

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A6912

EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS EN LA QUEBRADA EL PATO, TRAMO VILLA CONFRATERNIDAD (ZONAS A, B, C Y D)



**Región Arequipa
Provincia Arequipa
Distrito Alto Selva Alegre**



**JULIO
2019**

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 UBICACIÓN	1
1.2 ACCESIBILIDAD	2
II. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	3
2.1 Geformas de carácter tectónico degradacional y erosional.....	3
2.1.1 Unidad de colinas.....	3
III. ASPECTOS GEOLÓGICOS	4
IV. PELIGROS GEOLÓGICOS IDENTIFICADOS	8
4.1 PELIGROS VOLCÁNICOS.....	8
4.2 PELIGROS POR MOVIMIENTOS EN MASA	16
4.2.1 Caída de rocas.....	18
4.2.2 Derrumbes	19
V. SIMULACIÓN DE FLUJOS DE DETRITOS (HUAICO) EN LA QUEBRADA EL PATO	21
VI. PROPUESTA DE MEDIDAS PREVENTIVAS	25
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
REFERENCIAS	33

I. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET, dentro del ámbito de sus competencias y funciones tiene por misión “Identificar, estudiar y monitorear los peligros asociados a movimientos en masa, actividad volcánica, aluviones, tsunamis y otros”. Asimismo, establece que la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR) “es el órgano de línea del INGEMMET que realiza investigaciones, programas y proyectos Geoambientales, Geotécnicos y de Evaluación y Monitoreo de Peligros Geológicos del territorio nacional”. Además, indica dentro de sus funciones realizar la evaluación monitoreo y elaboración de los mapas de peligros geológicos (deslizamientos, aluviones, aludes, volcanes, fallas activas y tsunamis”. Es a partir de ello, que el INGEMMET a través de la ACTIVIDAD 7 que realiza la DGAR, brinda asistencia técnica en materia de peligros geológicos a los gobiernos local, regional y nacional, con el objetivo de reducir el riesgo de desastres en nuestro país.

El Subgerente de Gestión de Riesgos de Desastres de la Municipalidad Distrital de Alto Selva Alegre, región Arequipa, mediante Oficio N° 149-2018-SGGRD-GDU/MDASA, dirigida al presidente del Consejo Directivo del INGEMMET, solicita se realice un estudio de peligrosidad en la quebrada “El Pato”, tramo Villa Confraternidad en las zonas A, B, C y D. El Director de Geología Ambiental y Riesgo Geológico designó a los especialistas Jessica Vela y Yhon Soncco, para realizar la inspección geológica del lugar en mención.

Dicho informe técnico que se pone a consideración de los interesados, realiza un análisis de los peligros volcánicos relacionados al volcán Misti como de procesos de movimientos en masa que puedan resultar de la ocurrencia de lluvias o sismos en la región.

1.1 UBICACIÓN

La zona de estudio se localiza en el distrito Alto Selva Alegre, provincia y región Arequipa. Se encuentra a 14 km al suroeste del cráter del volcán Misti y a 15 km al sureste del volcán Chachani (figuras 1 y 2).

La zona de estudio se encuentra en una altitud promedio de 2,570 m.s.n.m y las coordenadas geográficas son:

Latitud: - 16°21'13"S
Longitud: - 71°31'23"O



Figura 1. Cauce de la quebrada El Pato, tramo Villa Confraternidad de las zonas A, B, C y D ocupada por viviendas.

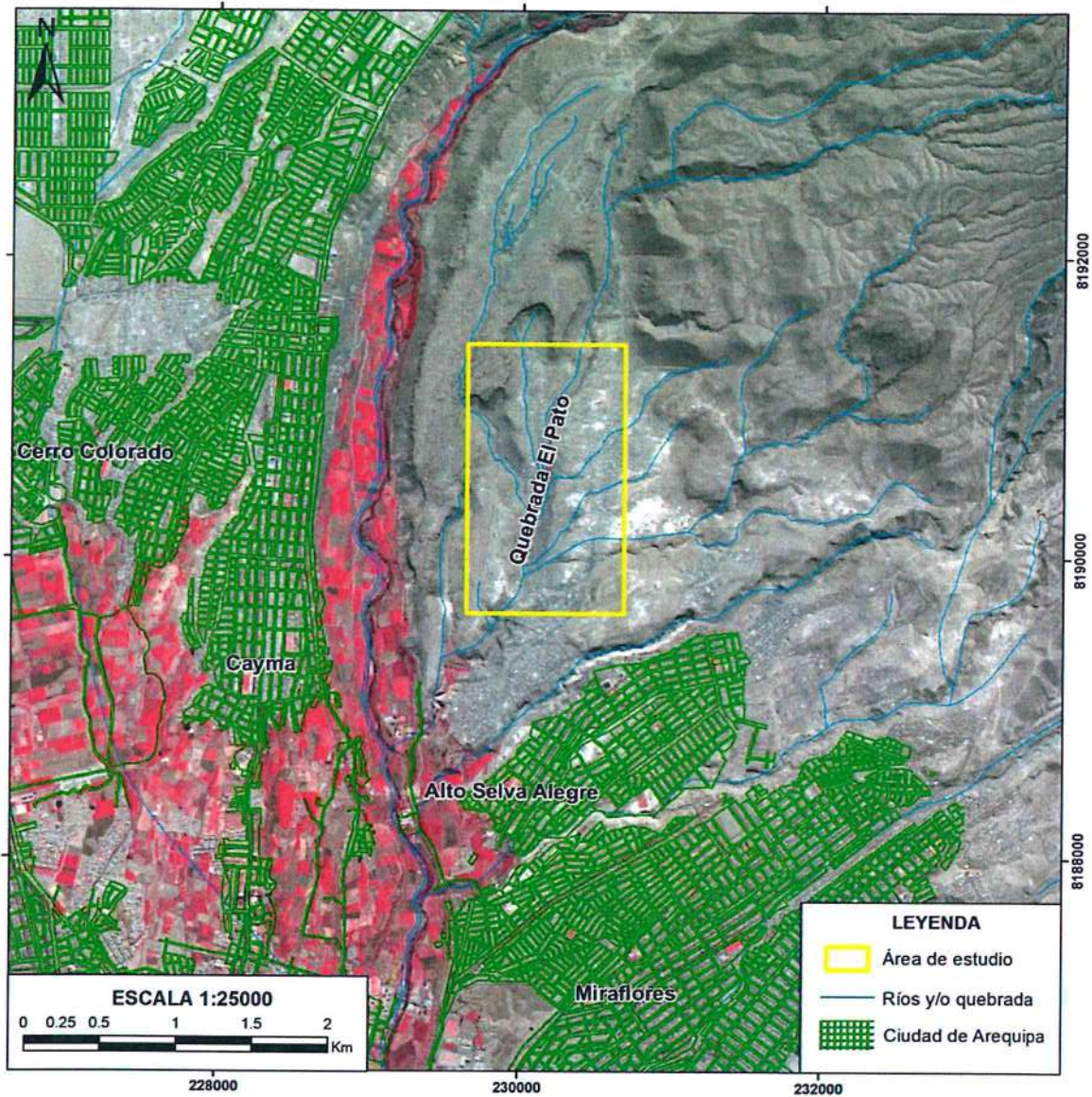


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio.

1.2 ACCESIBILIDAD

La zona es accesible desde el centro de la ciudad de Arequipa hacia la quebrada “El Pato” (distrito Alto Selva Alegre), en un tiempo aproximado de 30 minutos.

Tramo		Km.	Tipo de vía	Duración (h)
Centro de la ciudad de Arequipa	Quebrada “El Pato” (Alto Selva Alegre)	5.0	Asfaltada	0.30

II. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

En la zona de estudio y alrededores se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas:

2.1 Geoformas de carácter tectónico degradacional y erosional

Son geoformas resultantes del efecto progresivo de procesos morfodinámicos y degradacionales, originados por la actividad tectónica o sobre algunos paisajes construidos por procesos exógenos agradacionales; estos procesos conducen a la modificación parcial o total del relieve a través del tiempo geológico y bajo condiciones climáticas cambiantes (Villota, 2005). Los paisajes morfológicos, resultantes de los procesos denudativos forman parte de las cadenas montañosas, colinas, superficies onduladas y lomadas. Dentro de este grupo se tiene la siguiente unidad:

2.1.1 Unidad de colinas

Se extiende al norte y este de la ciudad de Arequipa. Las colinas tienen entre 50 y 200 m de altura, mediana pendiente (20 a 40°) y están surcadas por quebradas poco profundas. Está conformada por depósitos de avalanchas de escombros de los volcanes Misti y Pichu Pichu, así como depósitos de caídas y flujos de lava. Las colinas cónicas o Hummocks, son una morfología típica en depósitos de avalanchas de escombros, las cuales están asociadas a la presencia de megabloques. Algunas de estas colinas están siendo pobladas, especialmente en el sector este y norte de la ciudad de Arequipa. Dentro del área de la zona de estudios se distingue la siguiente subunidad.

Laderas de colinas en roca volcánica (Lc-rv)

Las laderas que existen en esta zona corresponden a colinas y márgenes de quebradas. Las laderas en las colinas se encuentran ocupadas por viviendas (figura 3). Las pendientes en las laderas de las colinas tienen entre 15° a 25° de inclinación, mientras que los márgenes de las quebradas (quebrada El Pato) tienen entre 35° a 60° (figura 4). Estas laderas están constituidas por depósitos volcánicos (flujos piroclásticos de pómez y ceniza, flujos piroclásticos de bloques y ceniza, lahares, depósitos de caída de lapilli de pómez del volcán Misti y depósitos aluviales poco cohesivos a sueltos).



Figura 3. Laderas de las colinas en el sector de la quebrada El Pato, ocupadas por viviendas.



Figura 4. Muestra el cauce de la quebrada El Pato.

III. ASPECTOS GEOLÓGICOS

El substrato rocoso (formaciones geológicas) más antiguo que aflora en el área de estudio y alrededores corresponden a la ignimbrita “La Joya” de hace 4.88 Ma y la ignimbrita Aeropuerto de hace 2.42 a 1.61 Ma (Paquereau *et al.*, 2006). Así mismo, afloran depósitos de flujos piroclásticos, sedimentos volcanoclásticos, depósitos de caídas de tefras, lahares y depósitos aluviales (figura 5).

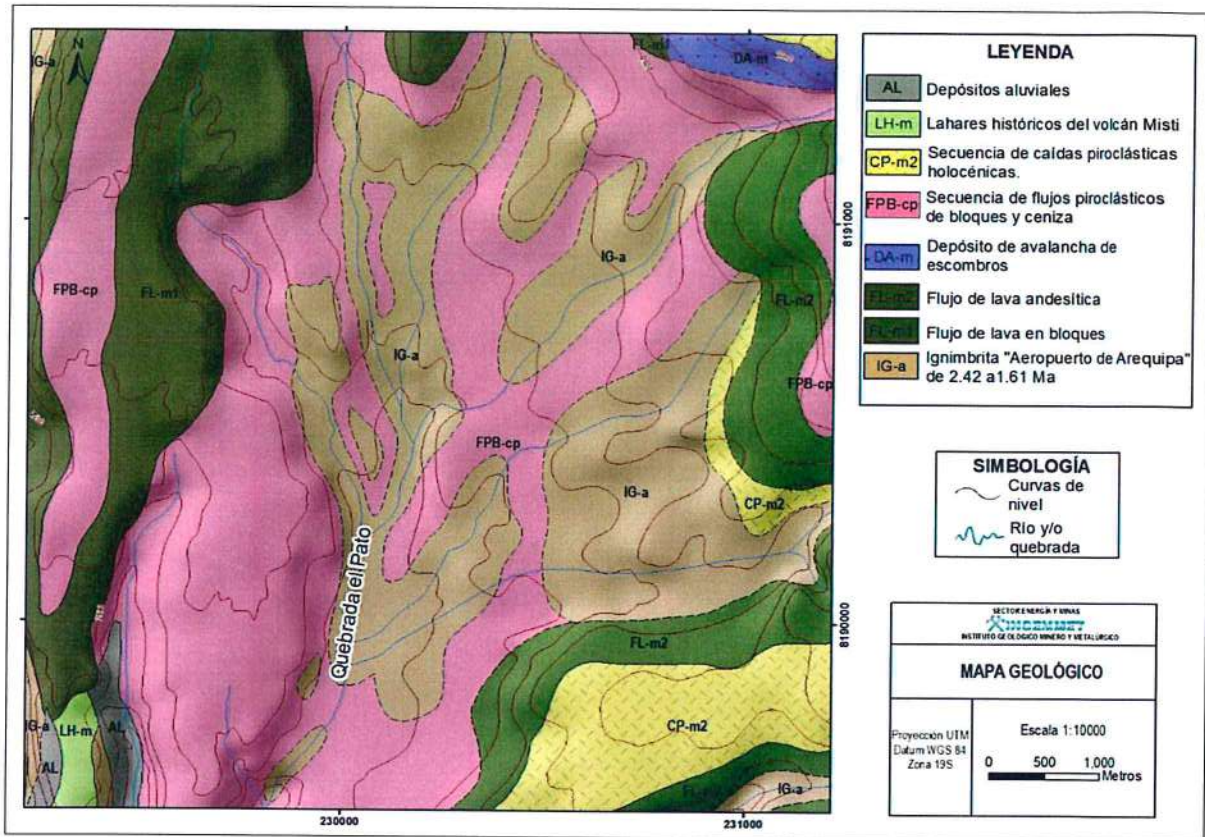


Figura 5. Mapa geológico de la zona de estudio y alrededores (Tomado de Mariño et al, 2016).

Las características de dichos depósitos y substrato rocoso son descritos a continuación:

- Ignimbrita "Aeropuerto de Arequipa" (IG-a).** Aflora en ambas márgenes del río Chili, cubre un área de más de 600 km², extendiéndose por el oeste hacia la zona del aeropuerto de Arequipa y por el sur hacia el río Chili. Dicho depósito posee espesores que varían entre 20 a 100 m. Tiene dos facies: una inferior de color blanco grisáceo, bastante consolidada y una superior de color rosado que se presenta no consolidada. Ha sido datada en 1.65 Ma (Paquereau et al., 2006). Estos depósitos están cubiertos por flujos piroclásticos de bloques y cenizas y flujo de barro (lahares) poco cohesivos del Misti. A la vez estos depósitos están cubiertos por material de relleno y desmonte de más de 5 m de espesor. Estos depósitos forman taludes casi verticales de 70° a 80° de inclinación (figura 6). Los depósitos de Ignimbrita son susceptibles a la ocurrencia de caída de rocas y derrumbes en la zona de estudio.

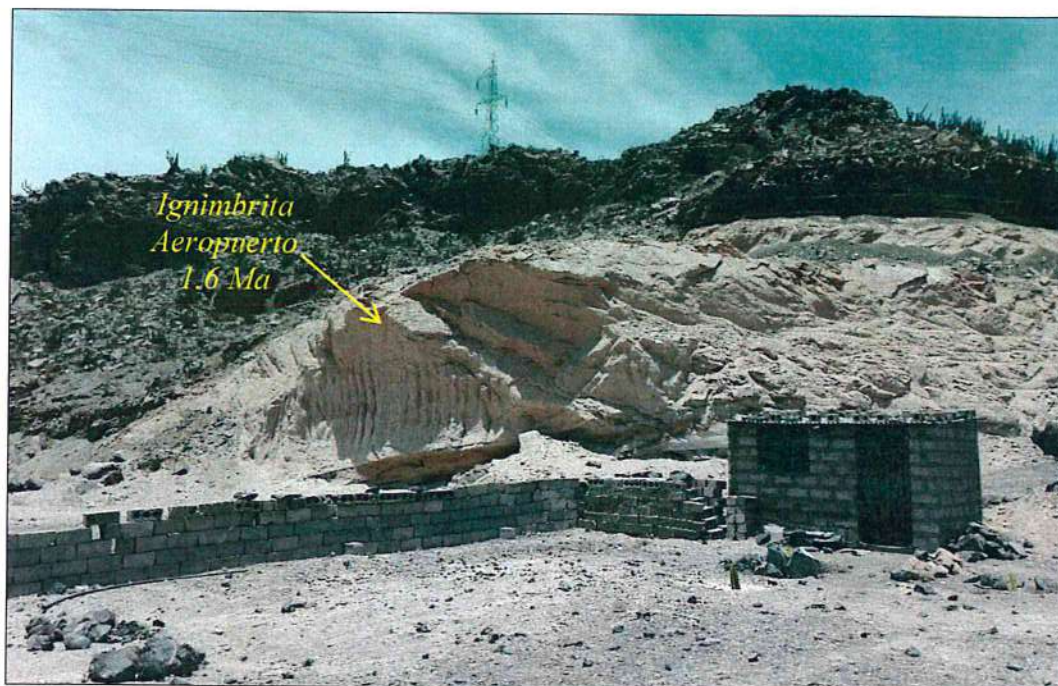


Figura 6. Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (1.6 Ma), aflora en la margen derecha de la quebrada El Pato, zona C. La ignimbrita posee coloración rosada y no está soldada. Vista al noroeste.

- b) **Flujos de lava en bloques (FL-m1-2).** Ocupan cerca de 3 km de largo por 2 km de ancho. En los alrededores de la zona de estudio esta secuencia alcanza 200 m de espesor. Son flujos de lava en bloques gris claros que se encuentran subyaciendo a los depósitos de avalanchas de escombros del volcán Misti. Estas lavas fueron datadas en 833 ka, Thouret *et al.* (2001). Los depósitos de lava son susceptibles a la ocurrencia de caída de rocas en la zona de estudio.
- c) **Depósitos de avalanchas de escombros (DA-m1-1).** Sus afloramientos se extienden hacia el sur, oeste y suroeste del Misti, entre 11 y 8 km del cráter. El depósito tiene un espesor promedio de 60 m y cubre una superficie aproximada de 40 km². Presentan una morfología típica de montículos o colinas pequeñas (hummocks), de hasta 70 m de alto.

El depósito presenta predominantemente facies de matriz y ocasionalmente facies de bloques, estos últimos rodeados normalmente por facies de matriz. La facie de matriz consta de clastos de tamaño milimétrico a centimétrico, los cuales se hallan bastante hidrotermalizados. En la facies de bloques, los clastos son de tamaño métrico, con muy escasa matriz. Los clastos se hallan bastante fracturados y poseen estructuras en rompecabezas, característica de este tipo de depósitos.

Los depósitos de avalanchas de escombros son susceptibles a la ocurrencia de derrumbes en la zona de estudio.

- d) **Secuencia de flujos piroclásticos de bloques y ceniza (FPB-cp).** Este depósito se distribuye ampliamente en la zona de estudio (figura 7). Presenta un espesor de un poco más de 8 m. Se originó producto de colapso de domos, el cual ha sido datado en 24.8 ka por Thouret *et al.* (2001). Los bloques miden hasta 0.4 m de diámetro, algunos ligeramente vesiculares y otros masivos. Estos depósitos cubren las ignimbritas “Aeropuerto de Arequipa” y a la vez están cubiertos en parte por lavas, flujos de barro y/o lahares, depósitos

de caídas piroclásticas y por material de relleno de más de 3 m de espesor. Estos depósitos forman taludes bastante inclinados de 70° a 80° de inclinación.

Los depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza son susceptibles a la ocurrencia de derrumbes en la zona de estudio.



Figura 7. Flujo piroclástico de bloques y ceniza en la quebrada El Pato, mide 7 m de espesor. Sobreyaciendo se encuentra el flujo de lava en bloques del volcán Misti datado en 833 ka.

- e) **Secuencia de caídas piroclásticas (CP-m2).** En la quebrada el Pato, se ha identificado depósitos de caída piroclástica de lapilli de pómez del volcán Misti (figura 8). Presenta un nivel intermedio de ceniza, de color gris, que en promedio mide 3 cm de espesor. El nivel inferior del depósito es de color gris amarillento, mientras que el superior es amarillo grisáceo, posiblemente por la alteración supérgena de las pómez; ambos niveles son ricos en líticos. El depósito posee entre 0.5 y 1.5 m de espesor.
- f) **Lahares históricos del volcán Misti (LH-m).** Presentan un espesor promedio de 2.5 m, se caracterizan por ser depósitos masivos, medianamente estratificados y compactos (figura 8). Se encuentran mal clasificados y contienen fragmentos líticos heterométricos y heterogéneos. Predomina la facie de matriz compuesto por ceniza de grano fino. Los fragmentos líticos y las pómez tienen tamaños menores a 3 cm.

También, se pueden apreciar secuencias volcano-sedimentarias generadas por la avenida de lahares (huaycos con material volcánico) cuyos depósitos se encuentran cubriendo todas las unidades antes mencionadas y cuyos afloramientos cubren áreas pequeñas rellenando paleo-relieves, no cartografiados a escala del mapa geológico. Estos depósitos evidencian varios eventos de huaycos que afectaron estas zonas en distintos periodos de tiempo.

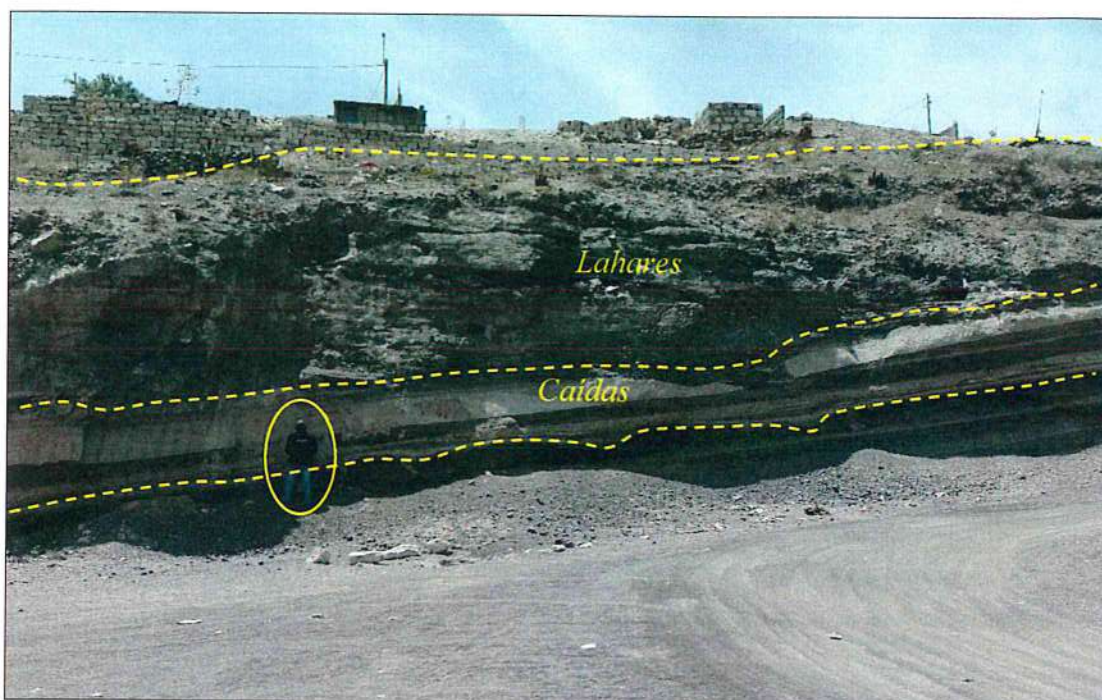


Figura 8. Secuencia piroclástica en la quebrada El Pato. En la base aflora secuencias de caída de lapilli de pómez, tiene espesores de hasta 1.5 m. Sobreyaciendo se encuentra una secuencia de lahares del volcán Misti, tiene 2.5 metros de espesor.

- g) **Depósitos aluviales (AL).** Presentan espesores que van de decímetros a varios metros. Conformados por bloques subredondeados a redondeados, distribuidos en una matriz de arena y limo. Presentan estructuras de estratificación cruzada y laminar.

IV. PELIGROS GEOLÓGICOS IDENTIFICADOS

Los peligros geológicos identificados en la zona de estudio son:

4.1 PELIGROS VOLCÁNICOS

El área de estudio se localiza a 14 km al suroeste del cráter del volcán Misti y está asentada sobre depósitos de caída de lapilli de pómez, flujos de lava y flujos piroclásticos de pómez y ceniza, generadas durante erupciones explosivas pasadas que presentó el volcán Misti.

En base al mapa de peligros múltiples del volcán Misti elaborado por el INGEMMET (figura 9), el tramo Villa Confraternidad se encuentra en una zona de moderado peligro (color naranja). Puede ser afectada por erupciones intensas o de baja magnitud, como la ocurrida en el siglo XV, que tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 1 a 2, y que se estima una recurrencia de 500 a 1500 años.

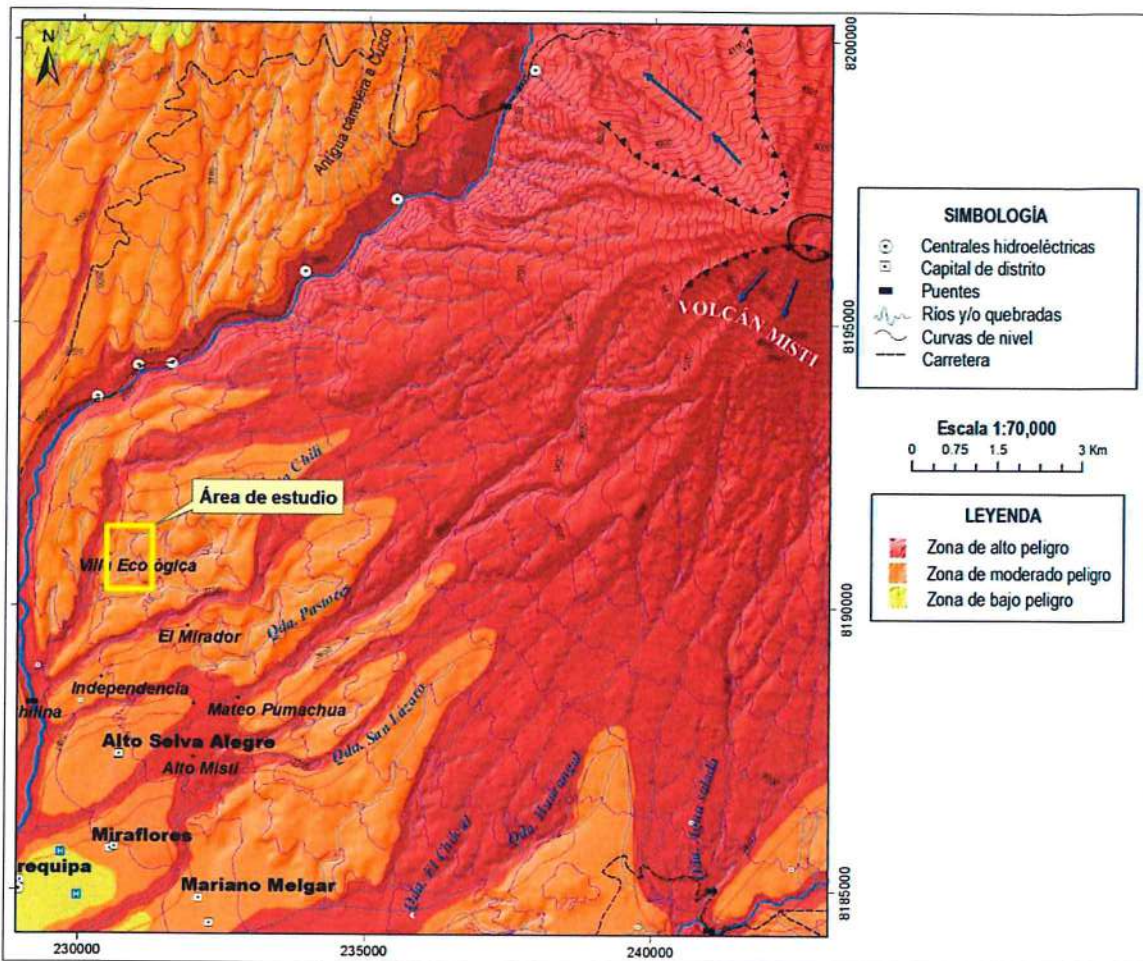


Figura 9. Mapa de peligros múltiples del volcán Misti, donde se muestra el área de estudio en la zona de moderado peligro (Mariño, 2016).

Así mismo durante una erupción del tipo vulcaniano con IEV de 1 a 2, la zona evaluada puede ser afectada por:

4.1.1 Por caídas de tefra (cenizas y lapilli de pómez).

Se generan cuando los fragmentos de roca son expulsados por un volcán hacia la atmósfera de manera violenta, formando una pluma de gases y ceniza de varios kilómetros de altura que posteriormente, al cabo de minutos u horas caen sobre la superficie terrestre por gravedad. Según los estudios geológicos efectuados sobre el Misti por Thouret *et al.* (2001) y otros, en caso de una reactivación del volcán Misti, el evento más probable a generarse sería una erupción explosiva leve con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 1-2; como la que presentó el Misti en el siglo XV (1440-1470 d.C.) o una actividad similar al volcán Ubinas (Moquegua) ocurrida entre los años 2006-2009; 2013-2017, Las emisiones de ceniza afectarían el distrito de Alto Selva Alegre, y por ende el área de estudio. Tomando como referencia el mapa de peligros por caída de ceniza del volcán Misti (Mariño, 2016), el área de estudio se encuentra en una zona de alto peligro (figura 10).

En el tramo Villa Confraternidad se han ubicado secuencias de depósitos de caída de lapilli de pómez de más de 1.5 m de espesor, emitidos por el volcán Misti, lo cual evidencia la ocurrencia de dicho fenómeno en este sector (figuras 11 y 12).

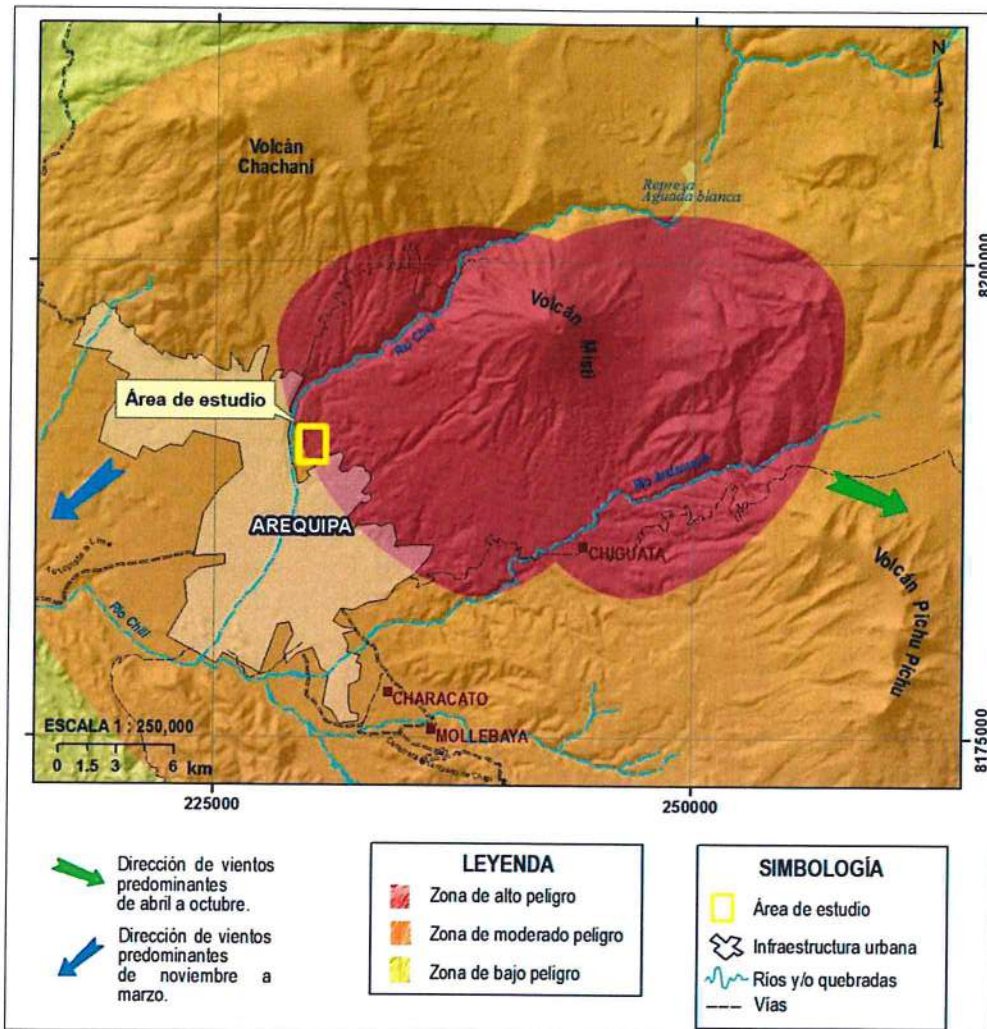


Figura 10. Mapa de peligros por caída de ceniza del volcán Misti (Mariño, 2016); muestra la zona evaluada en alto peligro.

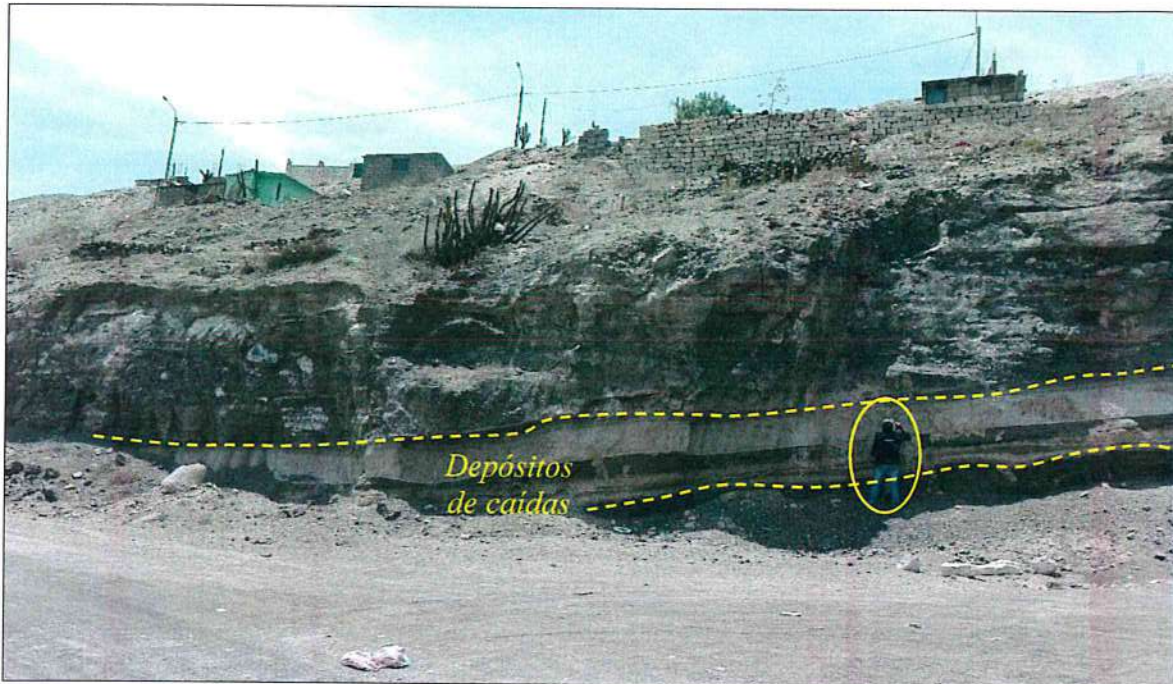


Figura 11. Potentes secuencias de caída de lapilli de pómez, margen izquierda de la quebrada El Pato.

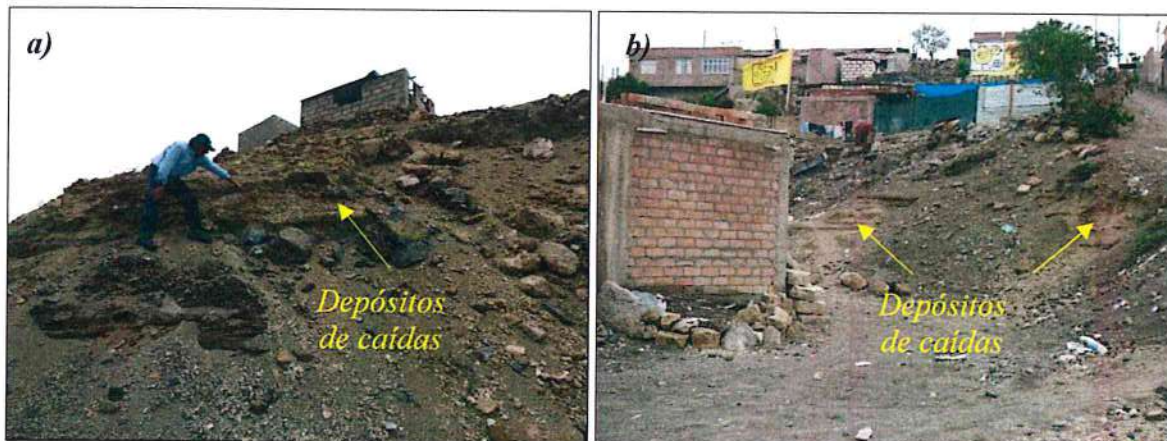


Figura 12. Depósitos de caída de lapilli de pómez en Villa Confraternidad a). zona D; b). Zona A.

4.1.2 Flujos piroclásticos

Son masas secas y muy calientes, constituidos por una mezcla de cenizas, piedra pómez, gases y fragmentos de roca que fluyen rápidamente por los flancos de los volcanes calcinando todo lo que encuentran a su paso. A 1 km al norte del tramo Villa Confraternidad, se ha observado depósitos potentes de flujos piroclásticos de bloques y ceniza del volcán Misti (figuras 13 y 14). El área de estudio podría ser afectada por este tipo de peligro, solo en caso de erupciones explosivas de moderada a gran magnitud que presente el Misti, como una erupción subpliniana o pliniana con un IEV mayor o igual 3. Un ejemplo es la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 2000 años antes del presente que tuvo un IEV igual a 4 (Harpel *et al.*, 2011).

Estos depósitos son fácilmente extraídos al golpe del martillo. Por lo cual se considera terrenos de mala calidad para cimientos.



Figura 13. Depósito potente de flujo piroclástico de bloques y ceniza. Tiene 7 m de espesor.



Figura 14. Viviendas de villa Confraternidad (zona D), asentadas sobre depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza del volcán Misti. Vista hacia el oeste.

4.1.3 Lahares y/o flujos de lodo

En los alrededores de la zona de estudio se han observado potentes depósitos de lahares del volcán Misti (figura 15). Los depósitos de lahares poseen litología heterogénea y son principalmente de tipo volcánico que fueron incorporados durante el transporte de los lahares o huaycos. Estos procesos naturales pueden generarse ante la ocurrencia de lluvias intensas durante erupciones, e incluso en periodos no eruptivos, pudiendo generar voluminosos lahares o flujos de lodo que descenderían por la quebrada El Pato. Las viviendas del tramo Villa Confraternidad, zonas A, B, C y D se encuentran localizadas dentro de la quebrada El Pato y son susceptibles a ser afectadas por flujos de lodo principalmente en tiempo de lluvias.

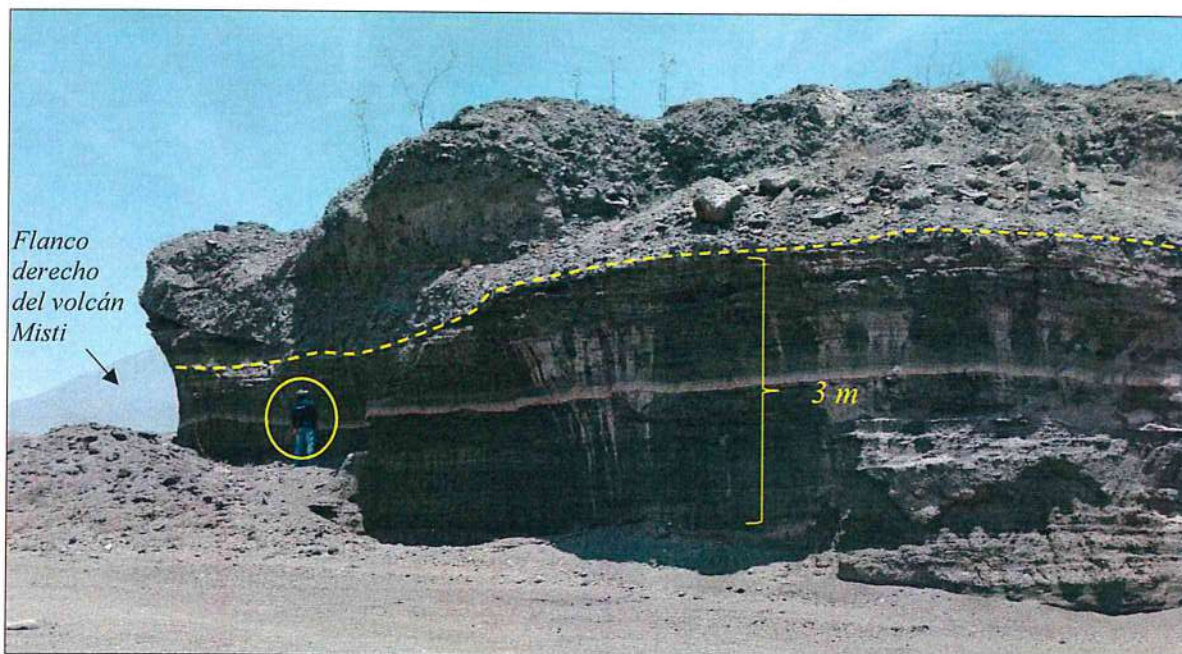


Figura 15. Margen derecha de la quebrada El Pato. Muestra depósitos de lahares del volcán Misti, que miden 3 metros de espesor.

En el tramo Villa Confraternidad, se distinguen antiguos depósitos de flujos de barro o lahares, capas delgadas de depósitos aluviales, cubiertos por material de desmonte. La potencia de este conjunto de depósitos es de 1m a 3 m de altura (figura 16).



Figura 16. Depósitos de lahares en la zona D, Villa Confraternidad.

Actualmente esta quebrada presenta una mayor cantidad de viviendas con relación a las que existían en años anteriores, se evidencia una expansión urbana sin planificación alguna, la cual está ocupando zonas de alto peligro a la ocurrencia de flujos de detritos. Comparando imágenes satelitales de los años 2004 y 2018, en la parte media y baja de la microcuenca, se aprecia el crecimiento poblacional de los últimos años (figura 17). Las imágenes satelitales del año 2018 muestran que muchas de las viviendas del tramo Villa Confraternidad se encuentran asentadas dentro de antiguos cauces de quebradas o torrenteras. Además, en la zona A de Villa Confraternidad, se observa el área más crítica a ser afectada por flujos de lodo, debido a que en esta zona se encuentra ubicada en la confluencia de tres afluentes de la quebrada El Pato (figura 18), lo que hace que el impacto de los flujos de lodo en esta zona sea aún más fuerte. En este sector la quebrada tenía un ancho de 50 m, sin embargo, esta ha sido reducida a aproximadamente de 20 m de ancho.

Las causas que originan flujos de lodos en la quebrada El Pato son:

- Laderas conformadas por depósitos coluviales inconsolidados (deleznables), depósitos de lahares y depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza. Materiales de fácil remoción por lluvias.
- Taludes de moderada pendiente.
- Ausencia de un sistema de drenaje que permita evacuar las aguas de lluvia.
- Mala ubicación de la vivienda: al borde y al pie del talud; en cauce de quebradas
- Áreas sin cobertura vegetal
- El factor desencadenante son las lluvias intensas periódicas y/o excepcionales.

Los antecedentes de lluvias intensas en esta quebrada son los siguientes.

Lluvias intensas del 11 de febrero del 2012
Lluvias intensas del 08 de febrero del 2013
Lluvias intensas del 1 de febrero al 24 de febrero del 2015
Lluvias intensas del 14 de enero al 23 de marzo del 2017
Lluvias intensas del 27 de enero del 2019

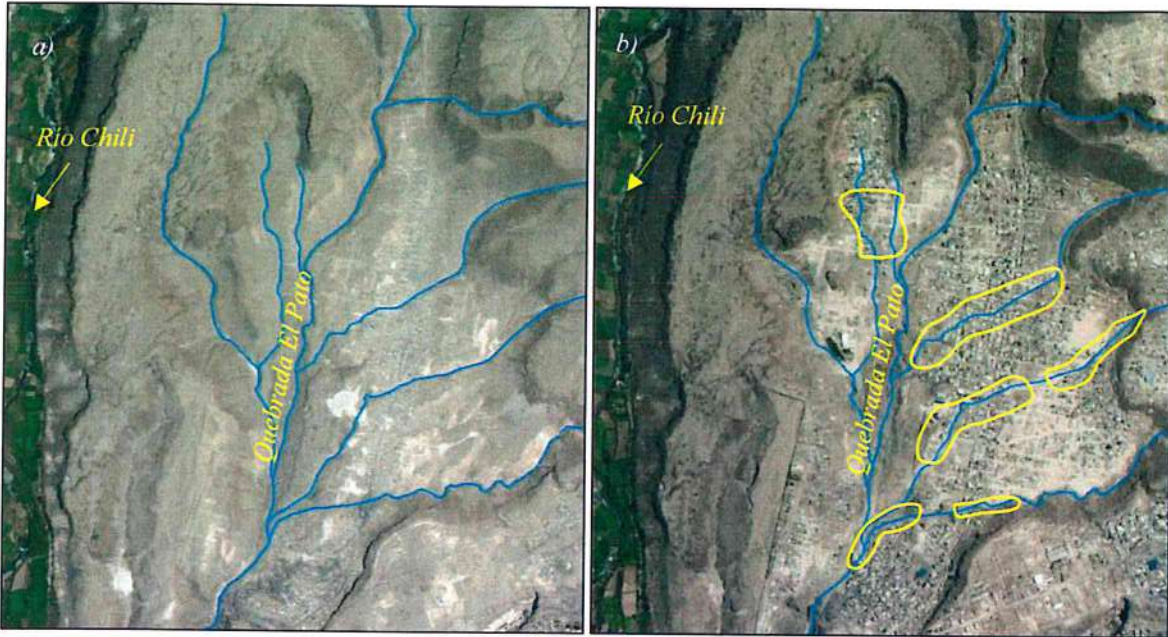


Figura 17. Imágenes comparativas de la Zona evaluada: a) Imagen satelital del año 2004. b) Imagen satelital del 2018, se aprecia la expansión urbana en los últimos catorce años en la quebrada El Pato y sus afluentes. Los polígonos amarillos muestran viviendas en alto peligro ubicadas dentro del cauce de los afluentes a la quebrada El Pato.

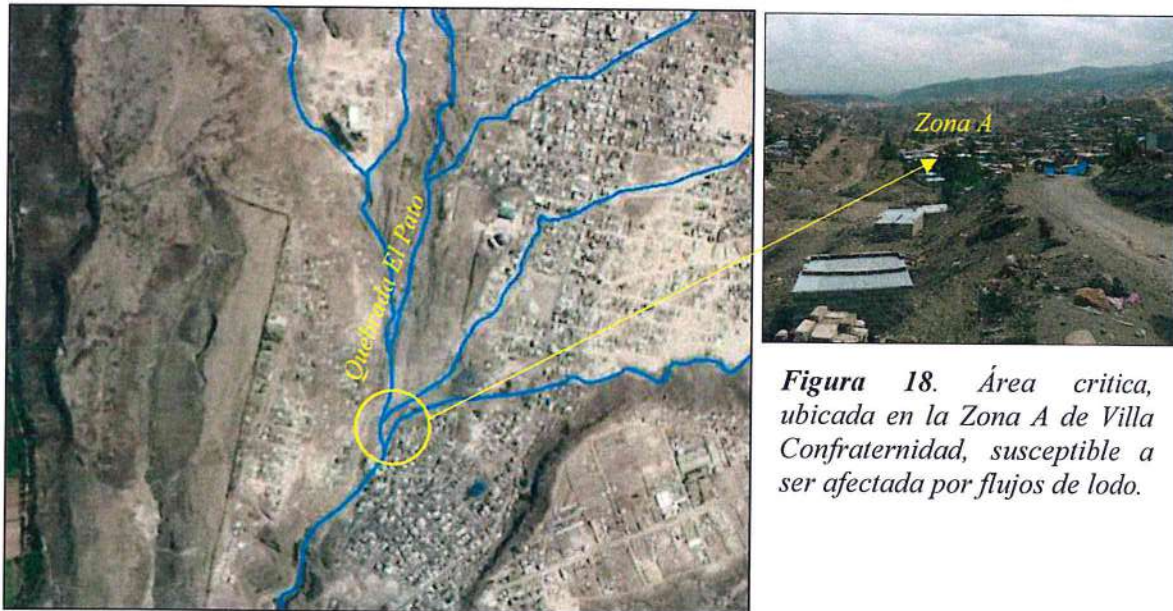


Figura 18. Área crítica, ubicada en la Zona A de Villa Confraternidad, susceptible a ser afectada por flujos de lodo.

En la parte alta de la quebrada se aprecian canteras donde se extrae material de construcción. Estos materiales están constituidos por bloques, gravas con matriz limo-arenosa, suelto y de fácil remoción por la lluvia, generando de esta manera flujo de detritos (figura 19). También se puede ver material de relleno o desmonte acumulado en el cauce y las riberas de la quebrada, así como depósitos de basura (figura 20). En casi todo su recorrido este material está disponible para ser acarreado por los flujos de lodo en caso de fuertes precipitaciones pluviales.

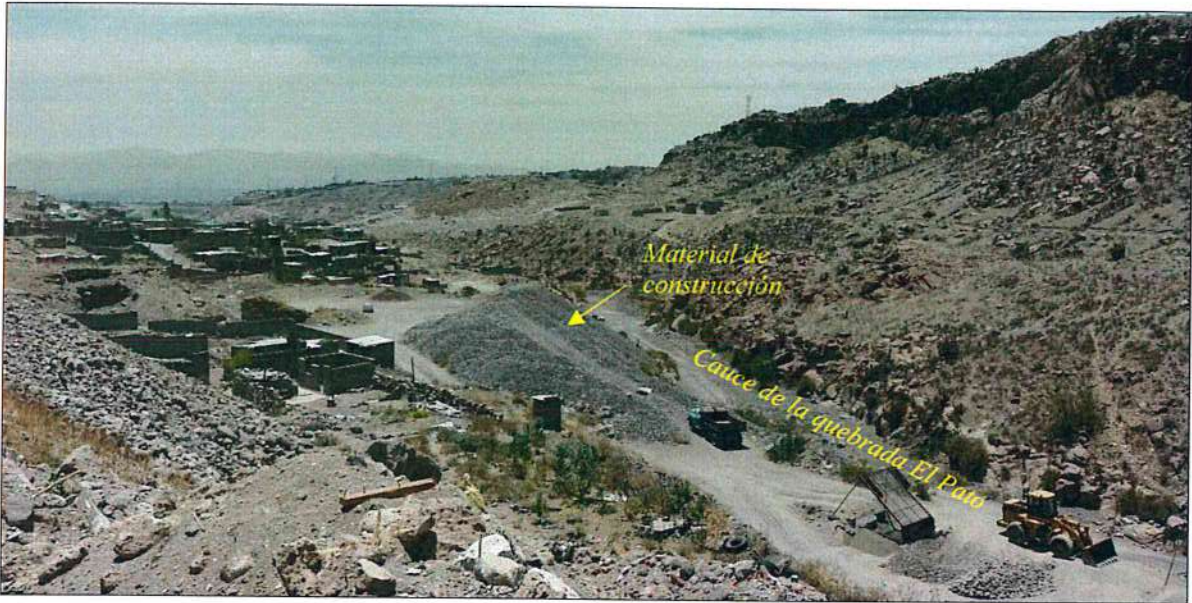


Figura 19. Muestra trabajos de extracción de material para construcción. Se observa bloques de rocas, cascajo y arena fina. Vista hacia el noreste.



Figura 20. Muestra depósitos de basura en la quebrada El Pato.

4.2 PELIGROS POR MOVIMIENTOS EN MASA

El tramo Villa Confraternidad zonas A, B, C y D del distrito Alto Selva Alegre, ubicada dentro de la quebrada El Pato, está en pleno proceso de expansión urbana sin control, ni planificación, ubicándose sobre áreas propensas a sufrir peligros geológicos, como son cauces de antiguas quebradas y laderas de cerros cuyos terrenos son muy frágiles de ser erosionadas por las aguas de lluvias. En estas zonas las viviendas son de material noble (cemento y ladrillo) y algunas viviendas están construidas con material rustico (sillar). Los principales peligros por movimiento en masa a los cuales está expuesto la zona de estudio son caída de rocas y derrumbes (figura 21).

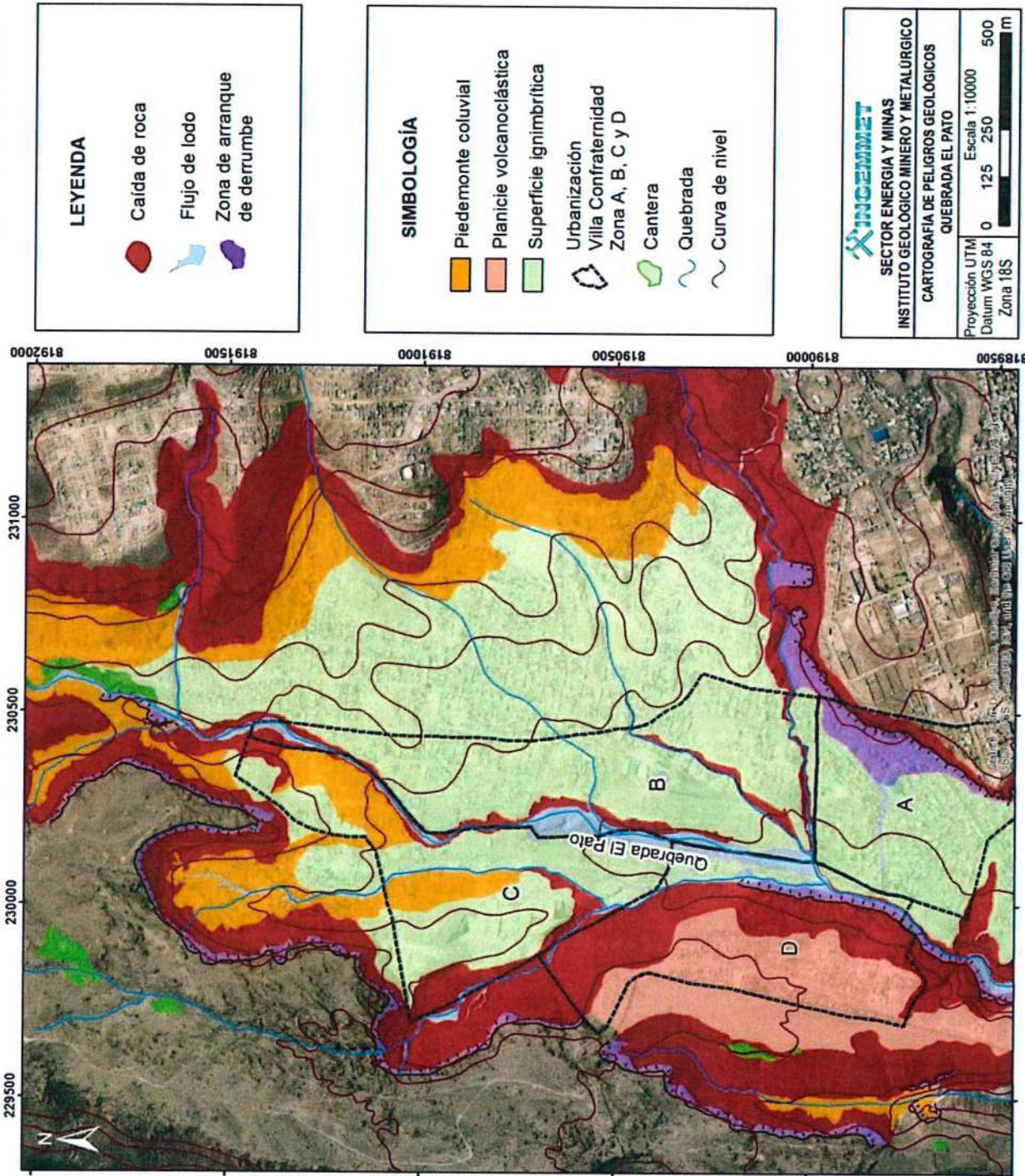


Figura 21. Mapa de peligros por movimientos en masa del tramo Villa Confraternidad.

4.2.1 Caída de rocas

La caída de rocas o el desprendimiento de bloques, es un tipo de movimiento en masa que viene ocurriendo en la zona de estudio, la cual puede afectar a sus habitantes.

La quebrada El Pato se encuentra asentada dentro de una depresión, rodeada de escarpas de roca. Las escarpas presentan cortes que tienen una altura aproximada de 60 m y pendientes entre 70° y 80°.

En las laderas de la quebrada El Pato se han observado trazos de lotización y viviendas que son altamente vulnerables a ser afectadas por caída de rocas (figura 22). Así mismo, se ha observado desprendimientos de bloques que miden hasta 2 m de diámetro (figura 23).

Las causas de las caídas de rocas son: rocas volcánicas conformadas por lava e ignimbritas moderadamente fracturadas (3 a 6 fracturas por metro). Taludes de fuerte pendiente 70° y 80°. El factor desencadenante son las lluvias intensas periódicas y/o excepcionales.



Figura 22. Muestra viviendas de la zona C, situadas en la ladera de la quebrada El Pato (circulo color amarillo).



Figura 23. Muestra bloques de lava e ignimbrita sueltos en laderas de la quebrada El Pato (líneas y círculos de color amarillo).

4.2.2 Derrumbes

Es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera. Estos movimientos tienen velocidades muy rápidas a extremadamente rápidas.

En las márgenes de la quebrada El Pato, se identificó zonas de arranques de derrumbes (figura 24). Estos presentan zonas de arranque con longitudes de hasta 500 m y alturas entre 30 y 40 m.

Muchas viviendas del tramo Villa Confraternidad se hallan construidas en zonas de ladera y sobre material de relleno que constituyen suelos poco consolidados e inestables susceptibles a ser afectados por derrumbes. También, pueden verse afectadas durante la ocurrencia de sismos de moderada a gran intensidad, que son comunes en la región Arequipa. De ocurrir derrumbes en estas zonas, se verían afectados postes de luz, tuberías de agua y desagüe, y más de 100 viviendas localizadas sobre y al pie del talud.

Los derrumbes en la quebrada El Pato son producidos por:

- Viviendas asentadas sobre sustrato constituido por depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza de mala calidad y fácilmente deleznable; ignimbrita con fracturamiento a favor de la pendiente.
- Material de relleno de más de 4 m de espesor, sobre los cuales que se encuentran las viviendas. Estos materiales son de mala calidad geotécnica (figuras 25 y 26).
- Pendiente del terreno comprendida entre 70° a 80°.
- Lluvias periódicas y excepcionales que ocurren en la zona (enero a marzo) que permite la saturación del suelo.

Estos eventos son detonados por sismos o lluvias intensas.



Figura 24. Vista hacia el noroeste que muestra zonas de arranques de derrumbes y viviendas asentadas al pie del talud de la margen derecha de la quebrada El Pato.

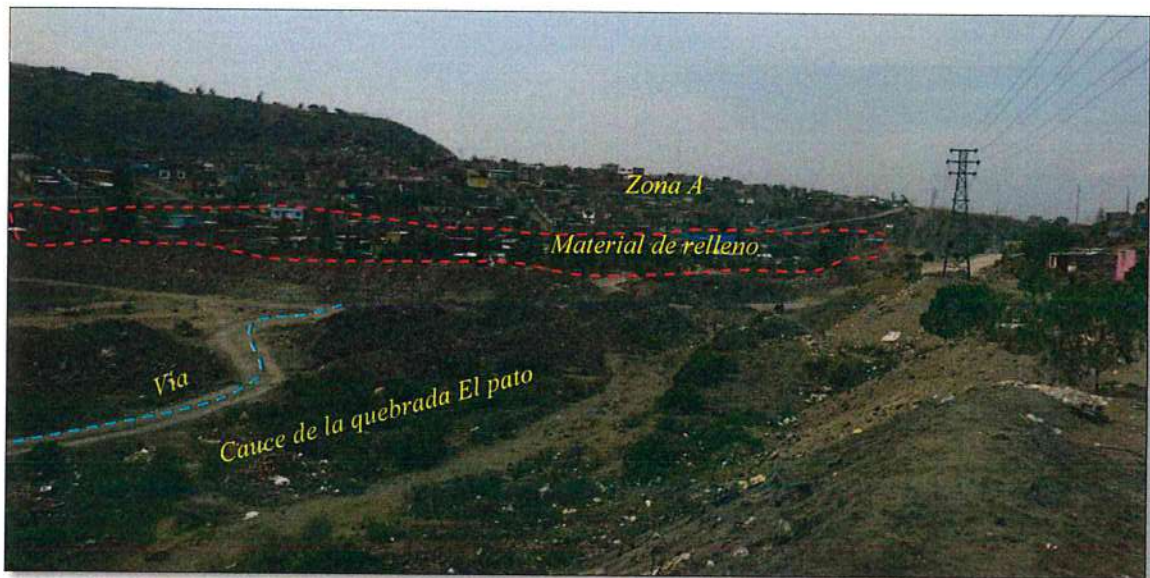


Figura 25. Vista Villa Confraternidad, zona A. Muestra viviendas sobre material de relleno (líneas rojas) y una vía que se encuentra dentro del cauce de la quebrada El Pato (líneas celestes).



Figura 26. Villa Confraternidad, zona B. Muestra viviendas sobre material de relleno (líneas color rojo). Además de observa una vía que cruza la quebrada (líneas celestes). Vista hacia el este.

V. SIMULACIÓN DE FLUJOS DE DETRITOS (HUAICO) EN LA QUEBRADA EL PATO

Para la construcción de mapas en el cual representamos escenarios de flujos de detritos (huaicos) emplearemos el método de simulación numérica.

Método de simulación numérica

Este método se basa en la aplicación de modelos numéricos asistidos por computadora. Los modelos del tipo simulación numérica, son una simplificación cuantitativa de la realidad, según Griswold (2004) estas pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Modelos de base física
- Modelos de base estadística, llamados empíricos
- Modelos de base física y estadística

La clasificación de las simulaciones numéricas hechas por Griswold, (2004), están basadas en el comportamiento de flujos de escombros, lahares/huaicos y avalanchas de escombros.

Método de estudio de flujos de detritos (huaicos)

Para la modelización de los flujos de detritos, se utilizó el modelo de base física, empleando el código VolcFlow. Para la determinación de las zonas de afectación.

VolcFlow: Este programa fue creado en el Laboratorio Magmas et Volcanes, Universidad Blaise Pascal, en Clermont Ferrand (Francia), por (Kelfun *et al.*, 2005), diseñado especialmente para simular flujos gravitacionales.

El programa VolcFlow permite simular la trayectoria de flujos densos y 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). Los valores empleados, para correr los distintos flujos se describen más adelante.

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

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

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

Dónde:

h: Es el espesor del flujo

u: = (u,v) es la velocidad del flujo

α: Pendiente del terreno

ρ: Densidad aparente

T: Retardo de esfuerzo - “Savage y Hunter (1989)”

Kactpass: Coeficiente de presión terrestre - “Inverson y Denlinger (2001)”

Requerimiento durante el procesamiento con el (código) VolcFlow	Programas que utiliza
(Angulo interno)-delta interneo(°)	Matlap
(Angulo de lecho)- delta basal (°)	Surfer
Cohesión (fuerza por unidad de área) (Kpa)	Photoshop
(Densidad) (kg/m ³)	ArcGis
(viscosidad) (Pa.s)	
Volumen (m ³)	
Tiempo de emisión (s)	
Tiempo de simulación (s)	

Tabla 1: Parámetros de los flujos y programas necesarios para el procesamiento con VolcFlow.

Simulación de flujos de detritos (huaico) en la quebrada El Pato

La simulación de flujos de detritos en la quebrada El Pato, se realizó según el método de simulación numérica mediante el código VolcFlow, explicado anteriormente. Para ello, se determinó un escenario por flujos de detritos, en base al cálculo del volumen de flujo, tomando en cuenta: precipitación máxima en el sector, área de las zonas de generación flujos de detritos en las microcuencas, y el porcentaje de contenidos de agua y sólidos.

La zona de generación de flujos de detritos en las microcuencas de la quebrada El Pato, posee un área aproximada de 10'800,000 m².

De acuerdo al informe de SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) titulado “Variables meteorológicas de precipitación total mensual y anual en la ciudad de Arequipa 2009 – 2018”, señalan que el valor máximo de precipitación registrado en los últimos 10 años en la zona de estudio se presentó en febrero del 2013, con un valor de 190 mm (figura 27).

ESTACION: MAP LA PAMPILLA

LAT: 16°24'49.54"

LONG: 71°32'4.44"

ALT: 2370 msnm.

PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)

Año	01_ENE	02_FEB	03_MAR	04_ABR	05_MAY	06_JUN	07_JUL	08_AGO	09_SET	10_OCT	11_NOV	12_DIC
2009	4.9	35.6	13.4	1.4	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2010	1.9	12.1	1.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2011	39.7	74.4	1.0	5.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
2012	58.2	153.8	31.3	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	17.1
2013	32.8	190.2	26.7	0.0	2.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3
2014	33.3	0.0	2.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1
2015	13.7	103.4	52.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2016	0.0	52.8	1.0	8.8	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2017	103.3	50.6	43.1	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	14.0
2018	12.8	6.2	5.8	0.2	0.0	0.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

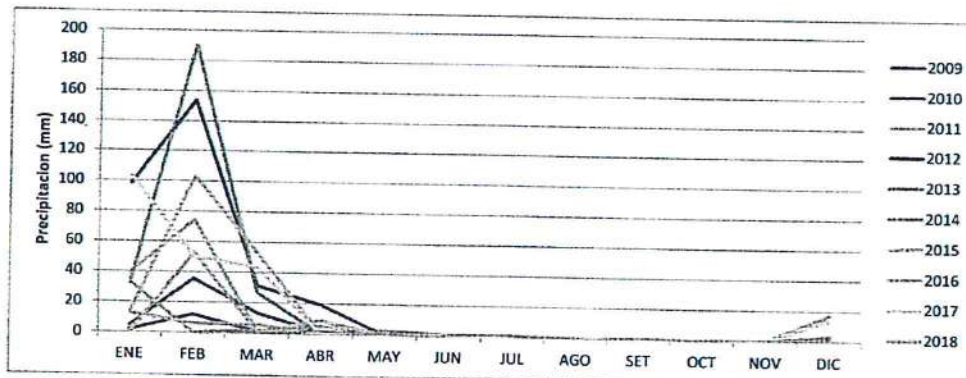
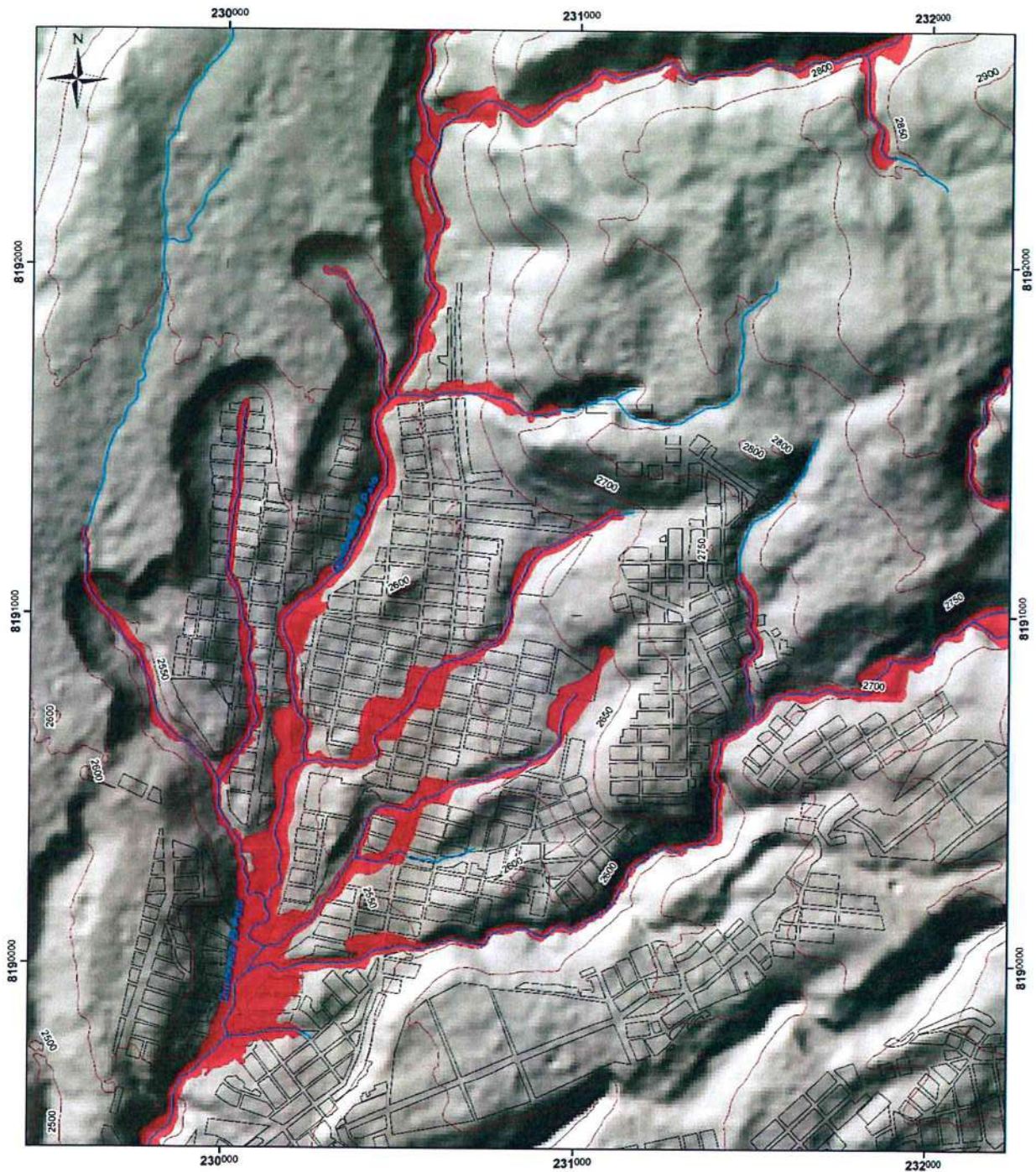



Figura 27. Precipitación pluvial en la zona de estudio, fuente informe SENAMHI

En base a lo expuesto anteriormente se calculó un volumen aproximado de flujo de detritos de 3'500,000 m³, para la quebrada El Pato y sus tributarios.

Zonas afectadas por flujos de detritos (huaicos) según el resultado de la simulación

Los resultados de la simulación para flujo de detritos realizada en la quebrada El Pato, muestra que las principales zonas afectadas ante la ocurrencia de un flujo de detritos (huaicos) serían las viviendas ubicadas en la zona de color rojo (figura 28). Estas viviendas están emplazadas en rellenos, que inicialmente fueron cauces naturales de las quebradas.



LEYENDA	
	Catastro urbano
	Zona de afectación por flujos de detritos
	Drenaje/Quebrada
	Curvas de nivel

 SECTOR ENERGÍA Y MINAS INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO	
Simulación de flujos de detritos en la quebrada El Pato	
Proyección UTM Datum WGS 84 Zona 19S	Escala 1:10.000 

Figura 28. Muestra el resultado de la simulación de flujos para la quebrada El Pato y las quebradas secundarias.

VI. PROPUESTA DE MEDIDAS PREVENTIVAS

En esta sección se dan algunas propuestas generales de solución para la zona de estudio, con la finalidad de minimizar el impacto ante las ocurrencias de flujos de lodo, derrumbes, caídas de rocas, entre otros.

6.1 Para lahares y/o flujos de lodo

Se presentan algunas propuestas generales de solución para los problemas por lahares que puedan afectar a la zona en estudio. Las mismas que están encaminadas a mitigar los daños ante la ocurrencia de fenómenos naturales, tales como flujo de lodo.

a) Construcción de muros disipadores (diques y gaviones): El objetivo de esta medida, es disminuir la energía del agua y retener sedimentos.

En los sectores más críticos, como el caso de las viviendas en la zona A, que colindan con la confluencia de tres afluentes de la quebrada El Pato, se podría levantar muros de contención tipo gaviones (figura 29), con la finalidad de suprimir o impedir el impacto de los flujos de lodo en esta zona. También se puede complementar con mallas y vegetación.

Por otro lado, se debería construir sistemas de alcantarillado (que involucre cunetas, canales, etc.) en las calles de las zonas A, B, C y D que se encuentran sobre antiguos cauces de quebradas. Esto servirá para evitar que estas zonas sean afectadas por inundaciones.



Figura 29. Ejemplo de muro de contención, tipo gaviones, que podría ser construido en los alrededores de las viviendas de la zona A.

6.2 Para estabilización de laderas en la quebrada EL Pato mediante el empleo combinado de materiales muertos y vivos

Pueden lograrse estructuras eficaces para corregir la erosión, estabilizar ciertas secciones de laderas o lechos de cauces empleando una combinación de materiales muertos y materiales vivos. Cuando se compara con las construcciones de ingeniería convencional, los sistemas vivos tienen muchas ventajas, incluyéndose entre ellas: una mayor duración, una eficacia superior, menos mantenimiento, la reducción del costo total, y una compatibilidad estética mejor con el paisaje circundante; Schiechti, H.M. (1985).

a) **Gaviones flexibles:** Los gaviones flexibles consisten en geotextiles que no se pudren, por ejemplo, hojas de fibra sintética o alfombras sintéticas con una anchura de malla inferior a 5 mm. Para la construcción de gaviones flexibles puede emplearse material de grano fino; Schiechti, H.M. (1985).

Procedimiento

a) Se hacen contenedores en forma de saco de diversos tamaños y se rellenan con arena o grava, sin arcilla o con cantidades mínimas. Estos sacos se utilizan seguidamente como si fueran piedras o ladrillos para formar muros y se sujetan en el lugar (figuras 30 y 31). Se introducen ramas o estaquillas de plantas leñosas vivas o plantas con raíces, en las juntas existentes entre los sacos de tal forma que lleguen al suelo original. Cuando se emplean sacos largos como salchichas, hay menos juntas. Los "muros de sacos de arena" altos se pueden fijar eficazmente mediante la incorporación de anclajes de materiales de aluvión o a base de barras de acero que lleguen muy profundamente (del tipo empleado en la construcción de hormigón).

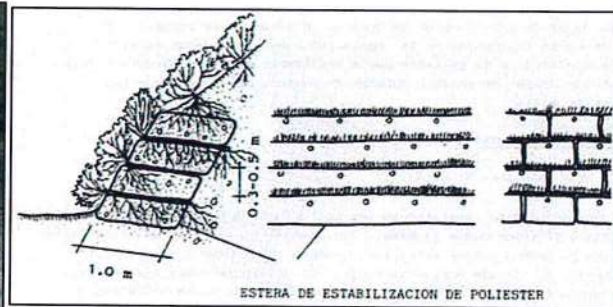
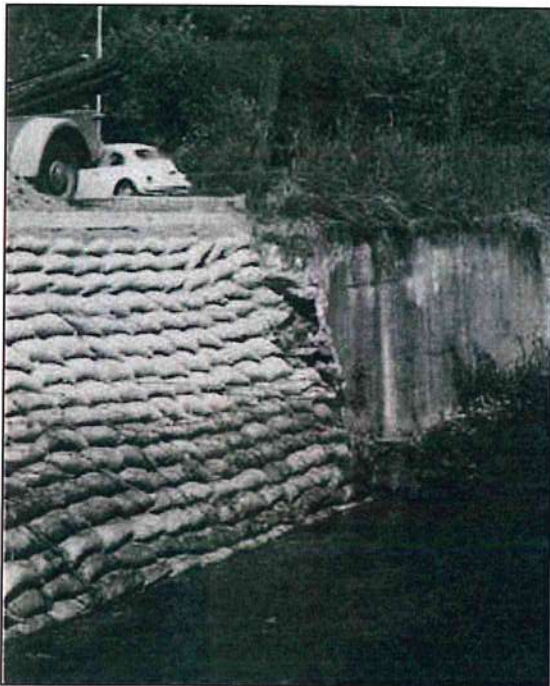


Figura 30 (Izquierda): Gaviones flexibles de tipo de saco combinados con plantas leñosas enraizadas para reforzar una margen erosionada. Tomado de Schiechti, H.M. (1985).

Figura 31 (Derecha): Gaviones flexibles con vegetación.

También se pueden producir muros artificiales mediante la extensión de alfombras geotextiles cubriéndolas seguidamente en su mitad con una capa de material de 30 a 50 cm de grueso. Cuando la capa se ha solidificado, la mitad vacía de la alfombra se dobla sobre la capa para cubrirla. De esta forma, se pueden erigir, uno sobre otro, gaviones flexibles que están abiertos por el extremo de atrás. El mejor método es combinar gaviones flexibles con plantas leñosas. Durante la construcción hay que colocar lechos de ramas, lechos de ramas de setos vivos o lechos de setos vivos entre las distintas capas de material.

Ambos tipos de gaviones flexibles pueden cubrirse de vegetación después de su construcción mediante siembra hidráulica o mediante aplicación de estaquillas fuertes o la instalación de plantas en los contenedores. En este último caso, deben hacerse agujeros en las alfombras de geotextiles Schiechti, H.M. (1985).

Época

El tipo más eficaz de gaviones flexibles es aquél en que se colocan durante el proceso de construcción ramas vivas de fácil enraizamiento o plantas leñosas con raíces. Por lo tanto, la época mejor de construcción es durante la estación de reposo. La aplicación suplementaria o la incorporación de

vegetación puede extenderse durante un periodo más largo; la construcción de gaviones puede realizarse entonces durante todo el año. El recubrimiento con césped es posible durante el verano, dependiendo de las condiciones climáticas del sitio.

b) Emparrillados vivos de laderas: Los emparrillados de laderas consisten en una estructura de madera construida de tal modo que se soporta a sí misma desde la base. Por ello es fundamental una cimentación sólida. Se echan sobre la ladera postes sencillos o madera escuadrada y se unen entre sí mediante madera cortada y colocada horizontalmente. La distancia entre las maderas verticales y las horizontales no debe ser de más de 2 metros, dando lugar a cuadrados individuales que no son mayores de 2 m x 2 m aproximadamente. Todo el espacio existente entre los postes de madera se rellena entonces con grava permeable o con material del terreno (figuras 32 y 33). También se pueden emplear, para la construcción de sistemas de emparrillados de laderas, elementos de prefabricados de hormigón (fotografía 34).

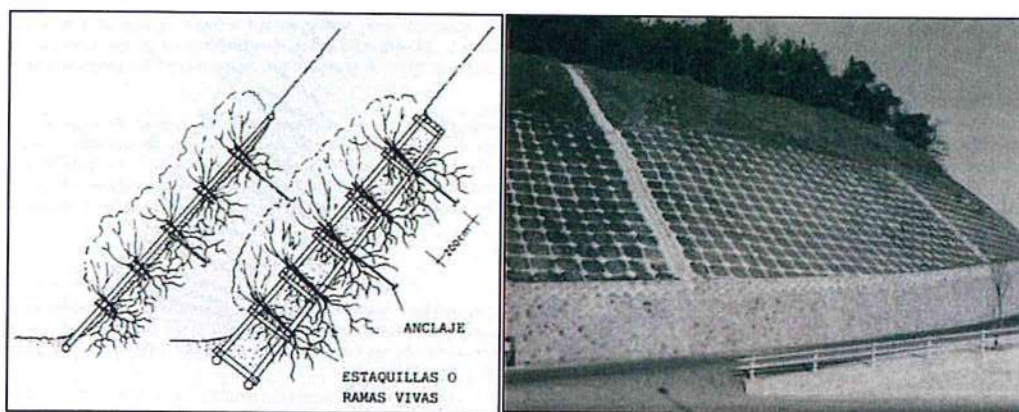
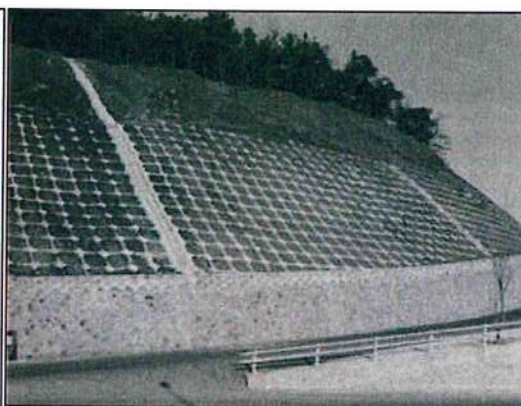


Figura 32: Emparrillados vivos de ladera



Fotografía 33: Emparrillados de ladera con elementos prefabricados de hormigón. Tomado de Schiechi, H.M. (1985).

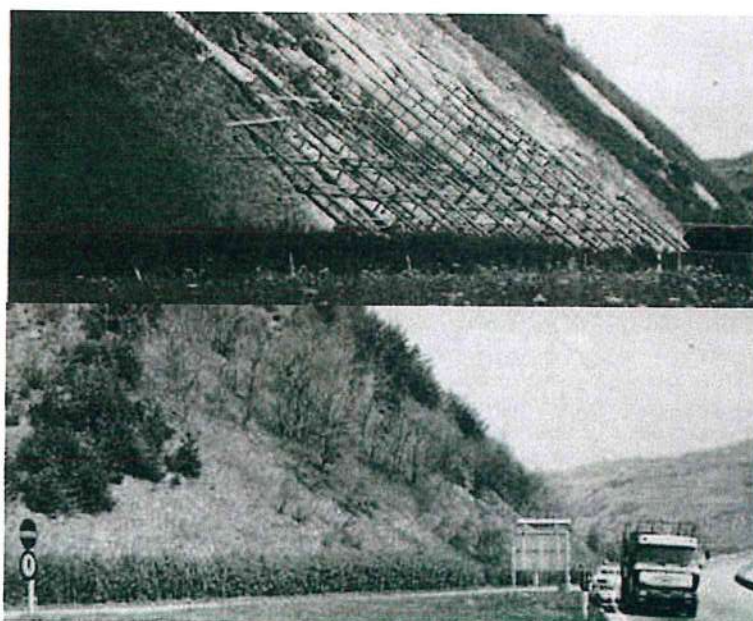


Figura 34: Emparrillados vivos de ladera para la estabilización de un talud muy inclinado. Arriba, durante la construcción. Abajo, después de ocho años.

6.3 Para derrumbes y caída de rocas

La inclinación de los taludes depende de los suelos y litología. Cuando la inclinación cambia, en muchos casos se proporciona una banqueta en el punto de cambio de inclinación (figura 35). Generalmente se emplea una pendiente única cuando la geología y los suelos son lo mismo en profundidad y en las direcciones transversales y longitudinales. Cuando la geología y los suelos varían considerablemente y de manera complicada, una pendiente única adecuadamente al suelo de mayor pendiente podría usarse, aunque esto sea antieconómico.

a) Banquetas:

Generalmente se instala una banqueta de 1 a 21 m. de ancho, a la mitad de un talud de corte de gran altura.

Propósito de la banqueta

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

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

Inclinación de banqueta

Cuando no existen facilidades de drenaje, se proporciona a la banqueta un gradiente transversal de 5 a 10%, de modo que el agua drene hacia el fondo del talud (pie de talud).

Sin embargo, cuando se considera que el talud es fácilmente descargable o cuando el suelo es fácilmente erosionable, el gradiente de la banqueta debe hacerse en la dirección contraria, de modo que el agua drene hacia la zanja de la banqueta.

Localización de banqueta.

En los taludes de corte, normalmente se diseñan banquetas de 1 a 2 metros de ancho cada 5 a 10 metros de altura, dependiendo del suelo, litología escala de talud.

Una banqueta más ancha se recomienda cuando el talud es largo y grande o donde se instalarán vallas de protección de caída de rocas.

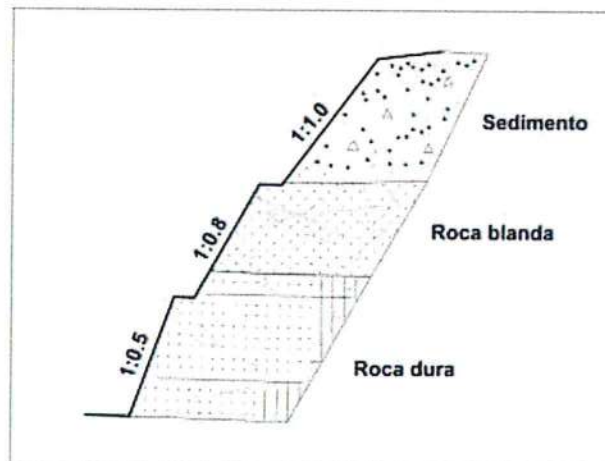


Figura 35. Condición de terreno y forma de taludes

b) Corrección por muros

Los muros se emplean frecuentemente como elementos resistentes en taludes (figura 36).

En ocasiones se emplean para estabilizar deslizamientos y/o derrumbes existentes o potenciales al introducir un elemento de contención al pie (figura 37). Esta forma de actuar puede tener varios inconvenientes. En primer lugar, la construcción del muro exige cierta excavación en el pie del talud, lo cual favorece la inestabilidad hasta que el muro esté completamente instalado. Por otra parte, el muro no puede ser capaz de evitar posibles deslizamientos por encima o por debajo del mismo.

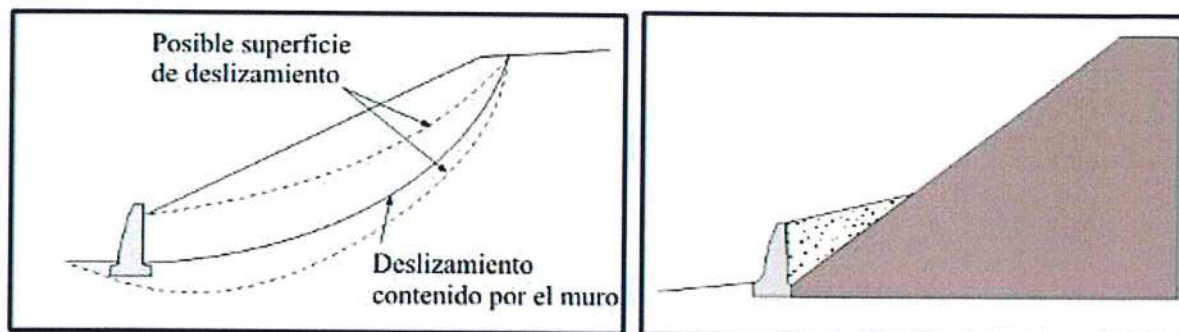


Figura 36. Contención de un deslizamiento mediante un muro (tomado de INGEMMET. Figura 37. Relleno estabilizador sostenido por el muro (tomado de INGEMMET, 2000).

Una contención solo puede sostener una longitud determinada de deslizamiento ya que en caso contrario el deslizamiento sobrepasa al muro. Cuando quieran sujetarse deslizamientos más largos, debe recurrirse a un sistema de muros o a otros de los procedimientos expuestos.

Por todo ello, en taludes con signos evidentes de inestabilidad puede ser más apropiado realizar el muro con objeto de retener un relleno estabilizador.

En desmontes y terraplenes en los que la falta de espacio impone taludes casi verticales, el empleo de muros resulta casi obligado. Este es un caso frecuente en la construcción de vías de transporte. En ocasiones, como en el caso de un desmonte en una ladera, puede resultar más económica la construcción de un muro, frente al coste de sobre excavación requerido si aquel no se realiza. La construcción de un muro es generalmente una operación cara. A pesar de ello, los muros se emplean con frecuencia pues en muchos casos son la única solución viable.

Los muros se pueden clasificar en tres grupos (figura 38):

Muros de sostenimiento: Se construyen separados del terreno natural y se rellenan posteriormente.

Muros de contención: Generalmente van excavados y se construyen para contener un terreno que sería probablemente inestable sin la acción del muro.

Muros de revestimiento: Su misión consiste esencialmente en proteger el terreno de la erosión y meteorización además de proporcionar un peso estabilizador.

Cuando se proyecta un muro deberán determinarse las cargas a las que va a estar sometido y su distribución, lo que permitirá planificar una estructura capaz de resistirlas.

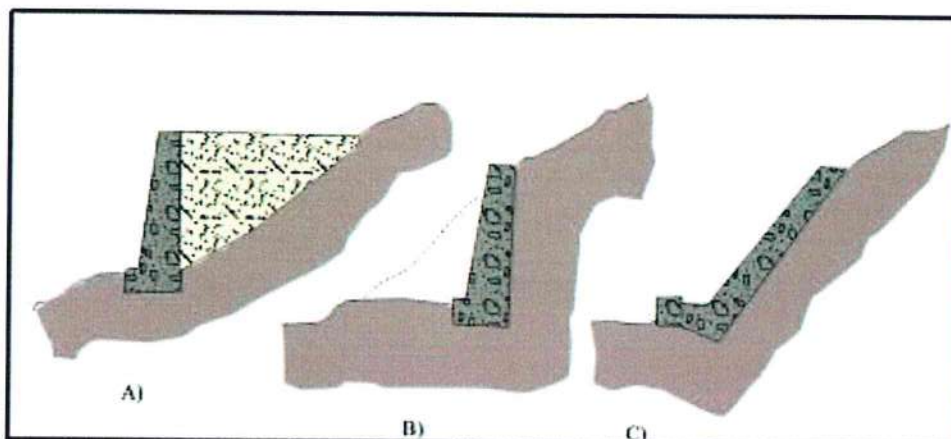


Figura 38. a) Muro de sostenimiento b) Muro de contención c) Muro de revestimiento (tomado de INGEMMET, 2000).

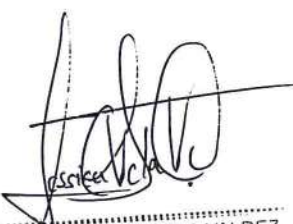
Las comprobaciones que deben efectuarse en un caso típico son las siguientes:

- Estabilidad general del sistema muro-terreno al deslizamiento; la estabilidad general del muro incluye la estabilidad al vuelco y al deslizamiento.
- Resistencia del terreno del cimiento.
- Ausencia de tracciones en la base del muro.
- Resistencia estructural: Se ha de comprobar que las tensiones máximas en el muro no sobrepasen los valores admisibles.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los cauces de las quebradas afluentes a la quebrada “El Pato” en el sector Villa Confraternidad Zonas A, B, C, y D del distrito Alto Selva Alegre han sido modificadas. Estas quebradas han sido rellenadas con material sólido como piedra y tierra y están siendo ocupados con viviendas en su mayoría de material noble. Las viviendas pueden ser afectadas por peligros volcánicos y movimientos en masa.
2. De acuerdo al mapa de peligros volcánicos por peligros múltiples del Misti elaborado por el INGEMMET, el sector de Villa Confraternidad se encuentra asentado en una zona de MODERADO PELIGRO VOLCÁNICO (color naranja). Por su cercanía al cráter del volcán, en una erupción del Misti, esta zona puede ser severamente afectada por caídas de ceniza y pómez, flujos y oleadas piroclásticas, lahares y/o huaicos, y avalanchas de escombros.
3. De acuerdo al mapa de peligros volcánicos por caída de ceniza del Misti elaborado por el INGEMMET, el sector de Villa Confraternidad se encuentra asentada en una zona de ALTO PELIGRO VOLCÁNICO. Los potentes depósitos de caída de pómez y cenizas observados en campo evidencian que este sector podría ser severamente afectado por futuras erupciones explosivas del volcán Misti, como las ocurridas hace 2050 años AP. y las erupciones de los años 1440 d.C-1470 d.C.
4. Las rocas que afloran en el sector de Villa Confraternidad corresponden a la ignimbrita “Aeropuerto de Arequipa” sobre el cual descansan depósitos de lava, secuencia de flujos piroclásticos y depósitos de caídas del Misti, intercalada con niveles de lahares. Los flujos piroclásticos y depósitos de caídas son materiales poco cohesivos, por tanto, de fácil erosión y susceptibles a ser afectados por peligros geológicos de movimientos en masa, por su poca competencia y mala calidad.
5. Los peligros por movimientos en masa identificados en la quebrada El Pato son: derrumbes, caída de rocas y flujos de lodo y/o huaicos. Este sector presenta condiciones que propician la ocurrencia de estos fenómenos, tal como rocas volcánicas de mala calidad, pendiente elevada del terreno y la ocurrencia de precipitaciones pluviales intensas. En tal sentido, se consideran de alto riesgo la infraestructura como vías de acceso, postes de luz, servicios básicos de agua y desagüe, colegios, jardines, viviendas, etc.
6. Se ha identificado viviendas ubicadas dentro de los cauces afluentes a la quebrada El Pato que podrían ser fuertemente afectadas por flujos de lodo, especialmente en temporadas de fuertes lluvias. Además, en la zona A de Villa Confraternidad se ha identificado una zona crítica, donde las viviendas se ubican entre la confluencia de tres afluentes de la quebrada El Pato. Estas viviendas obstaculizan el tránsito de los huaycos por el eje del cauce natural y podrían ser severamente afectadas ante la ocurrencia de fuertes lluvias. Estas viviendas deben ser reubicadas progresivamente.
7. Actualmente no existen medidas estructurales de protección para las viviendas del sector Villa Confraternidad. Por tal motivo, se recomienda la construcción muros de contención tipo gaviones en los sectores más críticos. También se recomienda construir sistemas de alcantarillado en las calles que se encuentran sobre antiguos cauces de quebradas. Se deben considerar las recomendaciones del ítem VI.
8. Realizar la forestación de los taludes, con la finalidad de evitar la aceleración de los movimientos en masa (derrumbes) que generan materiales sueltos.

9. Se recomienda que las autoridades e instituciones competentes implementen o gestionen la evacuación a las personas que habitan en las viviendas asentadas en el cauce de las quebradas en temporadas de fuertes lluvias, con la finalidad de proteger y salvaguardar la vida de los pobladores.
10. Se recomienda que las autoridades e instituciones competentes, eviten la ocupación clandestina o invasiones con fines de vivienda en zonas de alto peligro como la quebrada El Pato. La mala planificación urbana, y el asentamiento desordenado hacen que se las viviendas se ubiquen en lugares altamente inseguros.



JESSICA CAROLINA VELA VALDEZ
INGENIERA GEOLOGA
CIP N° 215198



Ing. CÉSAR A. CHACALTANA BUDIEL
Director (e)
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET

REFERENCIAS

- Griswold, J.P., 2004. Mobility Statistics and Hazard Mapping for non-volcánic flows and rock avalanches. Thesis for the Master of Science in Geology, Portland State University.
- Harpel, C., de Silva S. L., Salas, G. (2011). The 2 ka eruption of Misti Volcano, southern Peru - the most recent plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. Geological Society of America, Special Papers, vol. 484, p. 1-72.
- Informe de variables meteorológicas precipitación total mensual y diaria ciudad de Arequipa 2009–2018, informe SENAMHI.
- Kelfoun, K., and T. H. Druitt (2005), Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile, *J. Geophys. Res.*, 110, B12202, doi: 10.1029/2005JB003758.
- Mariño, J., Rivera, M., Cacya, L., Thouret, J.-C., Macedo, L., Salas, G., Siebe, C., Tilling, R., Sheridan, M., Chavez, J.A. and Zuñiga, S. (2008). Mapa de peligros del volcán Misti: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú; Mapas a escalas variadas.
- Mariño, J.; Rivera, M.; Jean-Claude Thouret & Macedo, L. (2016). Geología y mapa de peligros del volcán Misti, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 60, 170 p., 2 mapas.
- Paquereau-Lebti, P., Thouret, J.C., Wörner, G., Fornari, M. (2006). Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. *Journal of Volcanology and Geotherm Research*, 154, 251–275. DOI 10.1016/j.jvolgeores.2006.02.014
- Schiechti, H.M. (1985). Manual de ordenación de cuencas hidrográficas - Estabilización de laderas con tratamientos del suelo y la vegetación. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations).
- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Suni, J., Legeley-Padovani, A., Frechen, M., (2001). Geology of El Misti volcano nearby the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin* 113 (12): 1593–1610.
- Villota, H. (2005). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. Subdirección de Docencia e Investigación – CIAP Bogotá, Colombia, 1991, 320 p.