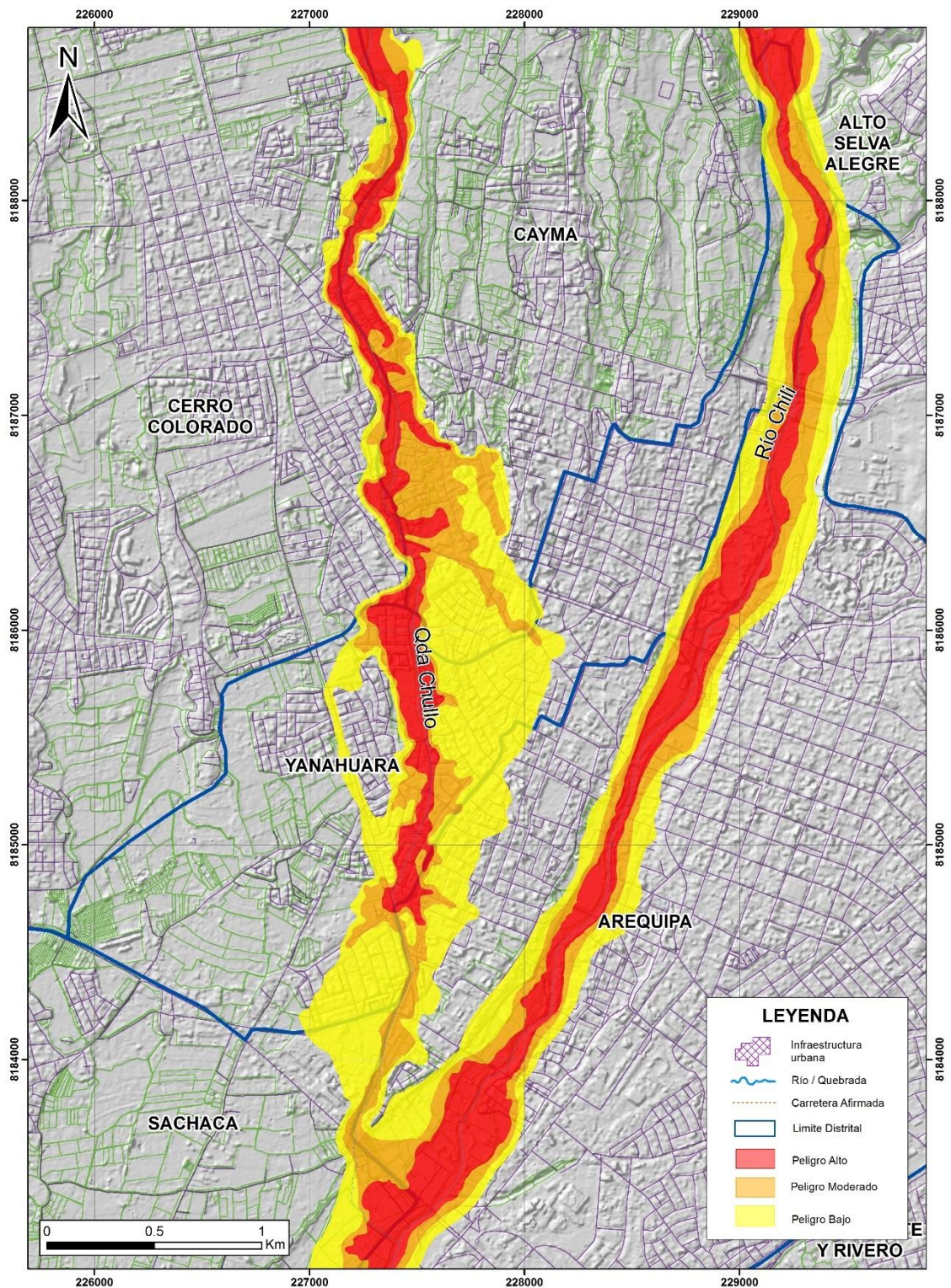


Figura 15. Mapa de peligros por flujo de detritos (lahares) en el distrito de Yanahuara.

## 7. POSIBLE INFRAESTRUCTURA AFECTADA POR FLUJOS DE DETRITOS (LAHARES)

Se ha considerado como infraestructura a los cruces afirmados, instituciones educativas (inicial, primaria y secundaria), puentes, cruce afirmado y compañía de bomberos; sin embargo, en cercanías a las quebradas también se ven expuestas las viviendas para lo cual se requiere un estudio más detallado en esos sectores.

Estas infraestructuras o zonas con posible afectación se encuentran en las 2 quebradas simuladas del distrito de Yanahuara (Figura. 16) como se muestra en el (cuadro 9).

*Cuadro 9. Ubicación (UTM WGS84) de los puntos críticos y el nivel de peligrosidad en las quebradas que atraviesan el distrito de Yanahuara.*

Nombre de quebrada	Numeración	Punto crítico	Este	Norte	Nivel de peligrosidad
Chullo	1	Cruce afirmado	227534.8	8185486.6	Alto
	2	Cruce afirmado	227552.8	8185248.9	Alto
	3	Cruce afirmado	227498.5	8185057.9	Alto
	4	I.E. Arequipa -Akup	227271.6	8186093.1	Alto
	5	Compañía de Bomberos Renzo Tomos Cans de Garay Nt140	227450.1	8185838.5	Alto
	6	I.E. Rayito de Luz	227525.6	8185502.6	Alto
	7	I.E. Regina Mundi	227451.3	8185064.4	Alto
	8	I.E. AQP English SRL	227518.0	8185049.8	Alto
	9	I.E. Ikade	227521.8	8185032.0	Alto
	10	I.E. Peruano Holandés Van't Hoff	227517.4	8185033.5	Alto
	11	I.E. San Andrés	227471.6	8184997.8	Alto
	12	I.E. Juan Landazuri Ricketts	227396.2	8184927.3	Alto
	13	I.E. Happy Garden	227477.1	8184871.4	Alto
	14	I.E. Sonrisas Baby	227456.7	8184814.7	Alto
	15	I.E. Cambridge E.I.R.L.	227469.1	8184789.9	Alto

## MAPA DE LAHARES DEL DISTRITO DE YANAHUARA

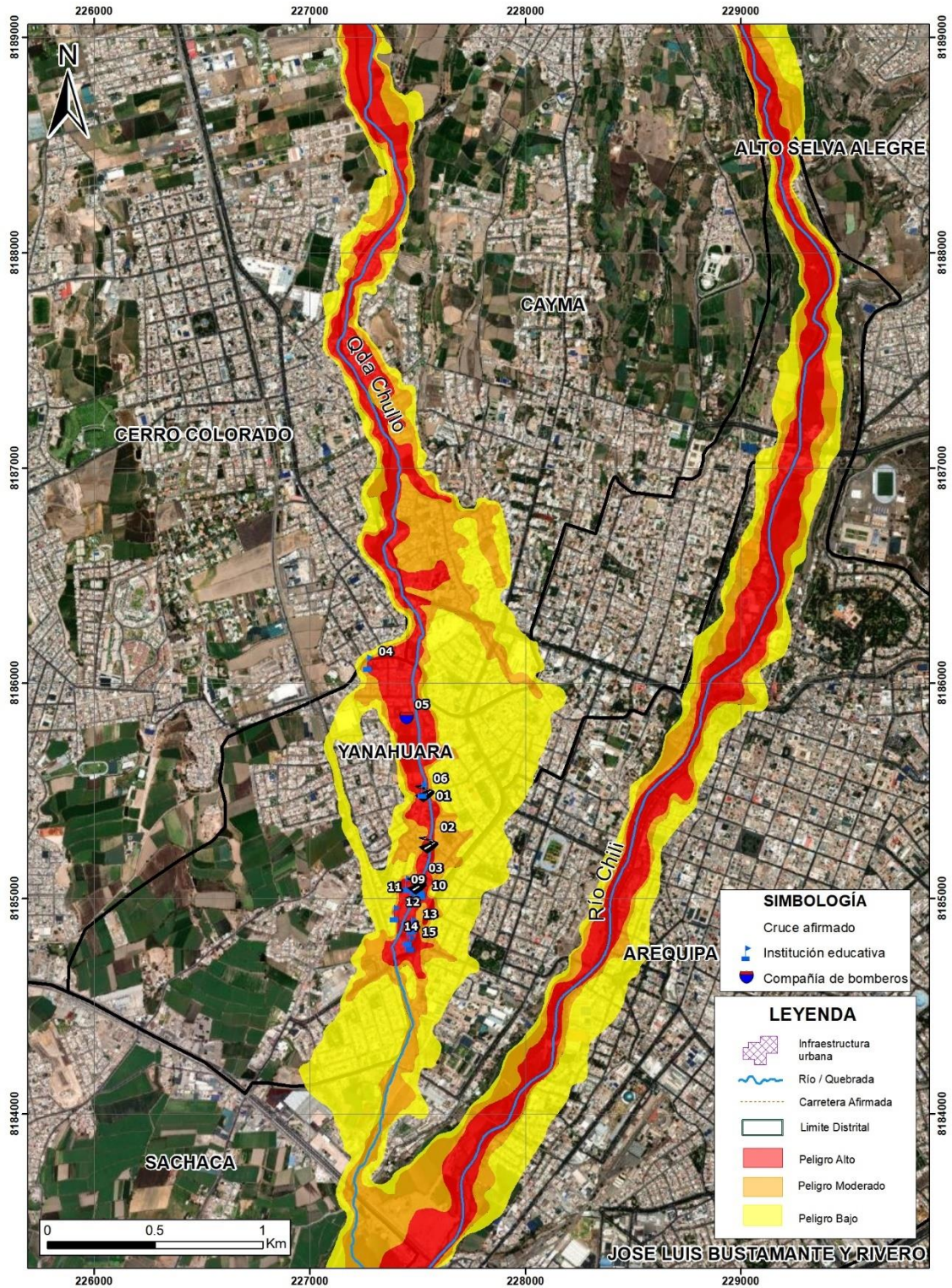


Figura 16. Mapa de puntos críticos en las quebradas del distrito de Yanahuara.

### 7.1. Simulación en la quebrada Chullo

Mediante la simulación de la quebrada Chullo se identifican 15 puntos críticos. Con un nivel de peligrosidad alto se encuentran 3 cruces, 1 compañía de bomberos y 11 Instituciones educativas.

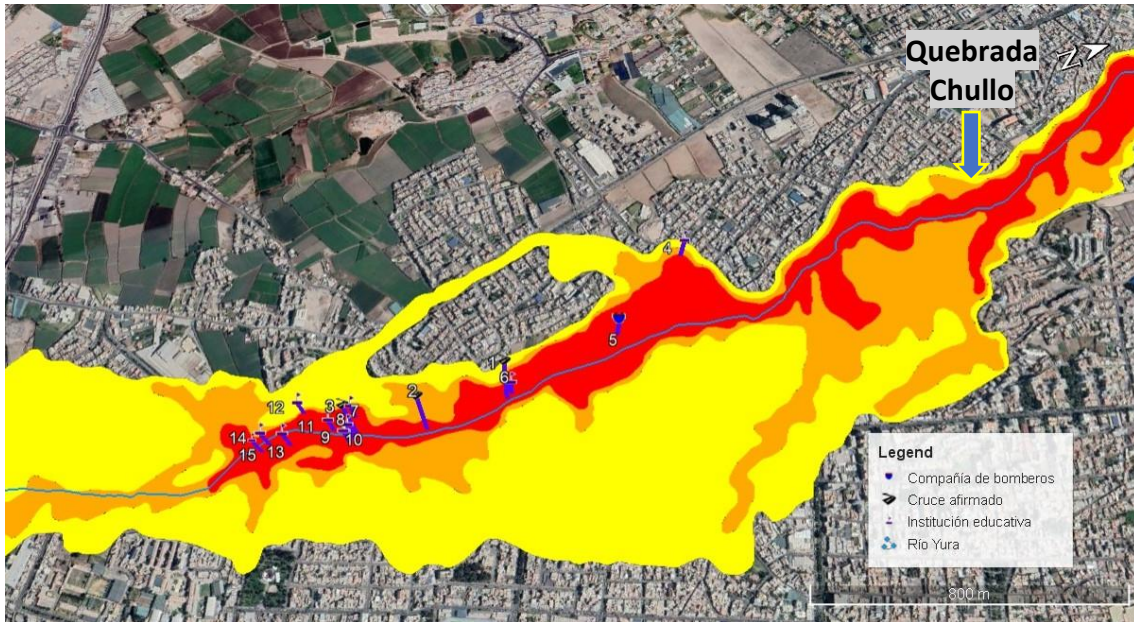


Figura 17. Simulación de lahares (peligros bajo, moderado y alto) en la quebrada Chullo perteneciente al distrito de Yanahuara.



Figura 18. Cruce afirmado, observándose muros improvisados que encauzan las quebradas  
Coord. UTM: 227534.8 E, 8185486.6 N



*Figura 19. La infraestructura de una institución educativa construida cerca al cauce de la Qda. Chullo, observándose muros improvisados. Coord. UTM: 227507.9 E, 8185062.4 N.*



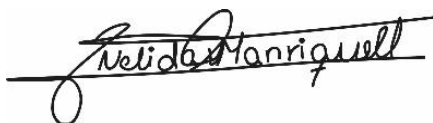
*Figura 20. Viviendas sobrepasando el muro en la Qda. Chullo. Coord. UTM: 227551.5 E, 8185249.5 N.*

## 8. CONCLUSIONES

1. El distrito de Yanahuara, se encuentra asentada principalmente sobre los depósitos de aluviales, disectadas por quebradas que descienden del complejo volcánico Chachani por donde se han emplazado depósitos de lahares del Pleistoceno (consolidados) y del Holoceno (poco consolidados y no consolidados).
2. Se identificaron 2 quebradas que atraviesan el distrito de Yanahuara por donde se pueden generar flujos de detritos (lahares) y se hizo el análisis de puntos críticos.
3. Se identificó 15 puntos críticos en el distrito de Yanahuara. Distribuidos de la siguiente manera:
  - a) 15 en la quebrada Chullo, entre ellas: 11 Instituciones educativas, 3 cruces afirmados, 1 compañía de bomberos, con un nivel de **peligrosidad alto** (ver Cuadro 9).
4. Según la simulación de flujo de detritos (lahares) para el distrito de Yanahuara, el área afectada ante un nivel de peligro alto sería de 0.3 km<sup>2</sup>, para el nivel de peligro moderado la zona afectada sería 0.5 km<sup>2</sup> y para el nivel de peligro bajo la zona afectada se extendería a 1.1 km<sup>2</sup>.

## 9. RECOMENDACIONES

1. Tomar en cuenta los resultados de simulación elaborado en el presente informe, para elaborar planes de contingencia en las zonas afectadas por flujos de detritos (lahares). Realizar las Evaluaciones de Riesgo – EVAR correspondientes
2. Implementar un sistema de alerta temprano (SAT) para los lahares sobre todo en las quebradas que atraviesan áreas urbanas del distrito de Yanahuara.
3. Se deben ampliar y no reducir los cauces de las quebradas, se debe respetar su cauce natural. Realizar la limpieza periódica del cauce.
4. Se sugiere construir muros de contención o disipadores de energía, para ello se debe realizar un estudio complementario en tramos de quebradas identificados como puntos críticos.
5. La autoridad local (Municipalidad) pertinente debe emitir ordenanzas municipales que restrinjan la construcción de viviendas en zonas de alto peligro por flujos de detritos (lahares), cauces de quebradas, en fajas marginales o límite natural de un río o quebrada.
6. Sensibilizar a la población a través de talleres y charlas con el objetivo de concientizar en Gestión del Riesgo de Desastre para evitar construcción de viviendas o infraestructura área susceptibles a la ocurrencia de lahares.



Ing. Nélida Manrique Llerena



MSC. JERSY MARIÑO SALAZAR

Director de Geología Ambiental y Riesgo Geológico



## **BIBLIOGRAFÍA**

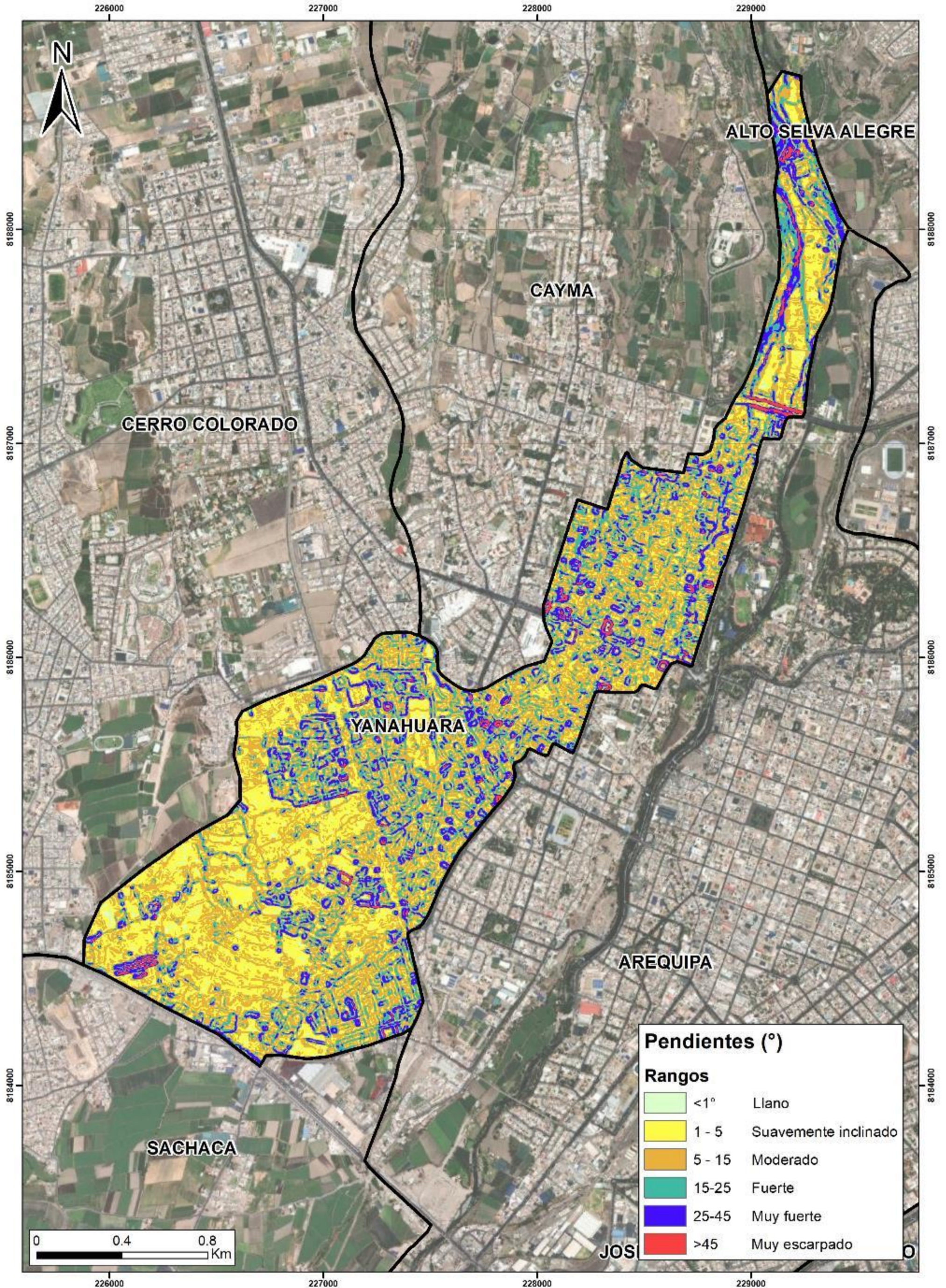
- Aguilar, R. V. (2020). Problemática de la torrentera Chullo. Opinión técnica N° 006, 12.
- Córdoba, G., G, V., F, S. M., G, V. J., D, B., & G., S. (2015). Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordón Caulle eruption. European Geosciences union, 9p.
- Fuentes, D;. (2015). Lahares secundarios: análisis de parámetros físicos en depósitos pirolásticos y su relación con los mecanismos generadores. Tesis Pregrado: Universidad de Chile.
- INEI. (2017). Instituto Nacional de Estadística e Informática, Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Lima.
- INEI. (2017). Instituto Nacional de Estadística e Informática, Resultados definitivos sobre la Población Económicamente Activa del departamento de Arequipa de los Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Lima.
- INGEMMET. (Extraído el 03 de febrero del 2022). Observatorio vulcanológico del Ingemmet (OVI). Obtenido de Tipos de erupciones: , desde [http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page\\_id=102#:~:text=Las%20erupciones%20volc%C3%A1nicas%20son%20el,roca%20fundida%2C%20gases%20y%20cristales.&text=Si%20los%20gases%20del%20magma,a%20la%20superficie%20sin%20explotar](http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=102#:~:text=Las%20erupciones%20volc%C3%A1nicas%20son%20el,roca%20fundida%2C%20gases%20y%20cristales.&text=Si%20los%20gases%20del%20magma,a%20la%20superficie%20sin%20explotar).
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo geológico. (2022). Evaluación de peligros geológicos por flujo de detritos (lahares) en el centro poblado Yalaque y en la quebrada El Volcán. Distritos La Capilla y Quinistaquillas, Provincia de General Sánchez Cerro, Departamento Moquegua. 54p: ngemmet, Informe Técnico N° A7212.
- Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. Geological Society of America Bulletin, v. 110, N°8, 12p.
- Kelfoun, K., & Druit, t. T. (2005). Numerical modelling of the emplacement of the 7500 BP Socompa rock avalanche, Chile. J. Geophys. Res., B12202, doi : 10.1029/2005JB003758, 13p.
- Lugo, J. (1988). Elementos de geomorfología aplicada: Métodos cartográficos. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J., & Macedo, L. (2016). Geología y mapa de peligros del volcán Misti. INGEMMET. Lima: Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica.
- Paquereau Lebti et al. (2006). Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 24 p.
- Sánchez, R., Mayorga, R., & Urrego, L. &. (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. Simposio Latinoamericano de Control de Erosión, 1, Bucaramanga, 8p.

- Siebert, L., Cottrell, E., E, V., & AndrewsA. (2015). The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition). U.S. National Museum of Natural History, Smithsonian Institution, Washington, DC, USA.
- Tilling, R. (1993). Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos, Santa Fé, Nuevo México. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 2-3 julio 1989. [s.l.], 125p.
- Vallance, J. W. (2001). Lahars. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, Encyclopedia of Volcanoes. Londres: Academic Press.
- Vallance, J., & Iverson, R. (2015). Lahars and their deposits. Encyclopedia of volcanoes, 26p.
- Vásconez, R., Hall, M., & Mothes, P. (2009). Devastadores flujos de lodo disparados en el volcán Carihuairazo por el terremoto del 20 de Junio de 1698. Revista Politécnica. Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, 20p.
- Vela, J., & D, H. (2020). Inspección geológica y evaluación de daño en los distritos de Paucarpata, Socabaya, Jacobo Hunter, Cerro Colorado y Yanahuara afectados por huaicos del 23 al 25 de febrero del 2020. INGEMMET, 39.
- Vera, P., Ortega, P., Casa, E., Santamaría, J., & Hidalgo, X. (2019). Modelación Numérica y Mapas de Afectación por Flujo de Lahares Primarios en el Drenaje Sur del Volcán Cotopaxi. Revista Politécnica, 11p.

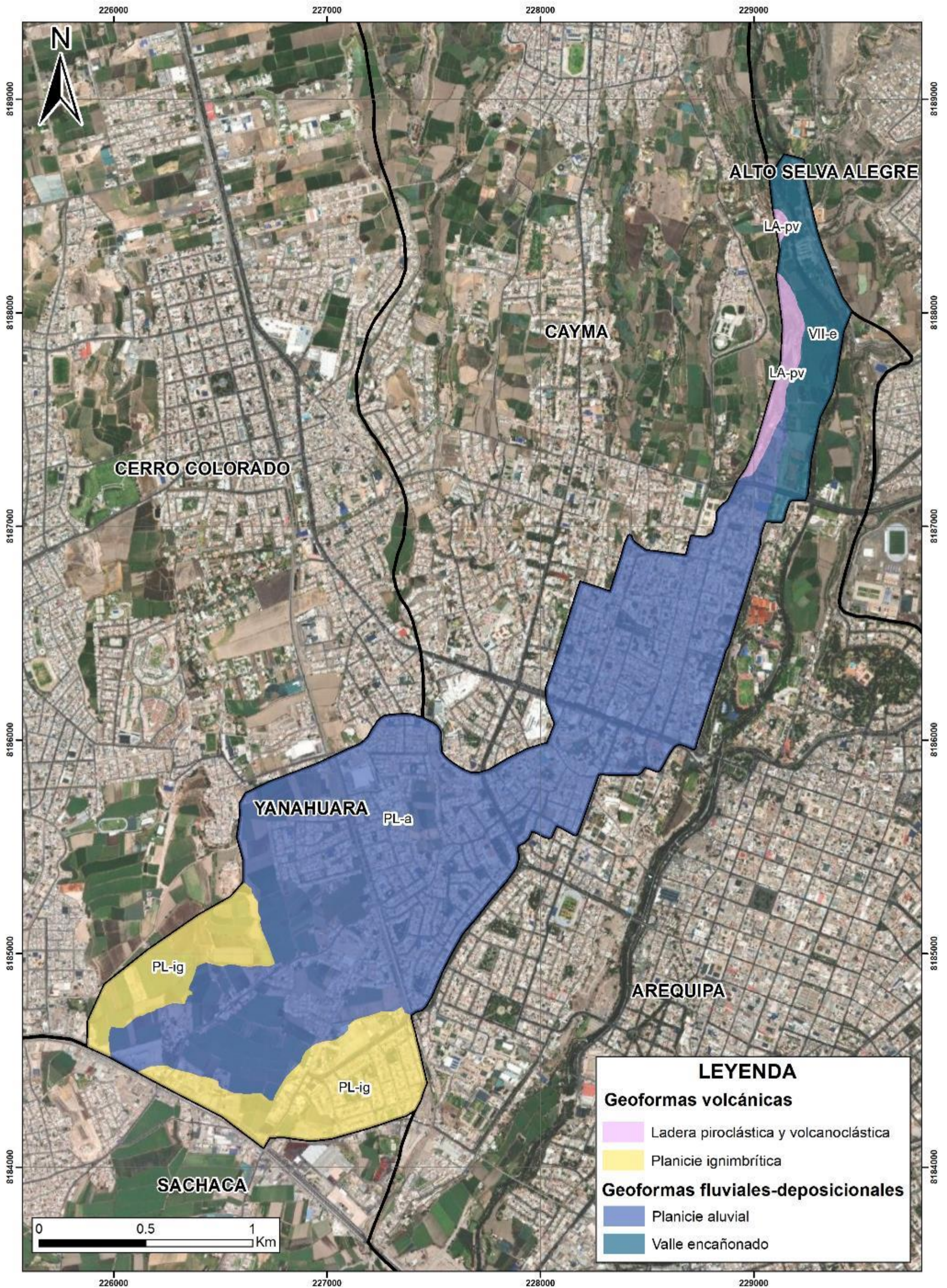
## **ANEXO: MAPAS**

- 1:** Mapa de pendientes del terreno del distrito de Yanahuara. Fuente: Elaboración Propia.
- 2:** Mapa geomorfológico del distrito de Yanahuara a partir de la clasificación de unidades geomorfológicas de la especificación técnica DGAR-ET-002 V-2 elaborada por el INGEMMET a escala 1:25,000. Fuente: Elaboración Propia.
- 3:** Mapa geológico del distrito de Yanahuara. Fuente: Elaboración Propia.
- 4:** Mapa de peligros flujo de detritos (lahares), en el distrito de Yanahuara. Fuente: Elaboración Propia.

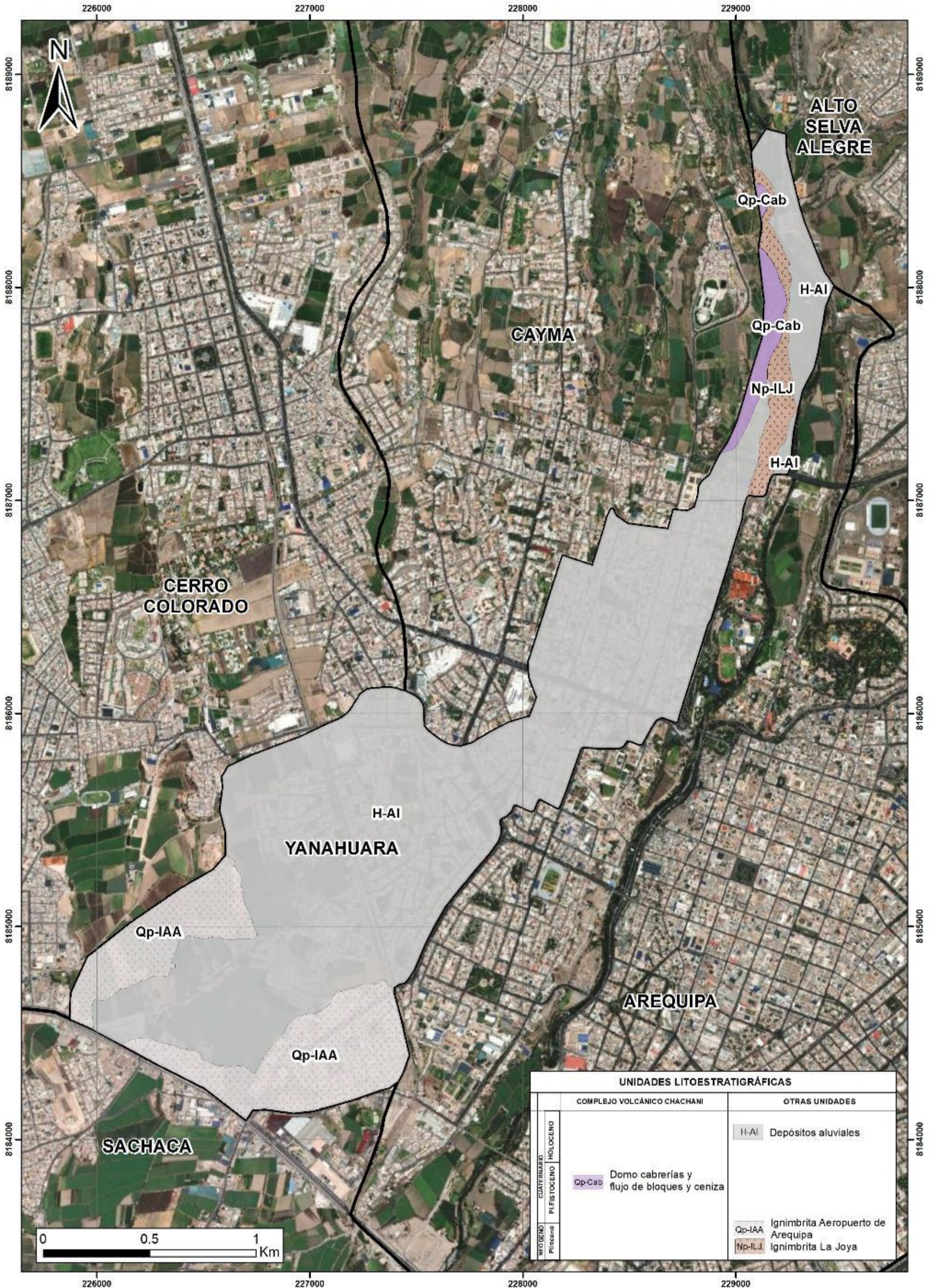
# MAPA DE PENDIENTES DEL DISTRITO DE YANAHUARA



# MAPA GEOMORFOLÓGICO DEL DISTRITO DE YANAHUARA



# MAPA GEOLÓGICO DEL DISTRITO DE YANAHUARA



		UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	
		COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI	OTRAS UNIDADES
EPOCAs	CUATERNARIO	Qp-Cab Domo cabrerías y flujo de bloques y ceniza	H-AI Depósitos aluviales
	PLEISTOCENO		
NEÓGENO	Plioceno		Qp-IAA Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa
			Np-ILJ Ignimbrita La Joya

# MAPA DE PELIGROS POR FLUJO DE DETRITOS (LAHARES) SECTOR DE YANAHUARA

