



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



EVALUACIÓN DE PELIGROS POR DESCENSO DE LAHARES DEL VOLCÁN MISTI EN LA CIUDAD DE AREQUIPA

Informe Técnico N°045-2024/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima - Perú
Diciembre, 2024

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Evaluación de peligros por descenso de lahares del volcán Misti en la ciudad de Arequipa

Autores

Marco Rivera
David Valdivia
Marquiño Cabrera
John Cruz
Fredy García

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

EVALUACIÓN DE PELIGROS POR DESCENSO DE LAHARES DEL VOLCÁN MISTI EN LA CIUDAD DE AREQUIPA

Arequipa– Perú
Diciembre, 2024

RESUMEN

Se analiza los depósitos de lahares visibles en las principales quebradas que se prolongan desde el volcán Misti hacia la ciudad de Arequipa (San Lázaro, Huarangal-Los Incas, Venezuela, Pastores y El Pato), llegándose a identificar al menos cincuenta y ocho depósitos de lahares que descendieron durante los últimos 2000 años. Estos depósitos yacen sobre otro de hace 2050 años AP., generado durante su última gran erupción (IEV 5). Los depósitos encontrados tienen espesores centimétricos, y una concentración de arena, limo y bloques centimétricos, algunos de ellos conocidos como flujos hiperconcentrados. Estos se generaron principalmente debido a precipitaciones pluviales intensas (diciembre-marzo), pues acarrearón parte del material volcánico disponible en los lechos de las quebradas, así como materiales de escombros y basura arrojados por pobladores.

A fin de conocer las áreas que podrían ser afectados por futuros lahares, se ha elaborado un mapa de escenario de peligro en Arequipa usando el código VolcFlow y como hipótesis, tres volúmenes de lahar: 150000 (peligro alto), 350000 (peligro moderado) y 500000 (peligro bajo) m³. En estos escenarios, los lahares pueden desbordarse para causar inundaciones en viviendas, avenidas, calles, puentes peatonales, centros comerciales, terminal terrestre, etc. A lo largo de la quebrada Huarangal pueden ser afectados: 11 asentamientos humanos (A.H.) que corresponden al distrito de Paucarpata, 9 del distrito de Mariano Melgar, y 3 del distrito de J.L.B. y Rivero, y una urbanización en el Cercado de Arequipa. En caso descieran lahares por la quebrada San Lázaro, pueden ser afectados: 9 asentamientos humanos (A.H.) en el distrito de Alto Selva Alegre, 9 en Miraflores, y 7 en Cercado de Arequipa. En caso descieran lahares por la quebrada Venezuela, pueden ser afectados: 9 A.H. en el distrito de Alto Selva Alegre, 9 A.H. en el distrito de Miraflores y 7 en el Cercado de Arequipa.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1. Eventos ocurridos en el pasado reciente

2.- ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS

2.1. Población

2.2. Salud

2.3. Viviendas

2.4. Abastecimiento de agua potable

3.- GEOMORFOLOGÍA

3.1. Unidades geomorfológicas

3.2. Quebradas o torrenteras

3.3. Pendientes

4.- CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

4.1. Análisis de la precipitación pluvial

5.- CONTEXTO VULCANOLÓGICO DEL MISTI

5.1. Misti I (833,000 – 112,000 años)

5.2. Misti 2 (112,000 – 40,000 años)

5.3. Misti 3 (38,000 – 11,000 años)

5.4. Misti 4 (<11,000 años)

6.- CARACTERÍSTICAS DE LOS LAHARES EN QUEBRADAS

6.1.- Quebrada Huarangal – Los Incas

6.2.- Quebrada Venezuela

6.3.- Quebrada San Lázaro

6.4.- Quebrada Pastores

6.5.- Quebrada El Pato

7.- MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LAHARES

7.1.- Software Volcflow

7.2.- Volúmenes de lahares

8.- ESCENARIOS DE PELIGRO POR DESCENSO DE LAHARES

9.- ZONAS DE PELIGRO IDENTIFICADAS POR QUEBRADAS

9.1.- Quebrada San Lázaro

9.2.- Quebrada Huarangal – Los Incas

9.3.- Quebrada Venezuela

9.4.- Quebrada El Pato

9.5.- Quebrada Pastores

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

Arequipa, la segunda ciudad más poblada del Perú con más de 1'100,000 habitantes (INEI, 2018), está ubicada a 2300 m s.n.m. al pie del flanco suroeste del volcán Misti. El Misti (5821 m s.n.m.) es uno de los diez volcanes activos del sur peruano localizado en el extremo occidental de la Cordillera de los Andes. Este volcán presentó actividad eruptiva desde hace ~112,000 años A.P. (Ruprecht & Worner 2007; Thouret et al., 2001). Uno de los eventos relacionados a la actividad volcánica que genera el Misti son los lahares. Los lahares son mezclas de partículas volcánicas (ceniza, lapilli, bloques, etc.) de tamaños diversos movilizados por el agua y que fluyen a velocidades de 3-30 m/s por valles y quebradas que drenan de los volcanes. Se generan en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica (Thouret et al., 2019). La distancia que recorre un lahar varía de acuerdo a la pendiente del terreno, la cantidad de agua involucrada y el volumen de material disponible a ser erosionado o removilizado.

Basados en su origen y si los lahares están directa o indirectamente relacionados con una erupción volcánica, se denominan: a) Lahares primarios. generados como consecuencia directa de una erupción volcánica. Durante erupciones, materiales incandescentes emitidos por un volcán producen la fusión de grandes volúmenes de hielo y nieve que yacen en la cumbre o las laderas de un volcán. También lahares primarios se producen cuando flujos piroclásticos (PDC) generados durante erupciones explosivas irrumpen en el cauce de las quebradas o ríos que drenan de un volcán. También pueden generarse en caso que una erupción coincida con lluvias intensas. En este caso, estos flujos se caracterizan por presentar temperaturas elevadas (mayores a 60°C). Los lahares primarios tienden a ser muy voluminosos (107–109 m³) y presentan altas velocidades (~30 m/s) (Thouret et al., 2019). Pueden recorrer distancias de más de 100 km del volcán. b) Lahares secundarios. Se producen después de días, meses o incluso años de terminado

el proceso eruptivo de un volcán. Esta categoría incluye principalmente lahares generados durante precipitaciones pluviales, como los que ocurren en temporada de lluvias en inmediaciones de los volcanes. Estos lahares pueden crecer en magnitud y ser recurrentes, lo que hace que su nivel de riesgo sea más difícil de anticipar (Vallance & Iverson, 2015). Su volumen y descarga está limitada por la intensidad y duración de la precipitación pluvial, así como de la cantidad del material disponible a ser incorporado. Su volumen está en el rango de 104-106 m³ y su descarga está en el orden de 102-103 m³/s (Mothes & Vallance, 2015).

En Arequipa el clima semiárido y la altitud son los responsables de la escasa cobertura vegetal. Debido a ello, abundantes escombros volcánicos están expuestos en las laderas del volcán Misti. En esta parte del país, la precipitación media anual no supera los 150 mm y se presenta principalmente en los meses de diciembre a marzo en forma de lluvias intensas. Estos eventos a menudo desencadenan flujos de lodo, conocidos como lahares secundarios, que discurren en la ciudad de Arequipa siguiendo las numerosas quebradas que drenan de los flancos del volcán Misti. Eventualmente los flujos de lodo se desbordan generando inundaciones.

Una serie de factores favorecen la formación de flujos de lodo en Arequipa como: 1) lluvias intensas y de corta duración (3 - 4 horas) (26 - 42 mm/h, con datos de cinco estaciones meteorológicas en toda la cuenca de Arequipa durante los últimos 60 años; Fuse y Benites, 2003) típico de un clima semiárido (≤ 150 mm/año a 2300 m s.n.m.); 2) escorrentía superficial rápida (60 - 120 min) en una cuenca relativamente pequeña (18-40 km²); 3) presencia de suelos impermeables y un área edificada impermeabilizada que aumenta la escorrentía; 4) las laderas empinadas y con poca cobertura vegetal de las estribaciones del Misti; y 5) cursos de quebradas utilizadas como botaderos de basura (mezcla de desechos domésticos e industriales).

Todas las quebradas, generalmente secas, se activan durante la temporada de lluvias (diciembre a marzo) generando inundaciones repentinas y flujos. Según Thouret et al. (2022), Arequipa está expuesta a inundaciones repentinas y a flujos de lodo de volumen bajo a moderado ($0,1-1 \times 10^6 \text{ m}^3$) con una frecuencia de 2,7 años en promedio. Debido a que los eventos generalmente ocurren de manera inesperada, la preparación de la población y la emisión de alertas tempranas son esenciales (Borga et al., 2008; Gaume et al., 2009).

En los últimos 60 años la población de la ciudad de Arequipa, en especial los habitantes de los distritos de Paucarpata, Mariano Melgar, Miraflores y Alto Selva Alegre, han crecido de manera desordenada y sin planificación alguna hacia las laderas del volcán Misti. En este contexto, muchas viviendas se han construido en el cauce natural de las quebradas, haciendo que estas y sus habitantes se encuentren en riesgo muy alto por ocurrencia de lahares o inundaciones. El área urbana de Arequipa permaneció relativamente compacta desde su fundación en 1540 d.C. hasta la década de los años 1960 (86,000 habitantes) (Gutiérrez, 1992; Thouret et al., 2014; Thouret et al., 2018). La población creció rápidamente de 81,000 habitantes en 1940 a 309,100 habitantes en 1970, a una tasa de crecimiento de aproximadamente 6% por año. A partir de 1970, Arequipa ha concentrado la mayor inversión económica de la región, lo que aceleró la migración de las personas de las zonas rurales, influenciada también por la ocurrencia de sequías en el Altiplano y el malestar social que se vivió en la década de 1990. Todos estos procesos provocaron una migración masiva de la población desde las zonas altas que contribuyó a una urbanización mal planificada, suburbios mal diseñados y asentamientos periféricos al norte, noreste y oeste de la ciudad (Gutiérrez, 1992; Thouret et al., 2018).

En los últimos 105 años el descenso de flujos de barro afectaron a unos 33,000 habitantes y dañaron más de 7,600 viviendas (Gobierno Regional de

Arequipa, 2014; INDECI, 2019). Uno de los eventos destructivos y letales ocurrió el 8 de febrero de 2013 ligado a fuertes lluvias (124,5 mm durante 3 horas) que provocó un flujo hiperconcentrado y una inundación a lo largo de la quebrada Venezuela, afectando 280 viviendas y 23 puentes (peatonales, vehiculares y ferroviario), además afectó centros comerciales, paralizando el centro de la ciudad por más de una semana de la ciudad (Ettinger et al., 2015). Según Ettinger et al. (2015) el volumen total del flujo del 8 de febrero de 2013 osciló entre 50,000 y 100,000 m³.

En las últimas décadas, se han realizado varios estudios sobre el impacto que tendría en la ciudad de Arequipa el descenso de lahares asociado a lluvias intensas o una erupción del Misti (Delaite et al., 2005; Harpel et al., 2011; Sandri et al., 2014; Charbonnier et al., 2020; Thouret et al., 2022). Según estos estudios, los eventos de flujo ocurren durante el periodo de verano, la mayoría en febrero (54%), 33% en enero y 13% en marzo.

El presente informe enmarcado dentro del proyecto de investigación “Evaluación de la amenaza y exposición por lahares en Arequipa e implementación de un sistema de monitoreo de lahares” (Contrato n.o PE501078148-2022), muestra las características de los lahares depositados durante los últimos 2 mil años en las principales quebradas o torrenteras de la ciudad de Arequipa. Así mismo, muestra las zonas de peligro que podrían ser afectadas en caso ocurra el descenso de nuevos lahares de las laderas del Misti.

1.2. Eventos ocurridos en el pasado reciente

En Arequipa, las quebradas que se prolongan del flanco sur y suroeste del volcán Misti drenan sus aguas hacia el río Chili. En el pasado han ocurrido lluvias intensas que han originado lahares o flujos de lodo voluminosos los cuales se han desbordado y ocasionado inundaciones generando víctimas y

diversos daños en los distritos adyacentes al Misti. A continuación, se detallan los principales eventos registrados durante los últimos siglos.

Tabla 1.- Resumen cronológico de descenso de flujos de barro y daños ocasionados.

Fecha	Tipo de evento	Daños ocasionados	Fuente
11/02/1961	Huaico	Arequipa soportó una lluvia violenta, acompañada de una tormenta eléctrica, que causó el ingreso de las torrenteras, el incremento del caudal del río Chili, inundaciones de cientos de viviendas cercanas a los bordes. En el distrito de Characato canales de regadío quedaron destruidos, las viviendas rústicas terminaron inundadas y los campos de cultivo fueron afectados. La torrentera de San Lázaro hizo un ingreso violento.	Futuri y Medina (2018)
02/02/1967	Huaico	Flujos descendieron por las torrenteras arrasando veinte barrios marginales e inundando viviendas de las zonas bajas de la ciudad de Arequipa. El día 9 del mismo mes, descendió un huaico en el río Chili que afectó la central Charcani IV y dejó a todos sin electricidad	Fuse y Benites, (2003); Futuri y Medina (2018)
05/02/1972	Huaico	Desborde de las torrenteras que ocasionó graves daños en diversas urbanizaciones. En la torrentera San Lázaro el agua alcanzó una altura de 8 m, desbordándose e inundando viviendas en el sector bajo de la ciudad.	Futuri y Medina (2018)
29/01/1974	Huaico	Ingreso de agua en la segunda torrentera que afectó viviendas que se asientan en sus márgenes. Posteriormente el 01 de febrero todas las torrenteras ingresan causando cuantiosos daños en los distritos de Mariano Melgar y Miraflores.	
04/03/1975	Huaico	Debido a fuertes precipitaciones pluviales se produjo el ingreso de todas las torrenteras, que inundaron y derrumbaron viviendas que se ubican cerca a los cauces, 12 personas murieron.	
12/03/1976	Huaico	Se produjo el ingreso de la segunda torrentera que destruyó 60 viviendas. El pueblo joven 9 de octubre fue el más perjudicado, murieron dos personas.	
1987	Inundación	Inundación de áreas urbanas en la quebrada San Lázaro, calle Chullo y cercado.	Martelli (2011)

08/02/1989	Inundación	Desborde del río Chili debido a que un dique artificial u obra inconclusa (puente Bajo Grau) impidió el paso del agua y causó el desborde e inundó viviendas y fábricas de la Av. La Marina. El barrio Obrero N° 1, La Cabezona, las curtiembres de la zona, el pasaje del Solar, Quinta Salas, Vallecito y otros alrededores a la Av. La Marina fueron afectados. Ese mismo día ingresó la torrentera San Lázaro, que destruyó la rampa de acceso al puente de la Amistad, entre Miraflores y Alto Selva Alegre. Ese día una persona falleció al ser arrasada por las aguas que bajaron desde Alto Selva Alegre al Chili. En la planta de La Tomilla el ingreso de arena dejó por 20 días sin el servicio de agua a los habitantes.	Martelli (2011); Vilchez y Sosa (2021); Fuse y Benites (2003); Futuri y Medina (2018).
1994	Inundación	Inundación de viviendas de los distritos de Miraflores, Mariano Melgar y Paucarpata.	Martelli (2011)
1995	Inundación	Inundación de calles en Pampas de Polanco, Chilina, Miraflores, Socabaya, Yarabamba, Arica, Miguel Grau, etc.	Martelli (2011)
25/02/1997	Inundación	Fuerte precipitación produjo desborde de las torrenteras San Lázaro, Miraflores, Paucarpata y Mariano Melgar e inundó un sector de Alto Selva Alegre, P.J. Ciudad Blanca – Comité y Cercado de Arequipa. Dejó cinco muertos y muchos daños.	Vichez y Sosa (2021); Cruz, (2021).
1999	Inundación	Inundación en los distritos de Alto Selva Alegre, Pochi y Paucarpata.	Vichez y Sosa (2021)
01/03/1999	Inundación	Lluvias intensas generaron inundaciones en varios sectores de los distritos de Paucarpata y Alto Selva Alegre que afectó 61 viviendas.	Rivera et al. (2018); Martelli (2011)
2000	Inundación	Inundación de varios asentamientos humanos del distrito de Mariano Melgar.	Vichez y Sosa (2021)
2000	Inundación	Inundación de un sector del distrito de Paucarpata	Vichez y Sosa (2021)
2001	Inundación	Inundación en los distritos de Cayma, Socabaya, Paucarpata, Alto Selva Alegre, José Luis Bustamante y Rivero, y Mariano Melgar.	Martelli (2011); Rivera et al. (2018); Vilchez y Sosa (2021)
2001	Inundación	Inundación en los distritos de Alto Selva Alegre y Arequipa.	Vilchez y Sosa (2021)
2005	Inundación	Inundación en el distrito de Paucarpata: 33 personas afectadas y 11 viviendas afectadas.	Código SINPAD n° 9053
2011	Inundación	Distrito de Arequipa: 60 damnificados.	Código SINPAD n° 42685
2012	Inundación y lluvias intensas	Inundación en los distritos de Alto Selva Alegre, Arequipa y Paucarpata donde 1000 personas fueron afectadas y 200 viviendas dañadas.	Código SINPAD n° 48706

11/03/2012	Inundación	Desborde de la quebrada Huarangal - Los Incas, con un caudal de 30 m ³ /s. Los efectos fueron la devastación de terrenos de cultivo e inundación de viviendas, principalmente de la Asociación de vivienda Pablo VI.	Cacya et al. (2013)
08/02/2013	Inundación y lluvias intensas	Lluvia intensa de 124 l/m ² provocó el ingreso de torrenceras que se desbordaron en la zona urbana dejando más de 1000 viviendas inundadas en diferentes distritos de la ciudad, vehículos enterrados y avenidas totalmente anegadas. Produjo la muerte de cinco personas y más de 15 heridos. Además, 125 personas damnificadas, 500 m de vías urbanas afectadas, 2500 m lineales de caminos rurales afectados, red de agua potable colapsado en 200 m, 25 m de red de desagüe colapsado y 25 m de red de alcantarillado afectado. En los distritos de Alto Selva Alegre, Arequipa, Mariano Melgar, Miraflores y Paucarpata: fueron afectadas 21014 personas, 74 viviendas destruidas y 4210 viviendas afectadas.	Código SINPAD n° 56277
22/02/2016	Inundación	Fuertes precipitaciones pluviales inundaron viviendas, vías de comunicación y locales públicos, siendo afectados 7 familias. En los distritos de Alto Selva Alegre, Arequipa y Mariano Melgar 896 personas fueron afectadas y 229 viviendas dañadas.	Código SINPAD n° y 75612 75130
26/02/2016	Huaico	Lluvias registradas afectaron vías urbanas, viviendas, en Alto Selva Alegre e interrumpieron los servicios básicos como agua y desagüe. Los daños fueron: 41 personas damnificadas, 684 personas afectadas, 11 viviendas inhabitables, 171 viviendas afectadas, 5% de servicio de agua afectado, 30% de servicio de desagüe afectado, 9 km de carreteras afectadas	Código SINPAD n° - 075450 2016
13/01/2017	Huaico	Arequipa soportó lluvias por 18 horas seguidas con intensidad de hasta 24 l/m ² , registrándose en el distrito de Alto Selva Alegre. Las lluvias ocasionaron el desborde de las torrenceras afectando 80 m de infraestructura agrícola, 750 personas afectadas, 150 viviendas afectadas, 3 km de carreteras afectadas, 1 puente afectado (Puente del Ejército), zona de la Quebrada El Pato, sector de AH. Villa Confraternidad Zona A, y afectación de la margen derecha de la Quebrada San Lázaro. En el distrito de Paucarpata hubo: 01 fallecido, 02 heridos, 2315 personas afectadas, 17 viviendas destruidas y 463 viviendas afectadas.	Código SINPAD n° - 80842 2017
22/01/2020		En el distrito de Miraflores las lluvias intensas afectaron 3 familias (5 personas) y 3 viviendas, así mismo afectaron 32 tramos de vías urbanas.	Código SINPAD n° 116590
28/01/2020	Huaico	En el distrito de Miraflores y Los Girasoles, resultaron afectadas 143 personas, 110 viviendas afectadas, 6 aulas de la I.E. José Gálvez, 125 tramos de vías de comunicación; además de dejar sin servicios básicos a 3 viviendas.	SINPAD n° 117137.
13/03/2020	Huaico	Lluvia intensa afectó 220 familias (326 personas) en el distrito de Miraflores. Además, de 220 viviendas (212 de material de paredes de ladrillo o bloque de cemento, 1 de piedra con barro o pirca y 7 de piedra o sillar con cal o cemento).	Código SINPAD n° 121042).

2020	Huaico	En los distritos de Alto Selva Alegre, Arequipa, Mariano Melgar, Miraflores y Paucarpata se registraron: 839 personas afectadas, 01 viviendas destruidas y 438 viviendas afectadas.	Código SINPAD n° 120402, 119375, 119726, 119568, 119493,11 9706, 119731, 119641, 119878,11 9640, 119717
02/01/2021	Huaico	Ingreso de torrenceras que se desbordaron en la zona urbana provocando la muerte de 4 personas, más de 15 heridos, más de mil viviendas inundadas en diferentes distritos de la ciudad, vehículos enterrados y avenidas totalmente anegadas. En el distrito de Mariano Melgar las intensas precipitaciones pluviales ocasionaron 1 vivienda afectada, 1 familia afectada, 125 personas damnificadas, colapso de buzones, y 1985 m de vías afectadas.	Código SINPAD n° 132164
2021	Huaico	En los distritos Alto Selva Alegre, Arequipa, Mariano Melgar, Miraflores y Paucarpata fueron afectados 132 personas, 08 viviendas destruidas y 36 viviendas afectadas.	Código SINPAD n° 132241, 132225, 132164, 132157, 132161, 132508

2.- ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS

Se presentan datos sobre el número de población a nivel distrital, así como número de puestos de salud, y aspectos socio-económicos de la población de los distritos de Miraflores, Mariano Melgar, Alto Selva Alegre, Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero y Cercado de Arequipa; es decir de los distritos ubicados en áreas aledañas al volcán Misti. Para su elaboración se ha utilizado la información del Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas y se detalla a continuación:

2.1.- Población

Los distritos de Paucarpata, Miraflores, José Luis Bustamante y Rivero, Mariano Melgar, Alto Selva Alegre y Cercado de Arequipa por donde atraviesan las quebradas que se prolongan del volcán Misti cuentan con el siguiente número de población:

Tabla 2.- Población en los distritos de Miraflores, Alto Selva Alegre, José Luis Bustamante y Rivero, Paucarpata, Mariano Melgar y Cercado de Arequipa (tomado del Censo de Población y Vivienda INEI – 2018).

Distrito	Miraflores	Paucarpata	José Luis Bustamante y Rivero	Mariano Melgar	Alto Selva Alegre	Cercado de Arequipa
N° Habitantes	62895	131346	81829	59918	85870	55437

2.2.- Salud

Los distritos de Paucarpata, Miraflores, José Luis Bustamante y Rivero, Mariano Melgar, Alto Selva Alegre y Cercado cuentan con servicios de salud pública y privada conformado de puestos de salud, policlínicos, servicios de salud, hospitales y consultorios médicos.

Tabla 3.- Centros de salud en los distritos de Miraflores, Alto Selva Alegre, José Luis Bustamante y Rivero, Paucarpata, Mariano Melgar y Cercado de Arequipa (tomado del Censo de Población y Vivienda INEI – 2018).

Distrito	Miraflores	Paucarpata	José Luis Bustamante y Rivero	Mariano Melgar	Alto Selva Alegre	Cercado de Arequipa
N° de Centros de Salud	12	69	24	11	9	127

2.3.- Viviendas

Las paredes de las viviendas de los distritos de Paucarpata, Miraflores, José Luis Bustamante y Rivero, Mariano Melgar, Alto Selva Alegre y Cercado de Arequipa en su mayoría están compuestas por material de ladrillo o bloque de cemento (97.94 a 86.76 %), piedra o sillar con cal o cemento (7.01 a 0.78 %) y en menor porcentaje de adobe, tapia, quincha, piedra con barro y madera, tal como se describe en la tabla 4.

Tabla 4.- Tipo de material de vivienda en los distritos de Miraflores, Alto Selva Alegre, José Luis Bustamante y Rivero, Paucarpata, Mariano Melgar y Cercado de Arequipa (tomado del Censo de Población y Vivienda INEI – 2018).

Distrito	Tipo de material	Cantidad	%
Miraflores	Ladrillo o bloque de cemento	13176	87.6
	Piedra o sillar con cal o cemento	1055	7.01
	Adobe	588	3.91
	Quincha	1	0.01
	Piedra con barro	6	0.04
	Madera	50	0.33
	Triplay, calamina o estera	34	0.23
	Total, de viviendas	15041	100
Alto Selva Alegre	Ladrillo o bloque de cemento	19323	88.96
	Piedra o sillar con cal o cemento	1272	5.86
	Adobe	812	3.74
	Tapia	1	0
	Quincha	5	0.02
	Piedra con barro	30	0.14
	Madera	168	0.77
	Triplay, calamina o estera	110	0.51
	Total, de viviendas	21721	100
Mariano Melgar	Ladrillo o bloque de cemento	13808	86.76
	Piedra o sillar con cal o cemento	1035	6.5

		Adobe	609	3.83
		Tapia	2	0.01
		Piedra con barro	68	0.43
		Madera	197	1.24
		Triplay, calamina o estera	196	1.23
		Total, de viviendas	15915	100
Paucarpata		Ladrillo o bloque de cemento	27494	92.25
		Piedra o sillar con cal o cemento	1162	3.9
		Adobe	788	2.64
		Tapia	1	0
		Quincha	1	0
		Piedra con barro	46	0.15
		Madera	204	0.68
		Triplay, calamina o estera	109	0.37
		Total, de viviendas	29805	100
José Luis Bustamante y Rivero		Ladrillo o bloque de cemento	20327	97.94
		Piedra o sillar con cal o cemento	162	0.78
		Adobe	117	0.56
		Tapia	3	0.01
		Quincha	1	0
		Piedra con barro	2	0.01
		Madera	67	0.32
		Triplay, calamina o estera	75	0.36
		Total, de viviendas	20754	100
Cercado de Arequipa		Ladrillo o bloque de cemento	12603	88.42
		Piedra o sillar con cal o cemento	894	6.27
		Adobe	656	4.6
		Quincha	5	0.04
		Piedra con barro	3	0.02
		Madera	51	0.36
		Triplay, calamina o estera	41	0.29
		Total, de viviendas	14253	100

2.4.- Abastecimiento de agua potable

El abastecimiento de agua en los distritos de Paucarpata, Miraflores, José Luis Bustamante y Rivero, Mariano Melgar, Alto Selva Alegre y Cercado de Arequipa se realiza a través de la red pública de agua dentro de la vivienda (93.4 a 81.23 %), red pública de agua fuera de la vivienda (7.2 a 4.52 %) y en menor porcentaje a través del pilón de uso público, camión cisterna, pozo, río, acequia, manantial y otro tipo, tal como se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5.- Tipo de abastecimiento de agua en los distritos de Miraflores, Alto Selva Alegre, José Luis Bustamante y Rivero, Paucarpata, Mariano Melgar y Cercado de Arequipa (tomado del Censo de Población y Vivienda INEI – 2018).

Distrito	Viviendas con abastecimiento de agua	Cantidad	%
Miraflores	Red pública de agua dentro la vivienda	13 124	87.3
	Red pública de agua fuera la vivienda	1 076	7.2
	Pilón de uso público	639	4.2
	Camión, cisterna u otro similar	122	1
	Pozo	60	0.4
	Río, acequia, manantial	1	0
	Otro tipo	19	0.1
	Total de población	15 041	100
Alto Selva Alegre	Red pública de agua dentro la vivienda	17644	81.23
	Red pública de agua fuera la vivienda	1334	6.14
	Pilón de uso público	2475	11.39
	Camión, cisterna u otro similar	104	0.48
	Pozo	81	0.37
	Río, acequia, manantial	3	0.01
	Otro tipo	80	0.37
	Total de población	21721	100
Mariano Melgar	Red pública de agua dentro la vivienda	12831	80.62
	Red pública de agua fuera la vivienda	720	4.52
	Pilón de uso público	1968	12.36
	Camión cisterna u otro similar	220	1.38
	Pozo	128	0.8
	Otro tipo	48	0.3
	Total de población	15 915	100
Paucarpata	Red pública de agua dentro la vivienda	25603	85.9
	Red pública de agua fuera la vivienda	1682	5.64
	Pilón de uso público	1468	4.93
	Camión cisterna u otro similar	523	1.75
	Pozo	421	1.41
	Río, acequia, manantial	31	0.1
	Otro tipo	77	0.26
	Total de población	29805	100
José Luis Bustamante y Rivero	Red pública de agua dentro la vivienda	19385	93.4
	Red pública de agua fuera la vivienda	1160	5.59
	Pilón de uso público	152	0.73
	Camión cisterna u otro similar	12	0.06
	Pozo	20	0.1
	Río, acequia, manantial	3	0.01
	Otro tipo	22	0.11
	Total de población	20754	100
Cercado de Arequipa	Red pública de agua dentro la vivienda	13082	91.78
	Red pública de agua fuera la vivienda	1099	7.71
	Pilón de uso público	53	0.37
	Camión cisterna u otro similar	4	0.03
	Pozo	11	0.08
	Otro tipo	4	0.03
	Total de población	14253	100

3.- GEOMORFOLOGÍA

3.1.- Unidades Geomorfológicas

El área donde se asientan los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero y Cercado de Arequipa comprenden zonas de colinas, abanico aluvial, llanura de inundación, planicie de acumulación, planicie Ignimbrita, entre otros descritos a continuación.

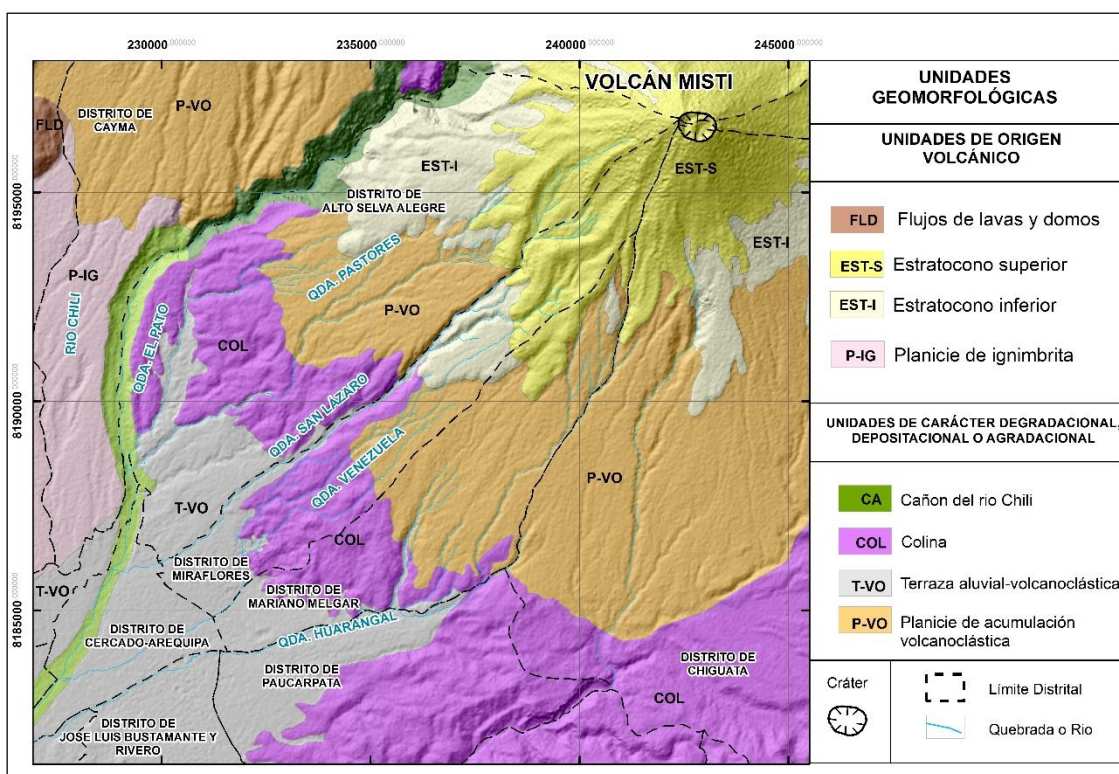


Figura 1.- Mapa geomorfológico de la ciudad de Arequipa.

Estratocono superior (EST-S): Corresponde al cono superior del volcán Misti ubicado entre ~4200 a 5822 m s.n.m. El cono está constituido principalmente por flujos de lavas en bloques de composición andesíticas que tienen pendientes mayores a 30° de inclinación. Estas lavas están cubiertas por cenizas retrabajadas. En la cima se distingue el cráter reciente del Misti, de aproximadamente 500 m de diámetro.

Estratocono inferior (EST-I): Corresponde al cono inferior o la base del volcán Misti ubicado entre ~3600 a 4200 m s.n.m. El cono está constituido principalmente de lavas andesíticas que tienen pendientes mayores a 20° de inclinación. Las lavas están cubiertas por depósitos de caídas de téfras, flujos piroclásticos y lahares del volcán Misti.

Cañón del río Chili (EST-I): Está ubicado al noroeste y oeste del volcán Misti, y corresponde a una depresión longitudinal de dirección noroeste - suroeste de más de 800 m de profundidad, con paredes casi verticales por donde discurre un tramo del cauce del río Chili. Las vertientes tienen mas de 60° de inclinación, y está conformado por una intercalación de flujos de lava de los volcanes Misti y Chachani, que descansan sobre ignimbritas soldadas y consolidada denominadas Río Chili, datadas en 13.3 M.a. y 4.9 Ma, respectivamente (Paquereau-Lebti et al., 2006).

Terraza aluvial-volcanoclástica (T-VO): La zona de terraza aluvial – volcanoclástica se extiende entre los 2100 y 2500 m s.n.m. Corresponde a una planicie de poca pendiente (~5 - 10°), surcada por quebradas que frecuentemente poseen menos de 20 m de profundidad, tales como Pastores, San Lázaro, y Huarangal-Los Incas. Está constituido por una secuencia de depósitos de lahares, depósitos de avalanchas de escombros, depósitos de caídas de téfras y flujos piroclásticos del volcán Misti.

Zona de colinas (Col): Se extiende al noreste y este de la ciudad de Arequipa. Las colinas tienen entre 50 y 200 m de alto, son de mediana pendiente (20° a 60°) y están surcadas por quebradas poco profundas. Está conformada por flujos de lava, así como por depósitos de avalanchas de escombros de los volcanes Misti y Pichu Pichu, y depósitos de caídas de téfras y flujos piroclásticos. Algunas de estas colinas están siendo pobladas, especialmente en el sector este y noreste de la ciudad de Arequipa.

Planicie de acumulación volcanoclástica (P_VO): La planicie de acumulación se extiende al pie del flanco sur y suroeste del volcán Misti. La planicie posee pendiente de 5° y 15° de inclinación y está surcada por quebradas que tienen entre 60 a 10 m de profundidad y de 10 a 120 m de ancho. La planicie de acumulación está conformada por potentes secuencias de depósitos volcanoclásticos, depósitos de caídas de tefras y depósitos de flujos piroclásticos provenientes del volcán Misti.

Planicie de ignimbrita (P_Ig): La planicie de acumulación se extiende al pie del flanco sur y sureste del volcán Chachani, en la margen derecha del río Chili. La planicie posee pendiente de 5° y 15° de inclinación y está surcada por quebradas que tienen entre 50 a 10 m de profundidad y de 10 a 80 m de ancho. La planicie de acumulación está conformada por potentes secuencias de depósitos volcanoclásticos que cubren el depósito de ignimbritas “Aeropuerto de Arequipa” emplazada hace aproximadamente 1.6 Ma (Paquereau-Lebti et al., 2006).

3.2.- Quebradas o torrenteras

Las quebradas que se prolongan desde las laderas del flanco suroeste y sur del volcán Misti son El Pato, Pastores, Huarangal, Huarangueros, San Lázaro y Venezuela.

La quebrada San Lázaro (tradicionalmente conocida como Segunda Torrentera) tiene un ancho variable de 20 a 100 m, con profundidades que van desde los 4 a 100 m. Así mismo presenta pendientes variables de 5% – 8 % en la parte alta de la quebrada a 3% – 6% en la parte baja. Dicha quebrada está canalizada desde la Av. La Torre hasta la confluencia con el río Chili, en un tramo de 2 km.

La quebrada Venezuela (tradicionalmente Tercera Torrentera o Miraflores), se origina en las depresiones topográficas occidentales del cerro El Botadero. Tiene dos afluentes principales que alimentan el cauce: (1) el afluente noreste drena hacia el suroeste, desde aguas arriba del A.H. Vista Alegre hacia el A.H. La Galaxia; y (2) el afluente oeste drena hacia el sureste, desde aguas arriba de las áreas urbanas de Mariano Bustamante y Pueblo Joven Vencedores del Cenepa. A partir de este sector el cauce de la quebrada Venezuela cruza la ciudad de NE a SO para luego desembocar en el Río Chili. Tiene un ancho que varía de 6 a 8 m, con profundidades que van desde los 10 a 2 m. Esta quebrada esta canalizada desde la Av. Mariscal Castilla hasta el Parque Industrial.

Por su parte la quebrada Huarangal – Los Incas ((tradicionalmente Cuarta Torrentera o Mariano Melgar) tiene entre 80 m (parte alta) y menos de 8 m de ancho, aguas abajo de la quebrada donde ha sido canalizada. Se origina en las quebradas denominadas El Chilcal y Huarangal, presentando una dirección general del Este hacia el Oeste hasta su desembocadura en el río Chili a la altura del Cuartel Arias Aragüés en Tingo. Tiene profundidades que van desde los 30 a 4 m, así mismo el cauce de la quebrada tiene pendientes variables de 5% – 7% en la parte alta de la quebrada y de 3% – 5% en la parte baja.

3.3.- Pendientes

El área de los distritos de Miraflores, Alto Selva Alegre, Mariano Melgar, Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero y Cercado de Arequipa, presentan terrenos con pendiente variable. Así se distinguen zonas de pendiente llanas u pendiente horizontal (0 – 5°), terrenos inclinados con pendientes suaves (5° - 15°), terrenos con pendiente suave y moderada (15° - 25°), terrenos de pendiente moderada a fuerte (25° - 45°) y pendientes muy fuertes (> 45°), ver Figura 2.

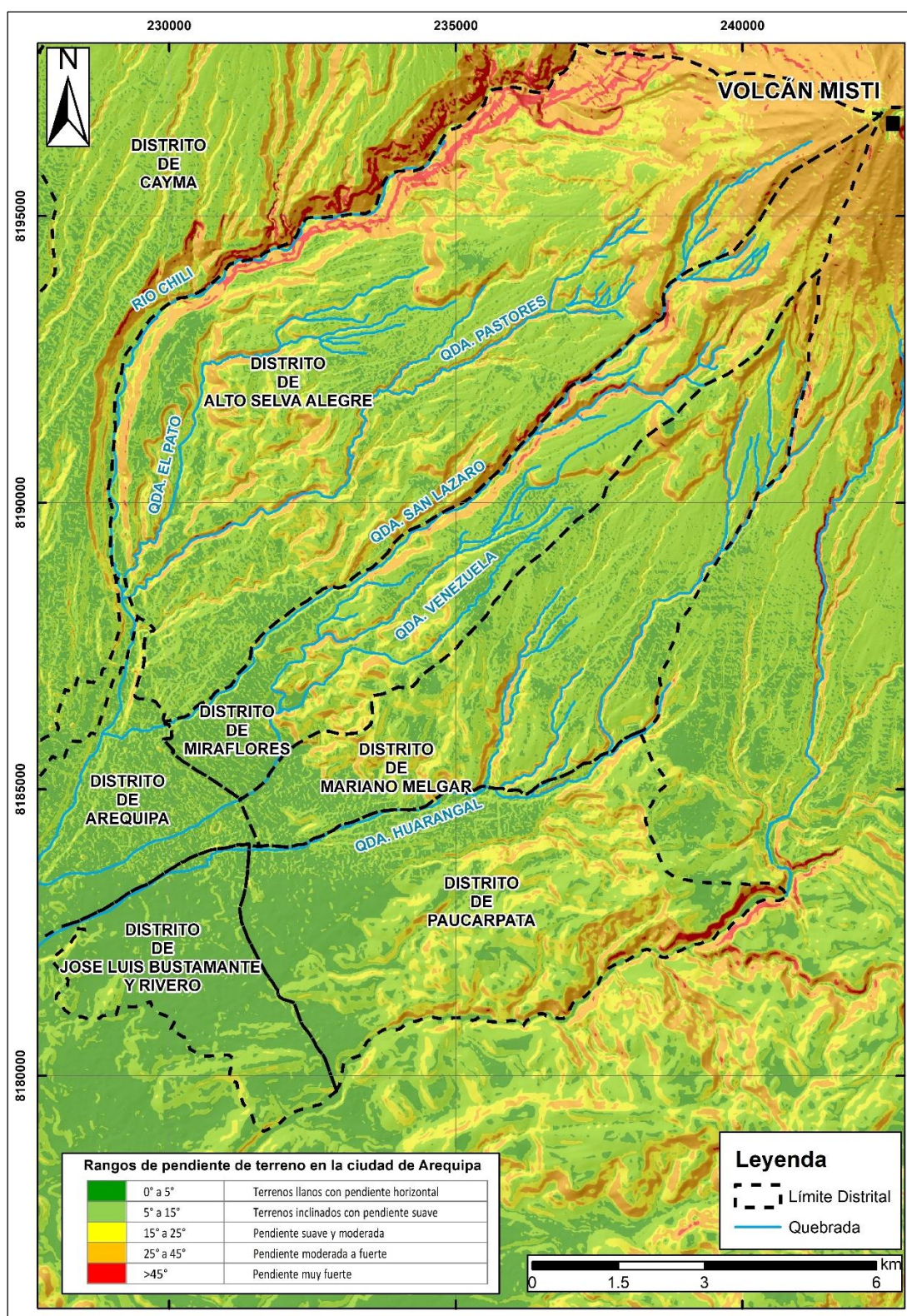


Figura 2.- Mapa de pendientes de la ciudad de Arequipa elaborado con un modelo de elevación digital (DEM), de 12.5 m, obtenidas a partir de imágenes satelitales ALOS PALSAR.

4.- CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

El clima la ciudad de Arequipa es desértica, la cantidad anual de precipitación es inferior a 250 mm y con amplitud térmica moderada. Los veranos son cortos, áridos y parcialmente nublados y los inviernos son cortos, frescos, secos y nublados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 9 °C a 23 °C y rara vez baja a menos de 7 °C o sube a más de 25 °C.

Con presencia de lluvias en la temporada de verano, especialmente el mes de enero (mes más lluvioso del año) y se encuentra representada en el cuadro siguiente, que corresponde a variabilidad climática.

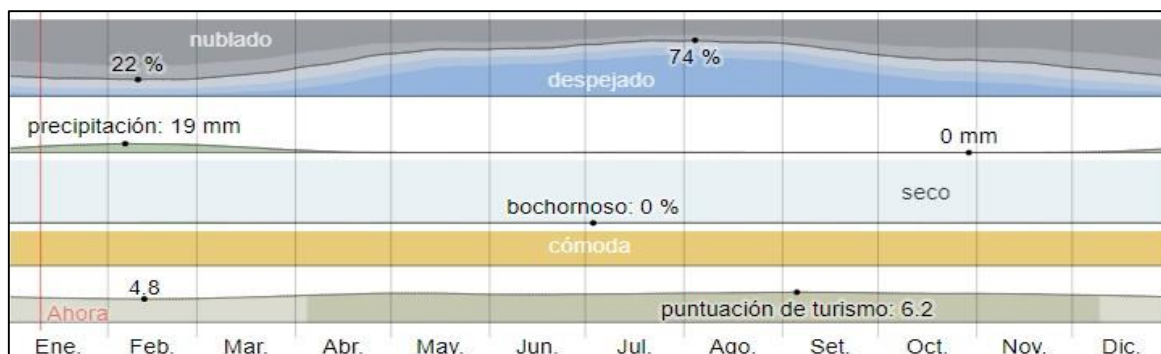


Figura 3.- Resumen del clima de Arequipa (tomado de Weatherspark).

La temporada templada dura 2.2 meses, del 26 de agosto al 1 de noviembre, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 22 °C y la temperatura mínima promedio es de 10 °C (Figura 4).

La temporada fresca dura 2.0 meses, del 10 de enero al 12 de marzo, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 21 °C. El día más frío del año es el 19 de julio, con una temperatura mínima promedio de 9 °C y máxima promedio de 22 °C (Figura 4).

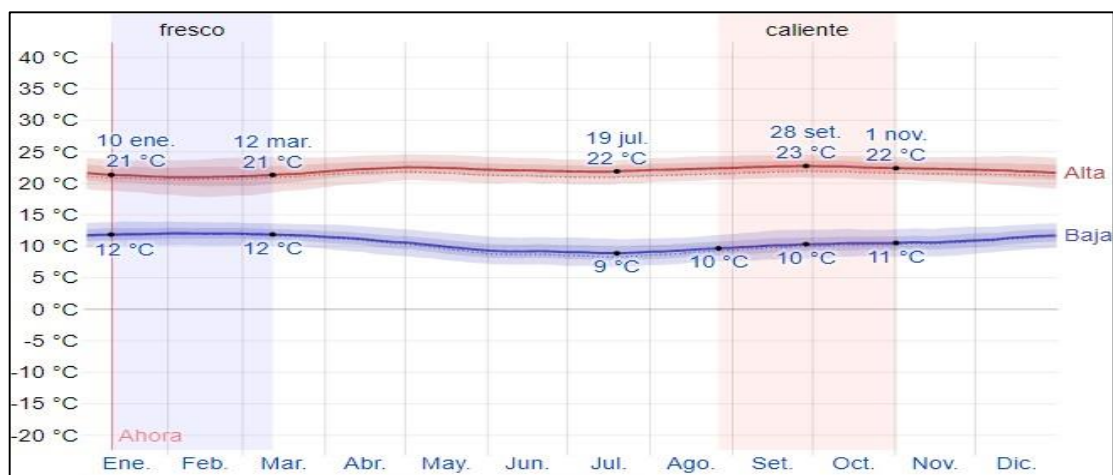


Figura 4.- La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diario (tomado de Weatherspark).

4.1.- Análisis de la precipitación pluvial

Para el presente estudio, se cuenta con registros de precipitación máxima en 24 horas de la estación meteorológica La Pampilla (SENAMHI). Del mismo modo, se cuenta con los datos de intensidades históricas registradas por dicho observatorio. Del mismo modo, se realizará la comparación entre las intensidades históricas registradas (datos reales) y las calculadas en base a la precipitación máxima en 24 horas (datos inferidos).

Precipitación en 24 horas: Se cuenta con los datos de precipitación para el período 2003-2019 en el histograma siguiente:

A continuación, se describe la variación de precipitación mensual y anual en la estación de La Pampilla.

- La precipitación promedio mensual varía entre 0.1 mm hasta 25.8 mm, el promedio es de 5.6 mm. El 94.7% de la precipitación se presenta entre los meses de diciembre a marzo.
- La mayor precipitación total anual es 75.6 mm.

Tabla 6.- Precipitación máxima en 24 horas (La Pampilla), tomado de SENAMHI, 2019.

PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)													
AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	TOTAL
2003	3.2	14.3	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49.5
2004	4	3.4	8.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.2
2005	2.1	26.8	23.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.0
2006	4	5.6	11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.1
2007	1.5	7.5	15.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.2
2008	-	18.5	17.7	-	-	-	-	-	-	-	-	2.2	50.2
2009	15.2	19.6	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38.3
2010	-	23.5	29.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53.0
2011	2.8	42.8	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	4.2	50.0
2012	22.3	47.1	0.7	4.8	-	-	-	-	-	-	-	0.7	75.6
2013	15.2	19.6	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6	38.9
2014	15.3	-	1.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.1
2015	0.4	44.2	18.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62.7
2016	-	42.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42.9
2017	17.1	22.9	8.4	-	-	-	-	-	-	-	-	4.7	53.1
2018	6.4	1.3	5.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.5
2019	12.1	14.5	6.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32.9

5.- CONTEXTO VULCANOLÓGICO DEL MISTI

Según Thouret et al. (2001) durante los últimos 112,000 años el volcán Misti ha presentado cuatro periodos de actividad eruptiva (Figura 5), descritos a continuación.

5.1.- Misti 1 (833,000 – 112,000 años)

El estratovolcán "Misti 1" se compone esencialmente de flujos de lava en bloques de composición andesítica y algunos flujos de escoria emplazados entre 833 000 y 112 000 años (Thouret et al., 2001). Estas formaciones son visibles en el fondo del cañón del Río Chili (al pie del flanco noroeste) y al pie de los flancos sur y suroeste del volcán Misti. Cada flujo tiene entre 40 y 60 m de espesor, y en total tienen un espesor aproximado de 500 m. Estas lavas descansan sobre una secuencia volcanoclástica e ignimbritas soldadas y no soldadas del Neógeno cuya edad oscila entre 4,9 y 1,7 Ma (Paquereau-Lebti et al., 2006).

En el cañón del Río Chili (al pie del flanco occidental), estas lavas se intercalan con sedimentos volcaniclásticos e ignimbritas no soldadas que tienen buzamientos bajos (2° a 5°). Uno de estos flujos de lava, el más grueso ("El Gordo"), ha sido datado en alrededor de 833 ka (Thouret et al., 2001), pero Ruprecht y Wörner (2007), según el mapeo geológico realizado, sostienen que este flujo proviene del complejo volcánico Chachani y no del volcán Misti.

Luego del emplazamiento de los productos pertenecientes al "Misti 1", se produjo el colapso del flanco sur del aparato volcánico con formación de avalanchas de escombros. Los depósitos resultantes son visibles al pie de los flancos sur, suroeste y oeste (quebrada San Lázaro, sector Villa Ecológica y Mariano Melgar). Estos depósitos corresponden a brechas muy mal

seleccionadas, heterogéneas y heterométricas que cubren flujos de lava y depósitos de flujo piroclástico del "Misti 1". Tienen un espesor promedio de 120 m. El cono "Misti 1" está parcialmente cubierto por dos estratoconos: "Misti 2" y "Misti 3" que tienen menos de 112 000 años, y un cono en la cumbre "Misti 4" de menos de 11 000 años de antigüedad (Figura 5).



Figura 5: Flanco sur del volcán Misti en donde se distinguen las cuatro etapas de actividad eruptiva del volcán Misti definidas por Thouret et al. (2001).

5.2.- Misti 2 (112,000 – 40,000 años)

Según Thouret et al. (2001), "Misti 2" incluye tres grupos de depósitos: Grupo 2-1, Grupo 2-2 y Grupo 2-3, emplazados entre 3000 y 4400 m s.n.m., y fechados entre 112,000 y 40,000 años.

El Grupo 2-1 ha sido fechado entre 112,000 y 70,000 años (Thouret et al., 2001). Este grupo está compuesto por flujos de lava y domos de lava de composición andesítica, que forman el cono medio del aparato volcánico. Las lavas tienen entre 40 y 80 m de espesor, y entre 20° y 30° de inclinación. Al pie de los flancos sur, suroeste y noreste las lavas se intercalan con depósitos

de flujos de bloques y ceniza, y con algunos flujos de escoria y pómez. El conjunto alcanza unos 500 m de espesor acumulado.

El Grupo 2-2 (70,000 y 50,000 años) comprende depósitos de bloques de lava andesíticos, densos, prismáticos y monolitológicos, casi sin matriz, de 10 a 20 m de espesor, y ubicados aproximadamente a 10 km al sur y suroeste del cráter (Quebradas Pastores, Agua Salada y Huarangal). Estos depósitos se atribuyen a colapsos de domos de lava. Descansan sobre los depósitos de avalanchas de escombros atribuidos a uno (o más) colapso(s) del flanco del estratocono "Misti 1".

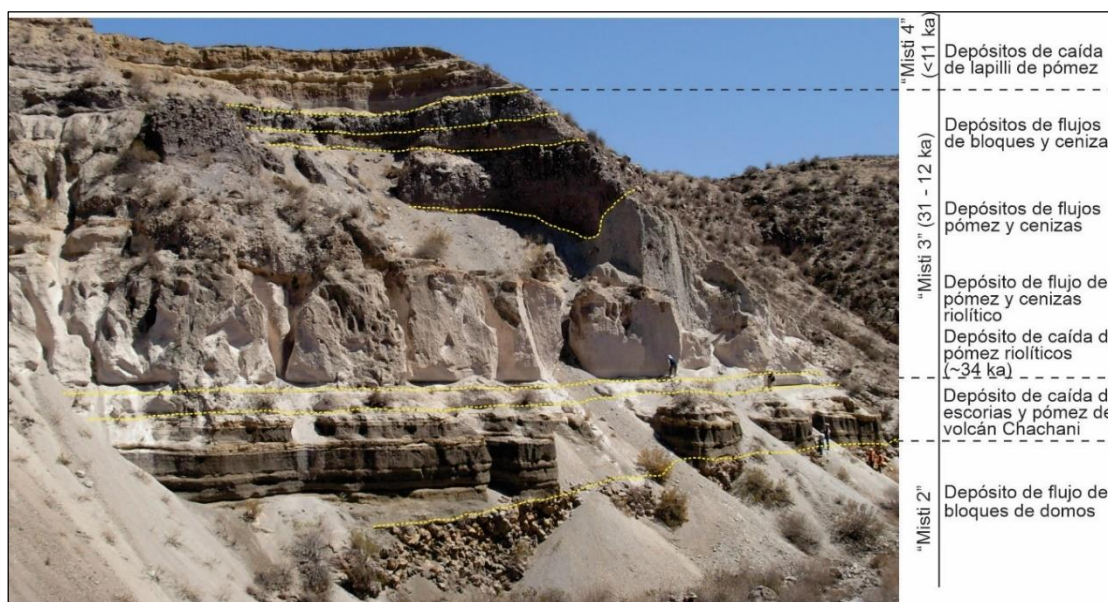


Figura 6.- Afloramientos de depósitos piroclásticos generados por el Misti que yacen en la quebrada Pastores, al suroeste de la cima del Misti.

Por encima de los depósitos de bloques de lava se encuentran al menos cuatro depósitos de caída de escoria de color verdoso, generados por el volcán Chachani, visible en Quebrada Pastores (Figura 6) y distrito de Alto Selva Alegre. Estos últimos depósitos están cubiertos por series volcanoclasticas retrabajadas que marcan un período de erosión entre los grupos 2-2 y 2-3.

Hacia el final del período "Misti 2", se produjo el colapso del flanco sur del aparato volcánico, cuyos depósitos resultantes son brechas muy mal

seleccionadas, heterogéneas y heterométricas que se originan a partir de depósitos de avalancha de escombros. Estos depósitos de avalanchas son visibles a 8 km al pie del flanco sur (quebradas San Lázaro y Huarangal) donde tienen un espesor promedio de unos 40 m, y cubren cerca de 40 km².

El Grupo 2-3 (ca. 50,000 a 40,000 años) incluye depósitos de flujos de pómez y ceniza, endurecidos y de composición dacítica y andesítica, que tienen entre 12 y 25 m de espesor. El volumen estimado por Thouret et al. (2001) es del orden de 4 a 5 km³. Estos depósitos son visibles al pie del flanco sur y sureste del Misti (sector Chapi Chico, y Quebradas Honda y Grande).

5.3.- Misti 3 (38,000 – 11,000 años)

La etapa "Misti 3" incluye cuatro grupos de depósitos: Grupo 3-1, Grupo 3-2, Grupo 3-3 y Grupo 3-4, fechados entre 38,000 y 11,000 años A.P.

El Grupo 3-1 (38,000 a 31,000 años) incluye flujos de lava que forman el cono superior del volcán (entre 4400 y 5600 m s.n.m.), así como depósitos de flujos de pómez y ceniza de composición riolítica a andesítica, y caída de lapilli de pómez de composiciones dacítica y riolítica (depósitos de caída de pómez "Sacarosa", "Fibrosa" I, "Fibrosa II") con un volumen mínimo total de 1,5 km³. Una datación ¹⁴C realizada en madera carbonizada situada bajo uno depósito de flujo de pómez y cenizas arroja edades entre 34,000 y 31,000 años A.P. (Thouret et al., 2001). Así mismo otra datación de madera carbonizada situada bajo depósitos de caída de lapilli de pómez "Sacarosa" arroja una edad de entre 39,200 y 36,100 años A.P. (Harpel et al., 2023).

El Grupo 3-2 (30,000 a 25,000 años) incluye varios tipos de depósitos de flujo de pómez y ceniza dacítica, y depósitos de flujo de bloques y ceniza andesíticos, intercalados con algunos depósitos de caída de lapilli de pómez. El espesor total se estima entre 80 y 100 m. Estos depósitos son visibles entre

6 y 10 km del flanco sur del volcán, en las Quebradas Huarangal, Honda y Grande.

El Grupo 3-3 (25,000 a 20,000 años) corresponde a por lo menos cinco depósitos de flujos de bloques y cenizas de composición andesítica, intercalados con algunos depósitos de caída de lapilli de pómez andesítica. Los depósitos de flujo tienen entre 5 y 20 m de espesor y afloran en quebradas ubicadas al pie del flanco sur (por ejemplo, Quebrada Grande y Honda). Hacia la parte superior del grupo 3-3 también distinguimos algunos depósitos de lahar y caídas de tefra, intercalados con depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas. Estos depósitos de lahar serían el resultado del derretimiento de los glaciares de la última glaciación (entre 24,000 y 12,000 años); según la estratigrafía regional establecida por Seltzer (1990).

El Grupo 3-4 (14,000 a 11,000 años) incluye dos depósitos voluminosos de flujos de pómez y cenizas dacíticas (en total de casi 1 km³), intercalados con dos capas de caída de lapilli de pómez y dos depósitos de oleadas piroclásticas con estratificación cruzadas. Los depósitos de flujos de pómez y ceniza afloran 12 km al sur y suroeste del cráter (áreas urbanas de Los Gráficos y San Luis) donde tienen entre 6 y 8 m de espesor.

5.4.- Misti 4 (<11,000 años)

Durante la última etapa eruptiva denominada "Misti 4", se produjeron al menos 10 erupciones que emplazaron al menos diez capas delgadas de caída de cenizas y lapilli de pómez ligadas a erupciones explosivas de tipo subpliniano, freatomagmático y vulcaniano. Los depósitos de caída están conformados por lapilli de pómez de color amarillento y ceniza gris, a veces intercalados con algunos niveles de suelos y depósitos eólicos delgados. Cada capa tiene entre 5 y 35 cm de espesor. Estos depósitos son visibles entre 6 y 8 km al pie de los flancos oeste y noroeste del volcán. Estos productos muestran

que Misti ha experimentado al menos 10 erupciones "importantes" desde hace 11 ka.

La última erupción explosiva de gran magnitud (Pliniana) del Misti, ocurrió hace 2050 años A.P. (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011). Esta erupción tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) igual a 5, y generó depósitos de caídas de tefras de 1.4 km^3 y flujos piroclásticos de 0.01 km^3 (Harpel et al., 2011), Figura 7. El depósito a menudo, presenta pómez bandeadas de composición andesítica y dacítica. Este depósito de 30 cm de espesor (10 km al suroeste del volcán Misti) se dispersó en forma de lóbulo cuyo eje está orientado hacia el suroeste del cráter (Harpel et al., 2011). En algunas quebradas de los flancos sur, sureste y suroeste del Misti (p. ej., quebradas San Lázaro, Huarangal y Agua Salada), sobre el depósito de caída de pómez yacen al menos cuatro niveles de flujos de pómez y ceniza ricos en fragmentos líticos lávicos. Cada capa tiene entre 3 y 5 m de espesor. Estos últimos depósitos están cubiertos por depósitos de lahar ricos en pómez. En efecto, dicha erupción generó lahares de 0.04 km^3 , los cuales descendieron en dirección del área que actualmente ocupa la ciudad de Arequipa, es decir por las quebradas de los flancos sur y suroeste del volcán: San Lázaro y Huarangal-Los Incas.

La erupción ocurrida hace 2050 años probablemente generó el gran cráter de la cumbre del Misti que tiene 900 m de diámetro (Thouret et al., 2001), en cuyo interior se encuentra el pequeño cráter (550 m de diámetro, 200 m de profundidad), rodeado de ceniza y escoria negra de edad histórica (Legros, 2001). En el fondo del pequeño cráter existe un tapón de lava andesítica atribuido a la erupción del siglo XV (1440-1470 d.C.).



Figura 7.- Afloramiento de depósitos de flujos piroclásticos y lahar de hace 2050 años A.P., del volcán Misti que aflora en la quebrada Huarangal.

Actividad eruptiva prehistórica e histórica: Sobre las laderas del volcán Misti existen delgadas capas de ceniza negra que cubren el depósito de caída pliniana de hace 2050 años A.P. Estos depósitos fueron producidos por pequeños eventos vulcanianos y probablemente freatomagmáticos o freáticos ocurridos durante los últimos 2000 años. El depósito de ceniza mejor conservado tiene un espesor de 4 cm, a 8 km al suroeste del cráter. Este depósito probablemente corresponde a una erupción vulcaniana ocurrido en el siglo XV (1440-1470 d.C., Chávez, 1992) que duró varios meses o años. Estas cenizas se dispersaron en forma de lóbulo cuyo eje está orientado hacia el oeste y suroeste del Misti (Cobeñas et al., 2012). La facies distal alcanza 1 cm de espesor cerca del aeropuerto de Arequipa, a 18 km al noroeste del volcán. Estas cenizas se encuentran debajo de la ceniza dacítica de la erupción pliniana del año de 1600 d.C. del volcán Huaynaputina.

Además, las crónicas históricas también mencionan eventos fumarólicos o erupciones freáticas leves en los años 1542, 1599, 1826, 1830-31, 1869 y 1870 (Siebert et al., 2010; Suni, 1999), cuyos depósitos son poco o nada reconocidos en el campo. Con menos incertidumbre, cuatro eventos (¿erupciones freatomagmáticas o eventos sísmicos?) ocurrieron en mayo de 1677, 9 de julio de 1784 y del 28 de julio al 10 de octubre de 1787 (Siebert et al., 2010; Chávez, 1992; Suni, 1999; Thouret et al., 2001). Se han reportado algunas crisis fumarólicas moderadas en 1948 - 1949 y en 1984 - 1985 (Chávez, 1992; Suni, 1999; Thouret et al., 2001). La actividad actual del volcán Misti se manifiesta por muy leve actividad sísmica y emisiones de gases tenues visibles alrededor del domo ubicado en el fondo del cráter y en la parte superior del flanco NE.

6.- CARACTERÍSTICAS DE LOS LAHARES EN QUEBRADAS

En las quebradas y valles que se prolongan de los flancos sur, sureste y suroeste del volcán Misti como quebradas San Lázaro, Venezuela, Huarangal-Los Incas, Pastores y El Pato (Figura 8), se han identificado varios depósitos de lahares. Entre estos depósitos se ha identificado un depósito de lahar asociado a la erupción de hace 2050 años A.P. del volcán Misti, visible en la quebrada San Lázaro, Huarangal-Los Incas, río Chili y en inmediaciones del Cercado de Arequipa (Harpel et al., 2011).

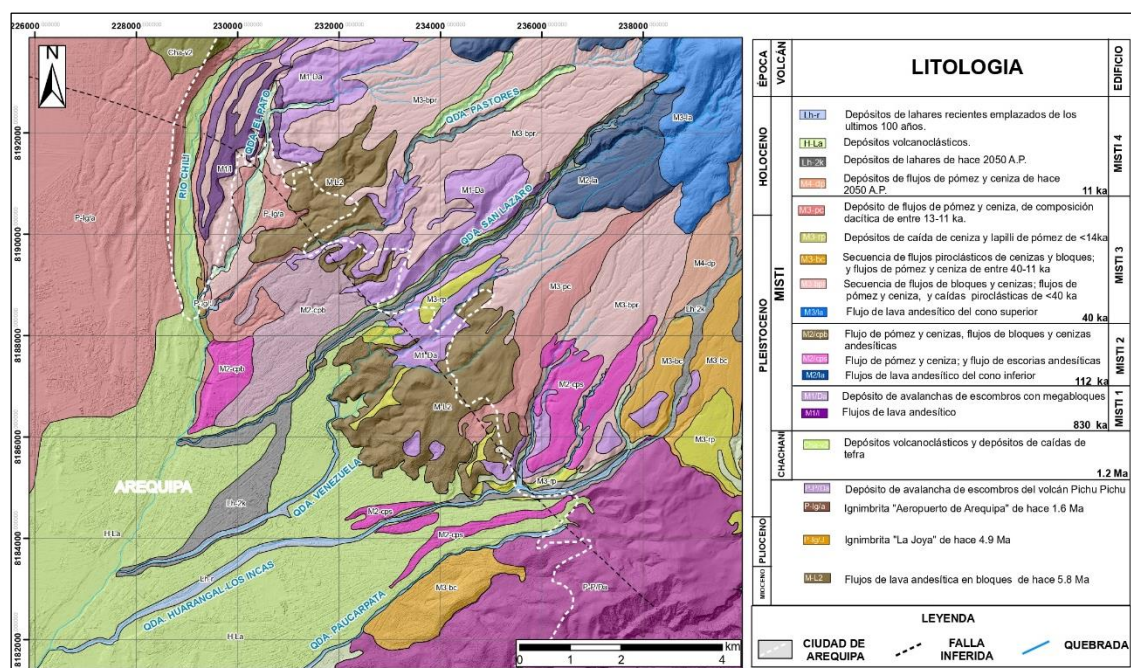


Figura 8.- Mapa geológico del sector suroeste del volcán Misti (modificado de Mariño et al., 2016).

6.1.- Quebrada Huarangal – Los Incas

La Quebrada Huarangal-Los Incas tiene una longitud aproximada de 23 km, siendo sus afluentes principales las quebradas Huarangal, Huarangueros, entre otras dos quebradas que se prolongan del flanco suroeste del volcán Misti. Estas quebradas atraviesan los distritos de Paucarpata, Mariano Melgar, José Luis Bustamante y Rivero, y el Cercado de Arequipa.

A lo largo de la quebrada Huarangal - Los Incas, se han identificado más de tres depósitos de lahares recientes (emplazados las ultimas siglos), con espesores de 0.1 a 0.9 m, que descansan sobre depósitos de lahares que contienen las pómez de la erupción de hace 2050 años A.P. (pómez andesíticas con bandas gris claras y gris oscuras), y presencia de materiales de escombros (botellas, bolsas plásticas, ladrillos, etc.). En el marco del presente estudio se han realizado columnas estratigráficas en diversos sectores de la quebrada.

Depósitos de lahares en el sector A.H. San Gerónimo: En la margen izquierda de la quebrada Huarangal - Los Incas, en el distrito de Mariano Melgar, a la altura del A.H. San Gerónimo (coordenadas UTM: 235689 E; 8184981 S) se distingue una secuencia de 06 niveles de lahares, con espesores de 0.48 a 0.75 m, los cuales contienen restos de material antrópico (Figura 9).

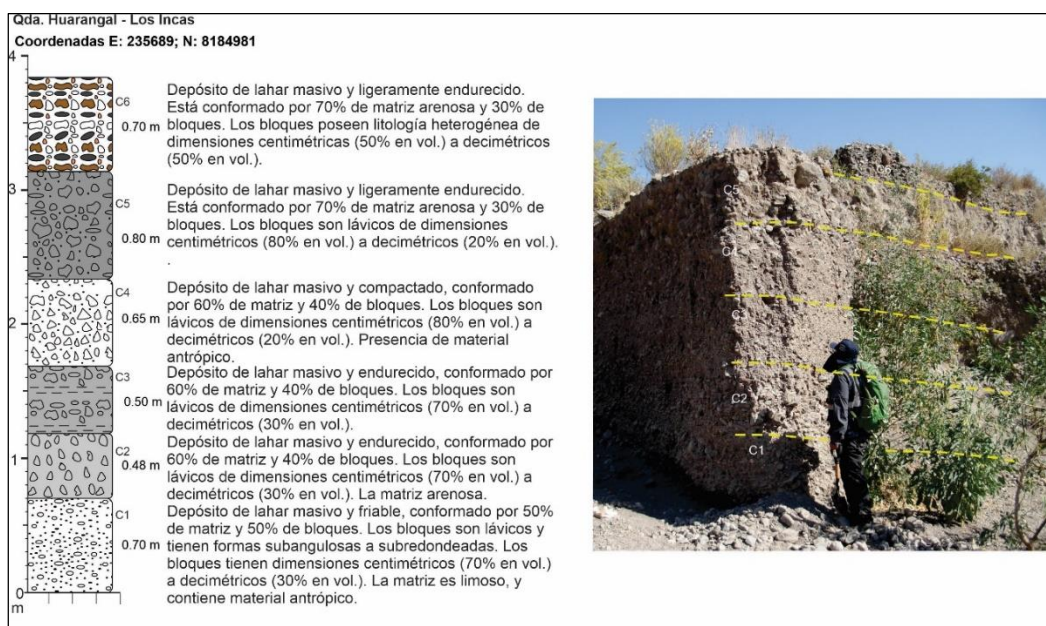


Figura 9.- Columna estratigráfica de los depósitos de lahares recientes que afloran en inmediaciones del A.H. San Gerónimo.

Depósitos de lahares en el sector A.H. Santa Fe de Almirante Miguel Grau: En la margen derecha de la quebrada Huarangal - Los Incas, en el

distrito de Mariano Melgar, a la altura del A.H. Santa Fe de Almirante Miguel Grau (coordenadas UTM: 235102 E; 8184955 S) se distinguen 05 capas de lahares, con espesores de 0.25 a 1.10 m, los cuales contienen pómez de la erupción de hace 2050 años A.P. del Misti (Figura 10). Las capas del nivel superior contienen restos de material antrópico.

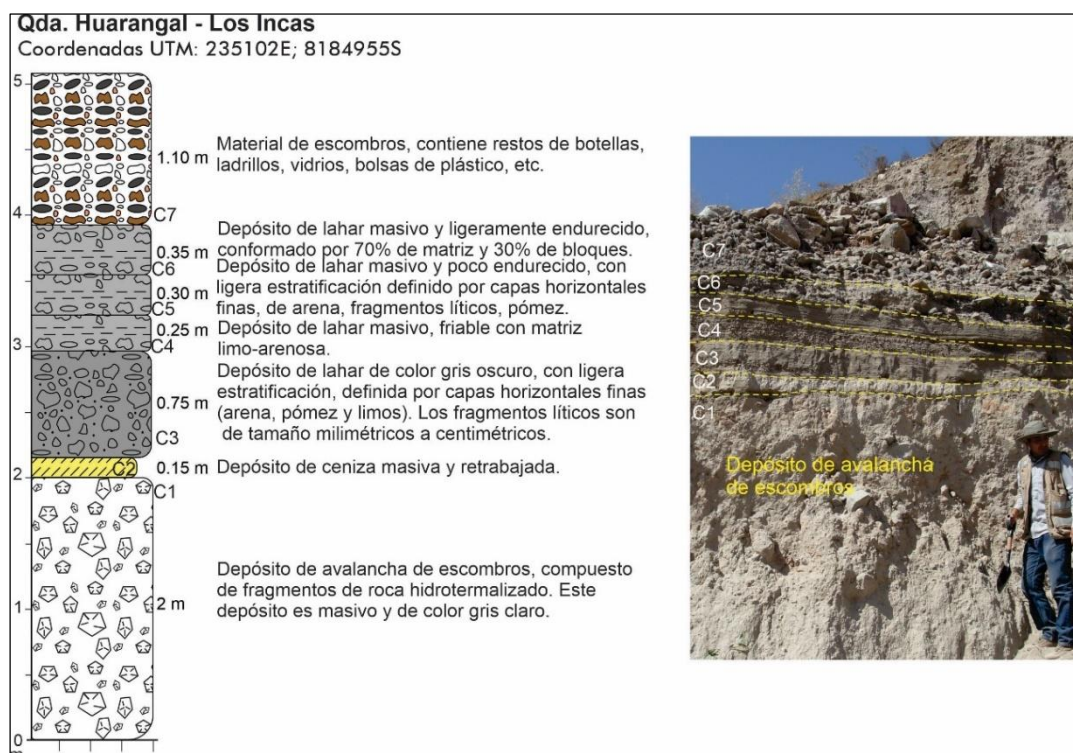


Figura 10.- Columna estratigráfica de los depósitos de lahares recientes que yacen en inmediaciones del A.H. Santa Fe de Almirante Miguel Grau.

Depósitos de lahares en el Sector A.H. 29 de agosto: En la margen izquierda de la quebrada Huarangal - Los Incas, en el distrito de Paucarpata, a la altura del A.H. 29 de agosto (coordenadas UTM: 234935 E; 8184737 S), se distinguen 07 capas de lahares, con espesores de 0.10 a 1.15 m. Estos depósitos contienen pómez de la erupción de hace 2050 años A.P. (Figura 11), por lo cual se alegan que se emplazaron hace menos de 2050 años A.P. Las dos capas superiores presentan material antrópico: bolsas, ladrillos, etc.

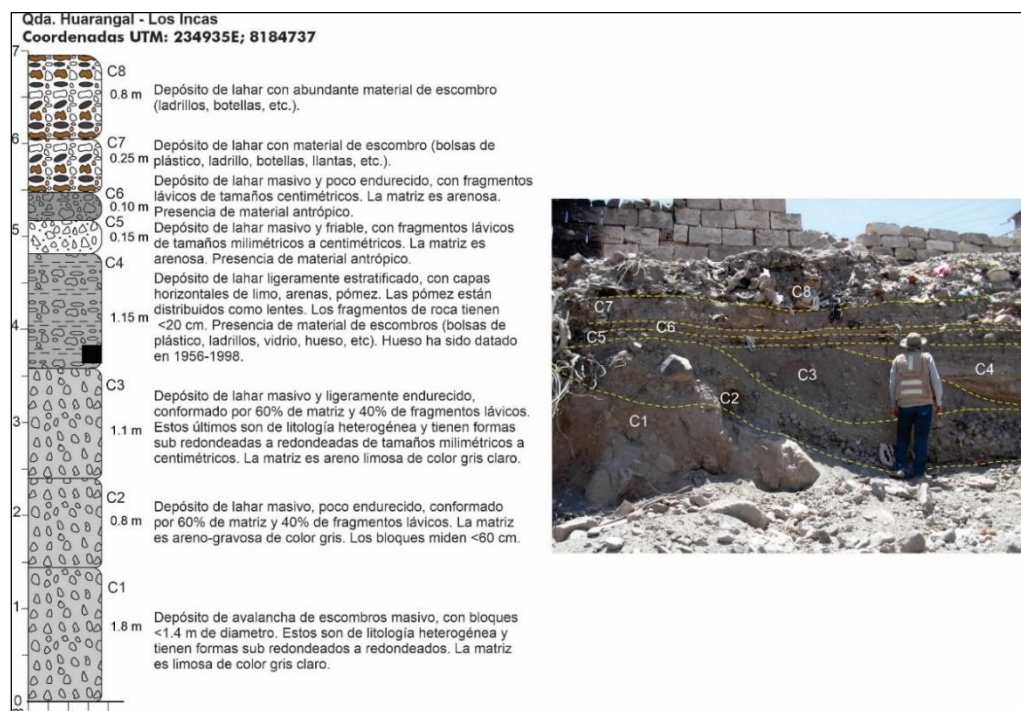


Figura 11.- Columna estratigráfica de los depósitos de lahares recientes que afloran en el sector del A.H. 29 de agosto.

Depósitos de lahares en el sector A.H. Revolución Peruana (Mariano Melgar): En la margen derecha de la quebrada Huarangal - Los Incas, en el distrito de Mariano Melgar, a la altura del A.H. Revolución Peruana (coordenadas UTM: 233893 E; 8184654 S), se distinguen nueve capas de lahares, con espesores de 0.06 a 1.0 m (Figura 12).

Depósitos de lahares en la Urbanización La Victoria: En la margen izquierda de la quebrada Huarangal - Los Incas, en el distrito de Paucarpata, a la altura de la Urb. La Victoria (coordenadas UTM: 231636 E; 8183941 S), se distinguen nueve capas de lahares, con espesores de 0.15 a 0.7 m (Figura 13) emplazados hace menos de 2000 años.

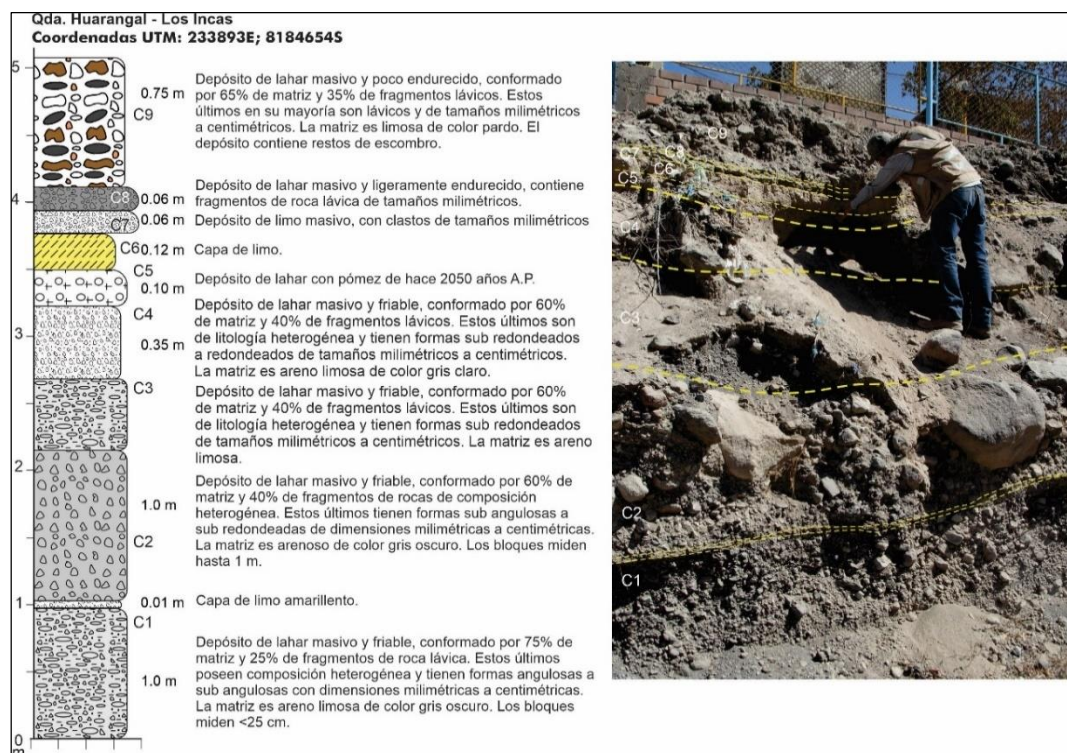


Figura 12.- Columna estratigráfica de los depósitos de lahares recientes que afloran en inmediaciones del A.H. Revolución Peruana, en el Puente Francisco Bolognesi.

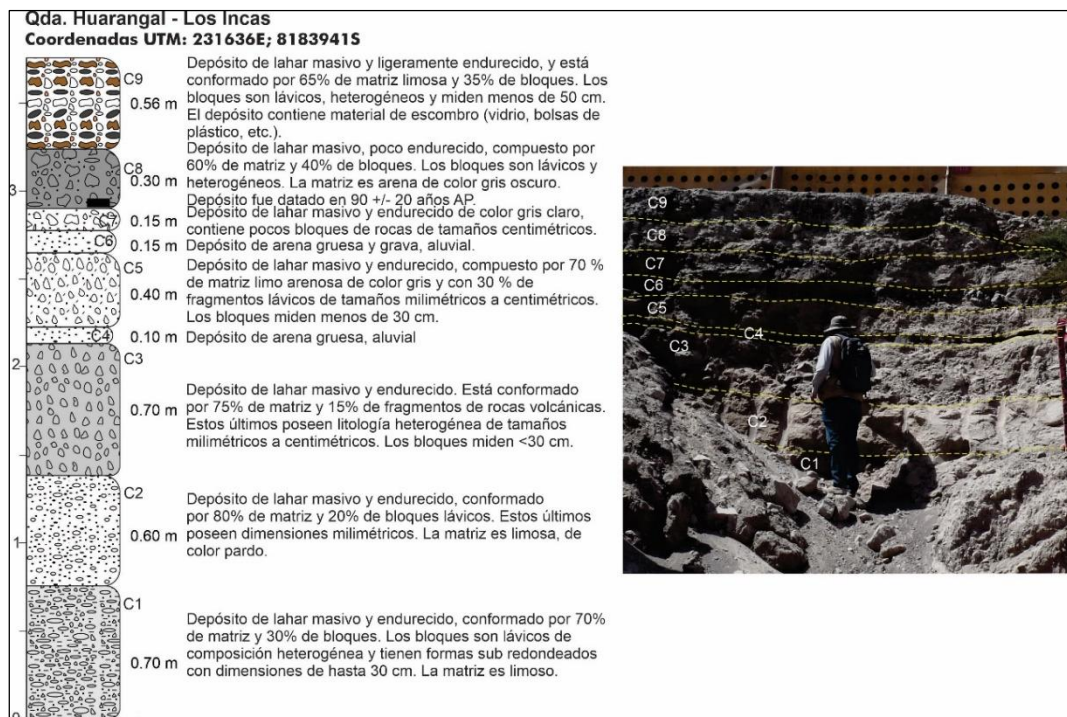


Figura 13.- Columna estratigráfica de los depósitos de lahares recientes que afloran en inmediaciones de la urbanización La Victoria.

6.2.- Quebrada Venezuela

La quebrada Venezuela tiene aproximadamente 17.5 km de longitud y comprende los distritos de Miraflores, Mariano Melgar, José Luis Bustamante Rivero, y Cercado de Arequipa. A lo largo de esta quebrada se han identificado depósitos de lahares recientes. En esta quebrada los depósitos de lahares recientes, tienen espesores de 0.22 a 1.2 m, identificados en ambas márgenes de la quebrada Venezuela.

Depósitos de lahares en sector Pasaje Tahuantinsuyo: En la quebrada Venezuela, a la altura del Pasaje Tahuantinsuyo, en el distrito de Miraflores (coordenadas UTM: 231901 E; 8186983 S) se han identificado al menos 12 capas de depósitos de lahares con espesores de 0.3 a 1.20 m emplazados hace menos de 2000 años A.P. (Figura 14).

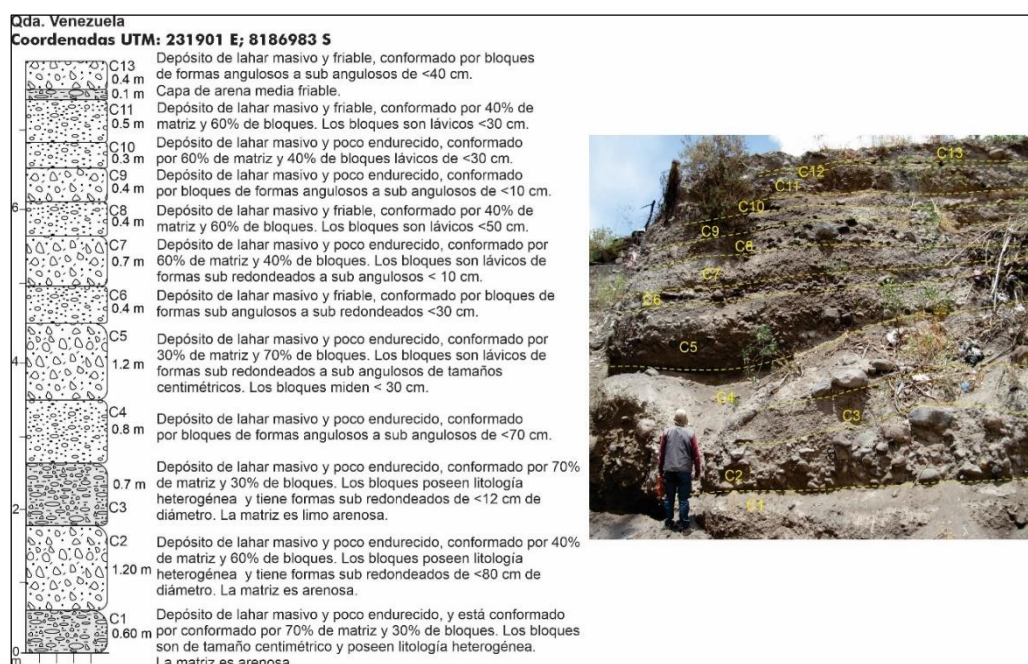


Figura 14.- Columna estratigráfica de la quebrada Venezuela. En esta columna se observa depósitos de lahares anteriores a 2000 años A.P.

Depósitos de lahares en sector de Cercado de Arequipa: En la quebrada Venezuela, a la altura del sector de Cercado de Arequipa (coordenadas UTM: 227980 E; 8183387 S) se han identificado una

secuencia de siete depósitos de lahares, cuatro de las cuales contiene pómez de la erupción de hace 2050 A.P. y la capa superior (C5) es posterior a la erupción de hace 2050 A.P., por contener material antrópico (Figura 15).

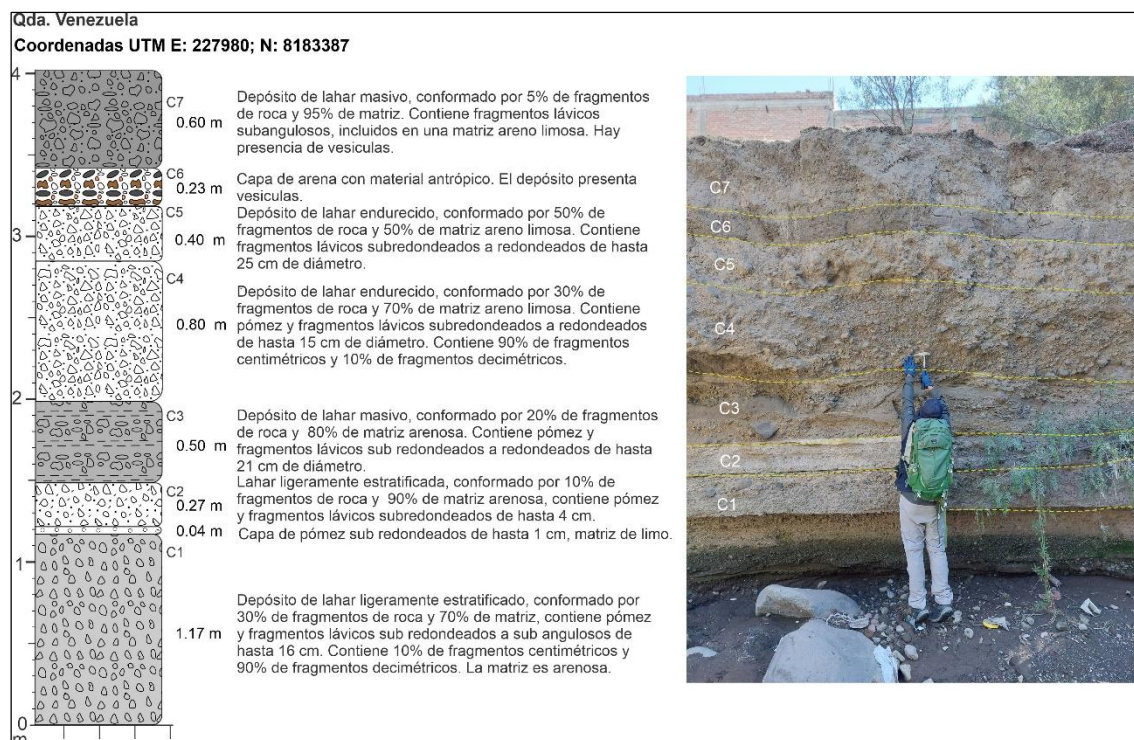


Figura 15.- Columna estratigráfica de la quebrada Venezuela. En este sector se observa depósitos de lahares anteriores y posteriores a los generados hace 2050 años A.P. En la parte superior se observan tres capas de lahares con material antrópico.

6.3.- Quebrada San Lázaro

La quebrada San Lázaro tiene aproximadamente 18 km de longitud y se extiende desde la ladera suroeste del volcán Misti hasta el río Chili. Dicha quebrada separa los distritos de Alto Selva Alegre y Miraflores. En algunos sectores, y ambas riberas de esta quebrada se identifican depósitos de lahares de la erupción de hace 2050 años A.P. Sobre la cual descansan al menos cinco depósitos de lahares recientes.

En esta quebrada los depósitos de lahares recientes miden hasta 0.34 m, los cuales sobreyacen a los depósitos de lahares de la erupción del volcán

Misti de hace 2000 años (Figura 16). Los depósitos de lahares de la última erupción consisten de hasta cuatro niveles, menores a 1 m de espesor. En general son endurecidos, masivos y con contenido de pómez y fragmentos líticos incluidos dentro de una matriz fina (Figura 16).

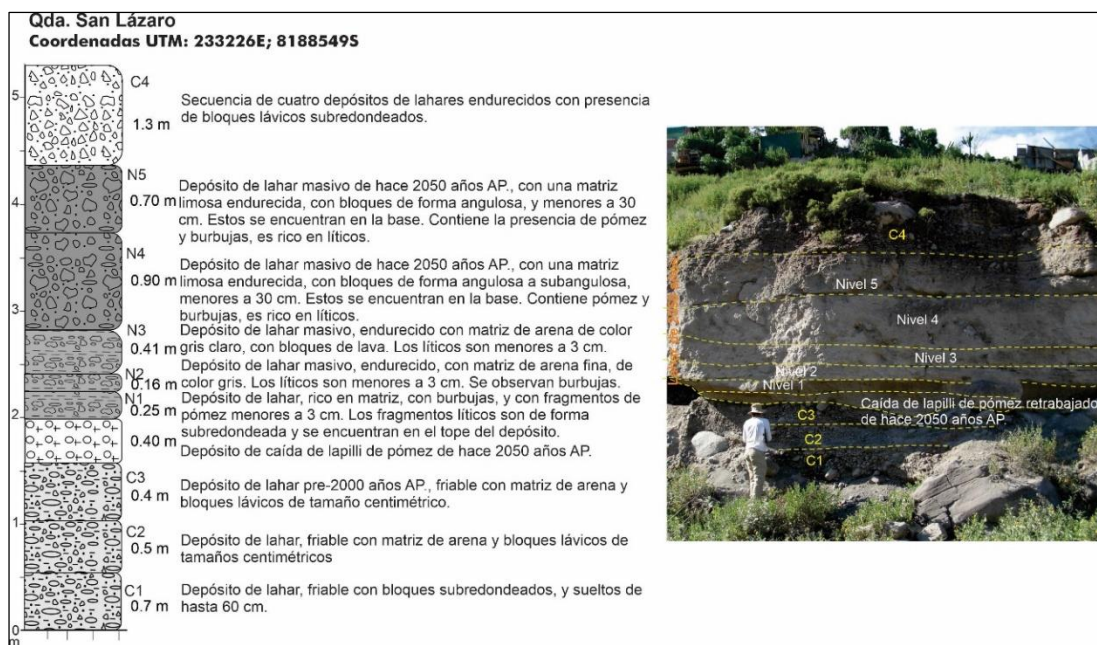


Figura 16.- Depósito del lahar de la erupción de hace 2050 años A.P. del volcán Misti visible en la Quebrada San Lázaro.

A continuación se describen los tipos de depósitos recientes que afloran en la quebrada San Lázaro.

Depósitos de lahares en sector A.H. Alto Selva Alegre Zona B: A la altura del A.H. Alto Selva Alegre Zona B con coordenadas UTM: 231478 E; 8187195 S se han identificado 11 depósitos de lahares, siendo cinco de estos depósitos recientes, por encontrarse al interior material antrópico. Los depósitos tienen entre 0.20 a 0.40 m de espesor, son masivos, y contienen fragmentos lávicos subredondeados a redondeados (Figura 17).



Figura 17.- Secuencia de lahares con cinco depósitos recientes con material antrópico visible en la Quebrada San Lázaro en el A.H. Selva Alegre Zona B.

Depósitos de lahares en el sector A.H. Alto Selva Alegre Zona A: A la altura del A.H. Alto Selva Alegre, Zona A (coordenadas UTM: 231286 E; 8187014 S) se han identificado nueve depósitos de lahares emplazados los últimos 2000 años. Dichos depósitos contienen fragmentos lávicos grises y oxidados incluidos dentro de una matriz de arena y limo. Cada depósito mide entre 0.15 a 1.50 m de espesor. Dichos depósitos son masivos y friables (Figura 18).

Depósitos de lahares en el sector Puente Los Geranios (MTC): A la altura del Puente Geranios (MTC) con coordenadas UTM: 229633 E; 8186042 S se han identificado secuencias de depósitos de lahares recientes, con espesores de 0.10 a 0.34 m, los cuales contienen pómez de la erupción de hace 2000 años A.P. del volcán Misti (Figura 20).

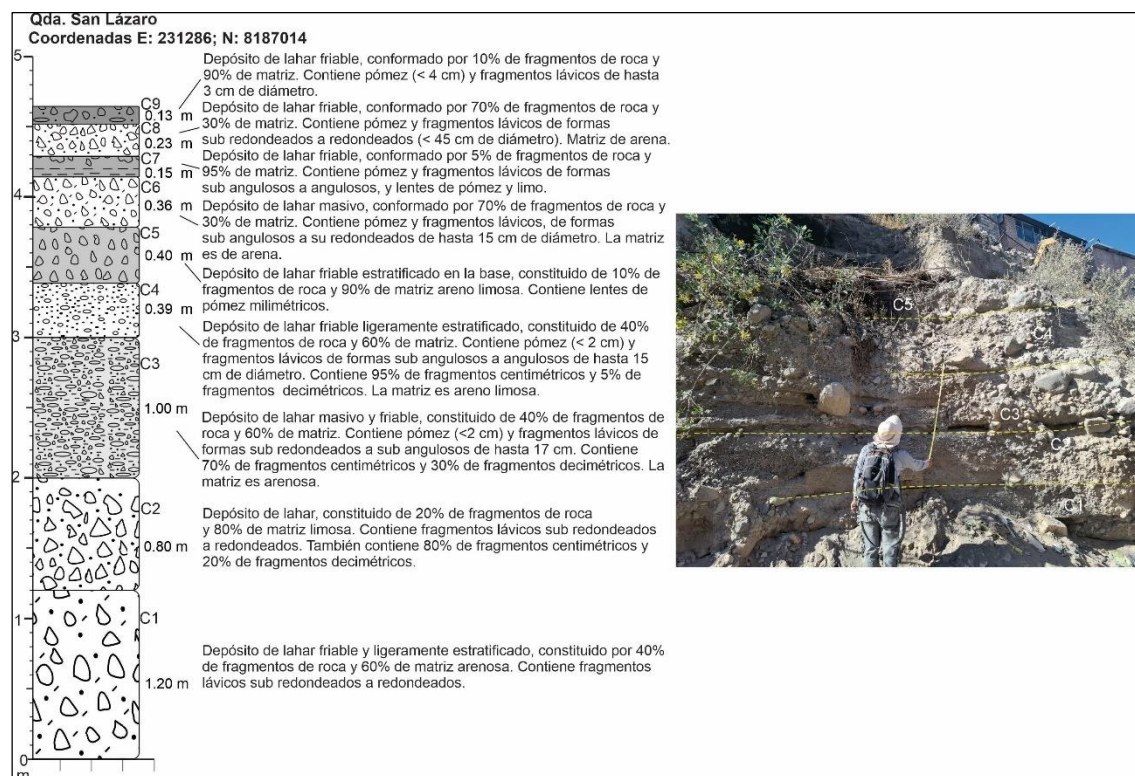


Figura 19.- Depósitos del lahar reciente visible en la quebrada San Lázaro emplazados hace menos de 2050 A.P.

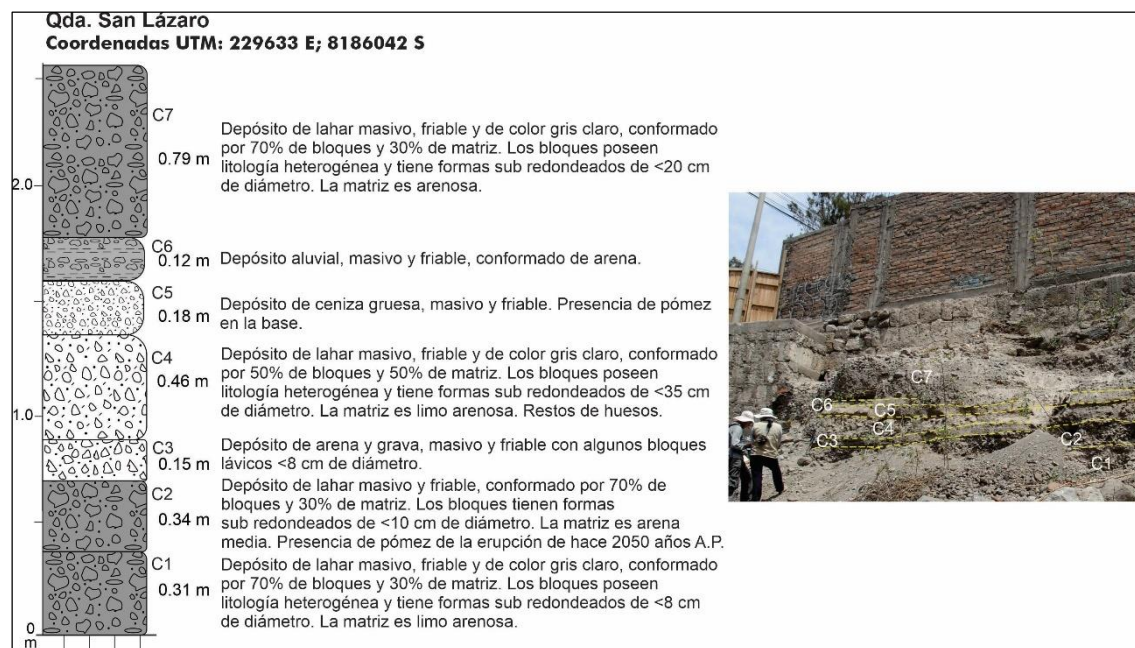


Figura 20.- Columna estratigráfica de la quebrada San Lázaro, en donde se observan depósitos de lahares recientes.

6.4.- Quebrada Pastores

La quebrada Pastores tiene una longitud aproximada de 9 km que se extiende desde la ladera suroeste del volcán Misti y se prolonga en dirección NE-SO, hasta su confluencia en el río Chili. Nace de varias quebradas afluentes de corto recorrido y relativamente profundas (20-50 m). La quebrada Pastores atraviesa el distrito de Alto Selva Alegre. En ambos márgenes de esta quebrada se identifican depósitos de lahares del Pleistoceno al reciente.

Estratigrafía de los depósitos de lahares emplazados en la quebrada San Lázaro

- **Sector del AA. HH. El Mirador de Arequipa:** A la altura del AA. HH. El Mirador de Arequipa (coordenadas UTM: 231487 E; 818977745 S) existen depósitos de lahares masivos y endurecidos del Pleistoceno-Holoceno, con espesores de 0.3 a 1.5 m (Figura 21). En esta zona las capas de lahares no contienen material antrópico.

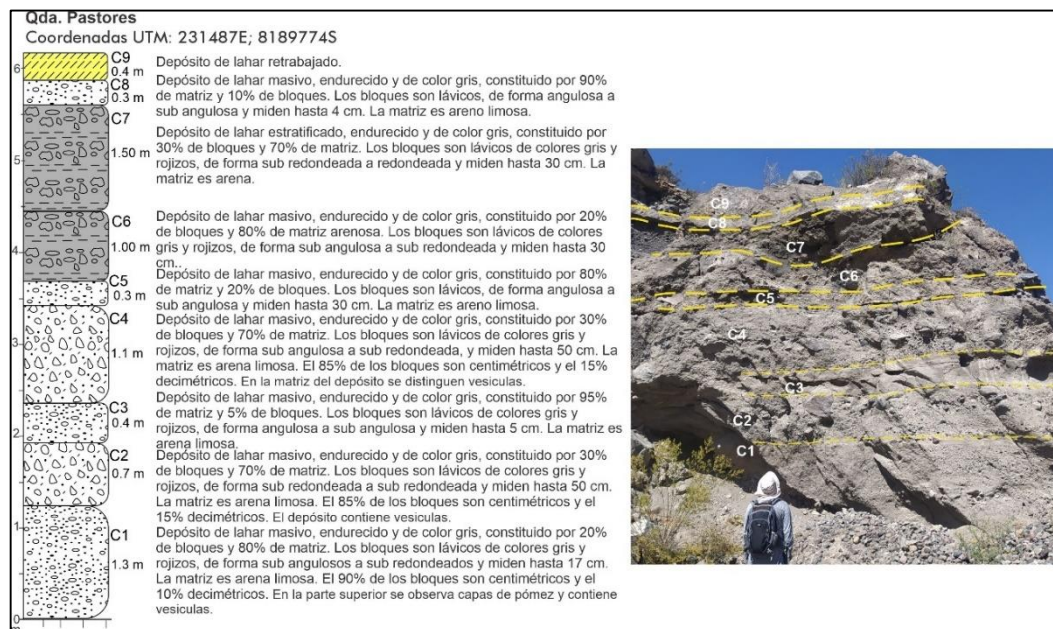


Figura 21.- Secuencia de ocho depósitos de lahares del Pleistoceno-Holoceno visible en la Quebrada Pastores, a la altura del AA. HH. El Mirador de Arequipa.

- **Sector del AA. HH. El Salvador:** A la altura del AA. HH. El Salvador (coordenadas UTM: 229428 E; 8188400 S) existen nueve secuencias de depósitos de lahares masivos y endurecidos del Pleistoceno-Holoceno, con espesores de 0.3 a 1.5 m (Figura 22). Estos depósitos se caracterizan por contener abundantes fragmentos lávicos (>30%) incluidos dentro de una matriz limo arenosa.

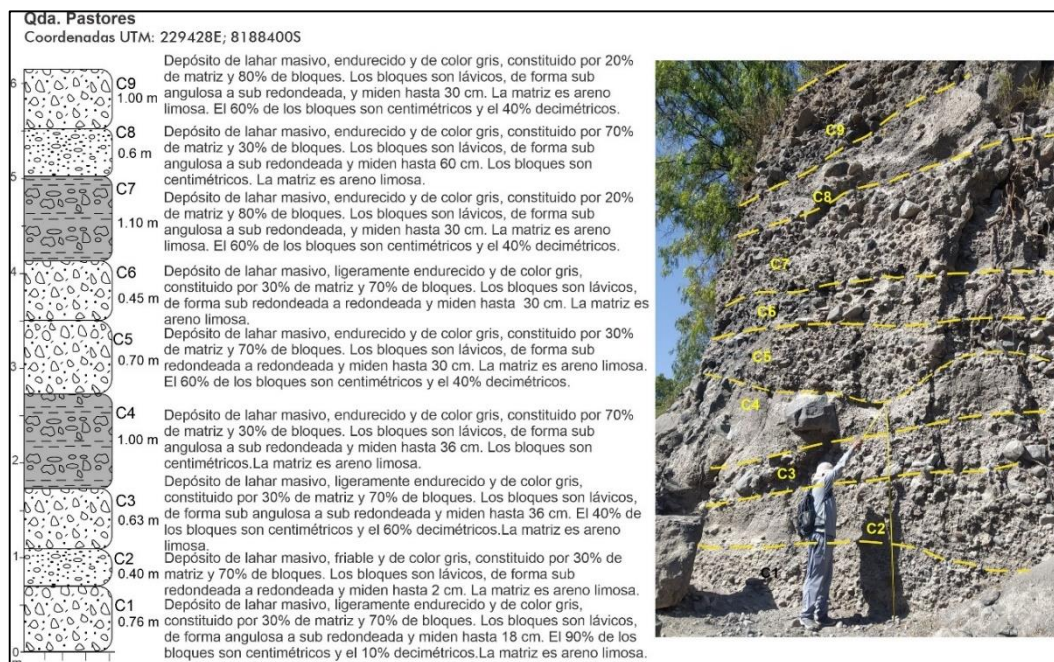


Figura 22.- Secuencia de nueve depósitos de lahares del Pleistoceno-Holoceno visible en la Quebrada Pastores, a la altura del AA.HH. El Salvador.

- **Sector del AA. HH. Pampa Chica Chilina:** A la altura del AA. HH. Pampa Chica Chilina (coordenadas UTM: 229625 E; 8188532 S) existen nueve depósitos de lahares (principalmente flujos hiperconcentrados) estratificados y endurecidos del Pleistoceno, de espesores centimétricos a métricos (Figura 23). Estos depósitos se caracterizan por contener abundantes fragmentos lávicos (>30%) respecto a la matriz limo arenosa.

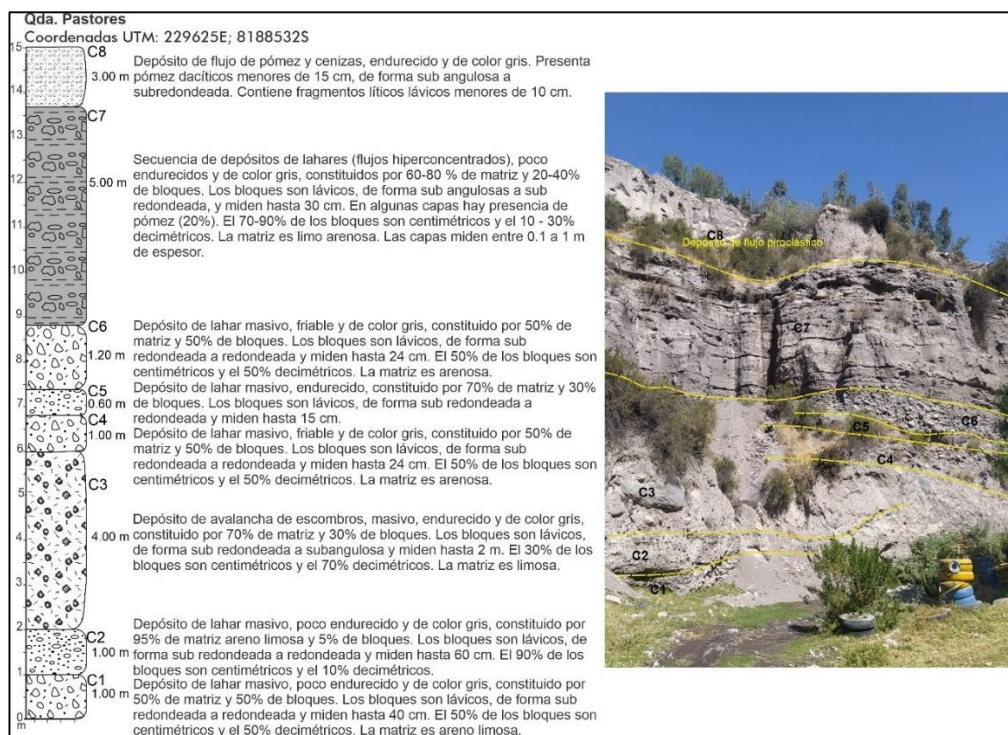


Figura 23.- Secuencia de depósitos de lahares del Pleistoceno visibles en la Quebrada Pastores, a la altura del AA. HH. Pampa Chica Chilina.

- **Sector del AA. HH. Chavín de Huántar:** A la altura del AA. HH. Chavín de Huántar (coordenadas UTM: 231487 E; 8189774 S) existen secuencias de depósitos de lahares estratificados (flujos hiperconcentrados) y friables del Pleistoceno-Holoceno, con espesores de 1.1 a 2.3 m (Figura 24). Estos depósitos se caracterizan por ser delgados y contener abundante matriz limo arenosa (>50%).



Figura 24.- Secuencia de depósitos de lahares del Pleistoceno superior visibles en la Quebrada Pastores, a la altura del AA. HH. Chavin de Huantar.

6.5.- Quebrada El Pato

La quebrada El Pato tiene una longitud aproximada de 8.2 km y se extiende desde la ladera suroeste del volcán Misti, atravesando el distrito de Alto Selva Alegre. Tiene una dirección NE-SO hasta el A.H. La Cantero, donde cambia de dirección Norte-Sur, para finalmente cerca a la confluencia con el río Chili, tomar una dirección NE-SO. Nace de la confluencia de varias quebradas pequeñas de corto recorrido y relativamente profundas. A lo largo de la quebrada El Pato se identifican depósitos de lahares del Pleistoceno al reciente.

Estratigrafía de los depósitos de lahares emplazados en la quebrada San Lázaro

- **Sector del AA. HH. Villa Ecológica zona D:** A la altura del AA. HH. Villa Ecológica zona D (coordenadas UTM: 230456 E; 81915885 S) existen secuencias de depósitos de lahares masivos y endurecidos del Pleistoceno-Holoceno, con espesores de 0.2 a 0.6 m (Figura 25). En esta zona los depósitos de lahares no contienen material antrópico.

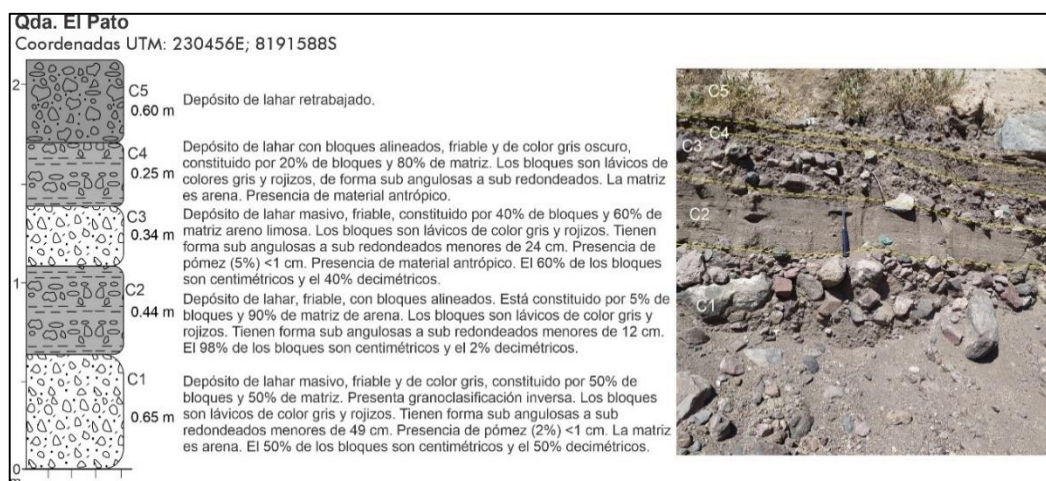


Figura 25.- Secuencia de cinco depósitos de lahares del Pleistoceno-Holoceno visibles en la Quebrada El Pato, a la altura del AA. HH. Villa Ecológica Zona D.

- **Sector del AA. HH. Villa Confraternidad Zona C:** A la altura del AA. HH. Villa Confraternidad Zona C (coordenadas UTM: 230200 E; 81906335 S) existen secuencias de depósitos delgados de lahares masivos y friables, de espesores centimétricos (Figura 26). En esta zona no se distinguen capas con material antrópico, lo que sugiere que los depósitos de lahares son del Pleistoceno-Holoceno.

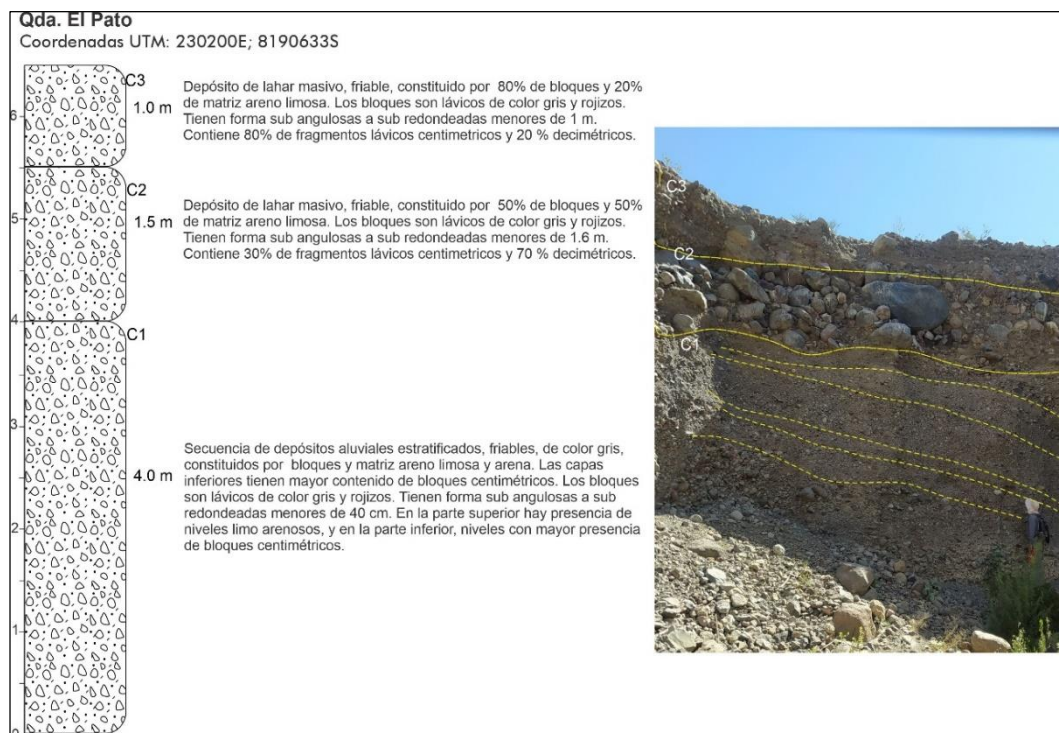
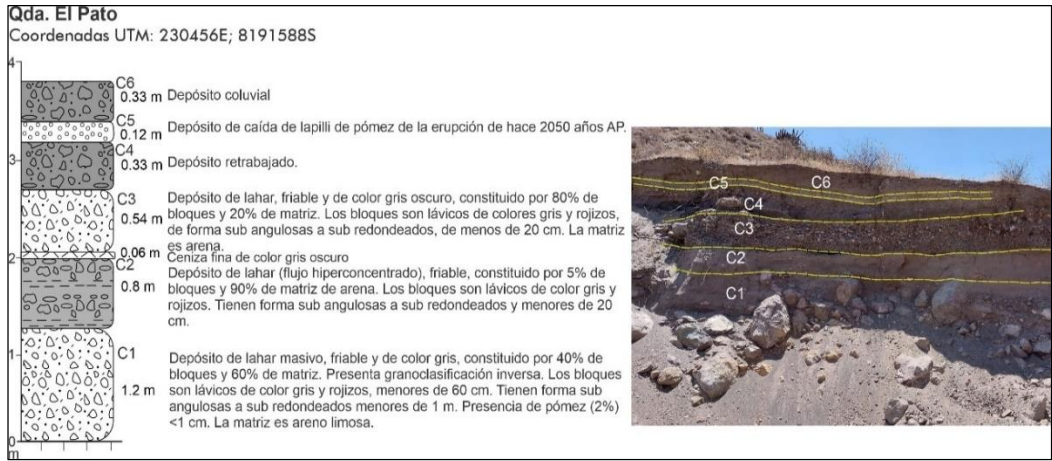


Figura 26.- Secuencia de depósitos de lahares del Pleistoceno-Holoceno visibles en la Quebrada El Pato, a la altura del AA. HH. Villa Confraternidad Zona C.

Al suroeste del punto anterior (coordenadas UTM: 230456 E; 8191588 S) existen secuencias de depósitos delgados de lahares masivos y friables, de espesores centimétricos (Figura 27). En esta zona no se distinguen capas con material antrópico, lo que sugiere que los depósitos de lahares son del Pleistoceno-Holoceno. Además, en la parte superior de la secuencia se distingue el depósito de caída de lapilli de pómez de la erupción de hace 2050 años A.P. del volcán Misti.



7.- MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LAHARES

7.1.- Software VOLCFLOW

VolcFlow es un código (scrip) de MatLab que permite simular la trayectoria de flujos densos, flujos diluidos a partir de los flujos densos y la sedimentación de los flujos diluidos, basado en la aproximación de profundidad media del flujo. El scrip resuelve ecuaciones de conservación de la masa (Ecuación 1) y la cantidad de movimiento (Ecuaciones 2 y 3) (Kelfoun, and Druitt, 2005; Kelfoun, 2017). VolcFlow permite el uso de diferentes leyes de la reología y condiciones de fuente. Dicho código fue desarrollado en el Laboratorio de Magmas y Volcanes, de la Universidad Clermont Auvergne (Francia).

Las ecuaciones de conservación son las siguientes:

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

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

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

En donde: h es el espesor del flujo (calculado ortogonalmente a la superficie), t es el tiempo, $u=(u,v)$ es la velocidad del flujo a lo largo de la pendiente, α es la pendiente del terreno, ρ es la densidad *bulk* del flujo, g es la gravedad, X e Y denotan las direcciones a lo largo de las pendientes. La variable $T=(T_x, T_y)$ expresa la tensión retardante basal que varía de acuerdo a la reología del producto simulado (Kelfoun, 2011).

Las ecuaciones 1 a 3 son resueltas utilizando un método numérico que integra todas las características reológicas con base en el espesor y la velocidad del flujo, el comportamiento de la fricción, y el tipo de flujo viscoso

y turbulento, lo que permite que VolcFlow simule la erosión y la sedimentación y logre capturar los choques y las relajaciones (Toro, 2001). Este esquema numérico se puede utilizar en topografías complejas.

Las ecuaciones de conservación de momento y masa, consideran el sistema cerrado. Es decir, no se introduce material por fuente externa durante el proceso de simulación. Las ecuaciones son similares a las utilizadas por Costa y Macedonio (2005) sin la dependencia de temperatura en el fluido homogéneo e incompresible. Usando la herramienta de simulación es posible definir y delimitar probables zonas de riesgo expuesta sobre volcanes activos.

El término $k_{actpass}$ es un coeficiente de presión de la tierra que está en función de los ángulos de fricción interna y basal (Iverson & Denlinger, 2001), y es definida así:

$$k_{actpass} = 2 \frac{1 \pm [1 - \cos^2 \varphi_{int} (1 + \tan^2 \varphi_{bed})]^{1/2}}{\cos^2 \varphi_{int}} - 1$$

En donde φ_{bed} es el ángulo de fricción basal y φ_{int} es el ángulo de fricción interna. Dicha expresión solo es válida cuando $\varphi_{bed} < \varphi_{int}$. El signo $\pm$ es positivo cuando el flujo es localmente convergente y es negativo cuando es localmente divergente. Caso contrario, si $\varphi_{bed} \geq \varphi_{int}$, $k_{actpass}$ está dado por:

$$k_{actpass} = \frac{1 + \sin^2 \varphi_{int}}{1 - \sin^2 \varphi_{int}}$$

Adicionalmente T_x está definida por:

$$T_x = -\rho h \left(g \cos \alpha + \frac{u^2}{r} \right) \tan \varphi_{bed} \frac{u}{\| \mathbf{u} \|}$$

donde r es el radio de curvatura del terreno (Savage & Hutter, 1991).

VolcFlow permite simular una variedad de productos volcánicos, para lo cual se debe variar las características reológicas de cada producto.

Resumiendo, los cálculos utilizados por el algoritmo de VolcFlow, el primer paso se inicia con la estimación de las velocidades en los bordes de cada celda en función de la fuente; posteriormente se calcula el flujo de masa y el momento. El segundo paso viene dado por la estimación de la advección y el cálculo del nuevo espesor y velocidades medias al centro de cada celda. Finalmente, en el tercer paso las velocidades en los bordes modificadas por la advección, son calculadas (Figura 23) (Kelfoun et al., 2017).

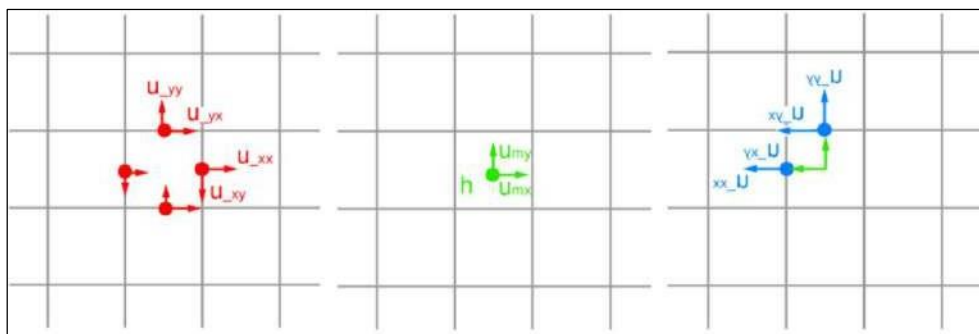


Figura 23.- Cálculos resumidos realizados por el algoritmo de VolcFlow.

El software VolcFlow permite simular flujos de baja densidad lo que representa una ventaja en el momento de determinar los espesores reales de los depósitos sobre otros programas de simulación que únicamente, modelan el comportamiento de los flujos densos.

7.2.- Volúmenes de lahares

Para la simulación de lahares se ha tomado los volúmenes de lahares descritos por Thouret et al. (2022) que para nuestro caso corresponderían a tres escenarios de peligro de acuerdo al volumen del lahar:

Volumen 1: 150 000 m³. En este escenario se considera la generación de lahares con volúmenes de 150 000 m³ que discurren por las quebradas que drenan del volcán Misti en caso de lluvias excepcionales que ocurren entre los meses de diciembre a marzo.

Volumen 2: 350 000 m³. Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 350 000 m³ que discurren en periodos de lluvias intensas (diciembre-marzo), por las diversas quebradas del flanco sur, sureste, oeste y noroeste el flanco sur del Misti, como Peral, El Pato, San Lázaro, Huarangueros y Huarangal-Los Incas.

En caso ocurra una erupción del volcán Misti con un VEI 2 (Índice de Explosividad Volcánica) de pequeña magnitud como lo ocurrido entre los años 1440 - 1470 CE (Chávez, 1992), el Misti emitiría ceniza la cual con las lluvias se podrían generar lahares con volúmenes de 350 000 m³. Este tipo de erupciones generan pequeñas a moderadas volúmenes de tefras (<1 km³). El volumen total de la erupción que ocurrió entre los años 1440 - 1470 fue estimado en aproximadamente 6×10^6 m³, por lo cual a dicha erupción se le asigna un Índice de Explosividad Volcánica 2 (Thouret et al., 2001). En la ciudad de Arequipa este depósito posee entre 2 y 4 cm de espesor. En el volcán Misti, las erupciones vulcanianas con IEV 1-2 ocurren cada 500 a 1500 años en promedio. Este escenario de generación de lahares es más probable de ocurrir en una eventual reactivación volcánica.

Volumen 3: 500 000 m³. Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 500 000 m³ que podrían discurrir por las quebradas que drenan por el flanco sur, sureste, oeste y noroeste del volcán Misti hasta distancias de mayores de 20 km desde el cráter del volcán. Históricamente, los volúmenes máximos de lahares registrados están en el orden de 350 000 m³ para periodos entre 300 a 1000 años, asociados a veces a erupciones explosivas moderadas (IEV 1-2).

Las erupciones plinianas son las más violentas, debido a que el magma emitido posee alto contenido de gases. Durante estas erupciones se generan voluminosas caídas de pómez y ceniza, así como flujos piroclásticos. Las columnas eruptivas pueden alcanzar alturas mayores a los 30 km. Estas erupciones pueden generar caídas de tefras (ceniza, pómez o escoria) de varios centímetros de espesor a más de 20 km del cráter, así como flujos piroclásticos que pueden alcanzar fácilmente más de 10 km de distancia.

La erupción pliniana de VEI 5 de hace 2050 años A.P. del Misti generó un depósito de lahar que tiene más de 10 cm en el cercado de Arequipa. El volumen del depósito de caída de pómez emitido durante la erupción de hace 2 050 años fue de 1.4 km^3 , y estimó que la columna eruptiva tuvo 29 km de altura. Esta erupción también generó flujos piroclásticos visibles hasta 13 km de distancia del cráter, canalizados en las quebradas ubicadas al pie del flanco sur y suroeste del Misti (Cobeñas et al., 2012), donde poseen entre 4 y 6 m de espesor. Su tasa de recurrencia de dicha erupción fue estimada entre 2000 y 4000 años en base al conjunto de datos cronoestratigráficos (Thouret et al., 2001; Sandri et al., 2014). Desde luego en caso de ocurrencia de erupciones plinianas los volúmenes de lahares generados serán mayores respecto a erupciones de poco IEV, es decir erupciones vulcanianas.

Durante las erupciones subplinianas también pueden generarse lahares, especialmente si los flujos y oleadas piroclásticas se emplazan sobre coberturas de nieve u ocurren fuertes precipitaciones. Los lahares generados en este contexto serían relativamente voluminosos de más de $500\,000 \text{ m}^3$ que descenderían por las quebradas que atraviesan la ciudad de Arequipa. La probabilidad de ocurrencia es baja, la cual puede estar ligada a una eventual erupción del Misti o lluvias muy extremas.

Además, también con base estudios realizados en las quebradas que descienden del volcán Misti y en otros volcanes se ha tomado los siguientes parámetros para la simulación numérica:

- Angulo de fricción interna: 20° .
- Angulo de fricción basal: 10° .
- Densidad del flujo: 1600 kg/m^3 .
- Viscosidad: 0.1 Pa.s .
- Tiempo de ocurrido el evento: 7200 o 14400 segundos.

Se ha utilizado un DEM de 10 m de resolución debido a la gran carga computacional que requiere el procesamiento.

En el modelamiento se consideró las nacientes de las quebradas ubicadas al pie de los flancos suroeste y sur del Misti.

8.0.- ESCENARIO DE PELIGROS POR DESCENSO DE LAHARES

El mapa de escenarios de peligros por descenso de lahares se realizó en base al modelamiento numérico efectuado con ayuda del código VolcFlow y en base a datos de campo. En el modelamiento numérico se utilizaron tres volúmenes de lahar de 150000, 350000 y 500000 m³, descritos anteriormente, que corresponden a tres tipos de peligros: alto, moderado y bajo, respectivamente. Se ubicó el inicio de la simulación en la parte final de la microcuenca que se forma en las laderas del volcán Misti donde se podrían formar lahares secundarios por precipitaciones pluviales intensas o extraordinarias. El objetivo de este mapa es mostrar las zonas que podrían verse afectadas por el descenso y desborde de lahares en las quebradas San Lázaro, Huarangal-Los Incas, Venezuela, Pastores y El Pato.

El mapa muestra tres zonas de peligro en las quebradas Huarangal, San Lázaro, Venezuela, Pastores y El Pato (Figura 28), donde se han identificado diversas urbanizaciones y asentamientos humanos que podría ser potencialmente afectados. A continuación, se detallan las zonas a ser afectadas en dichas quebradas:

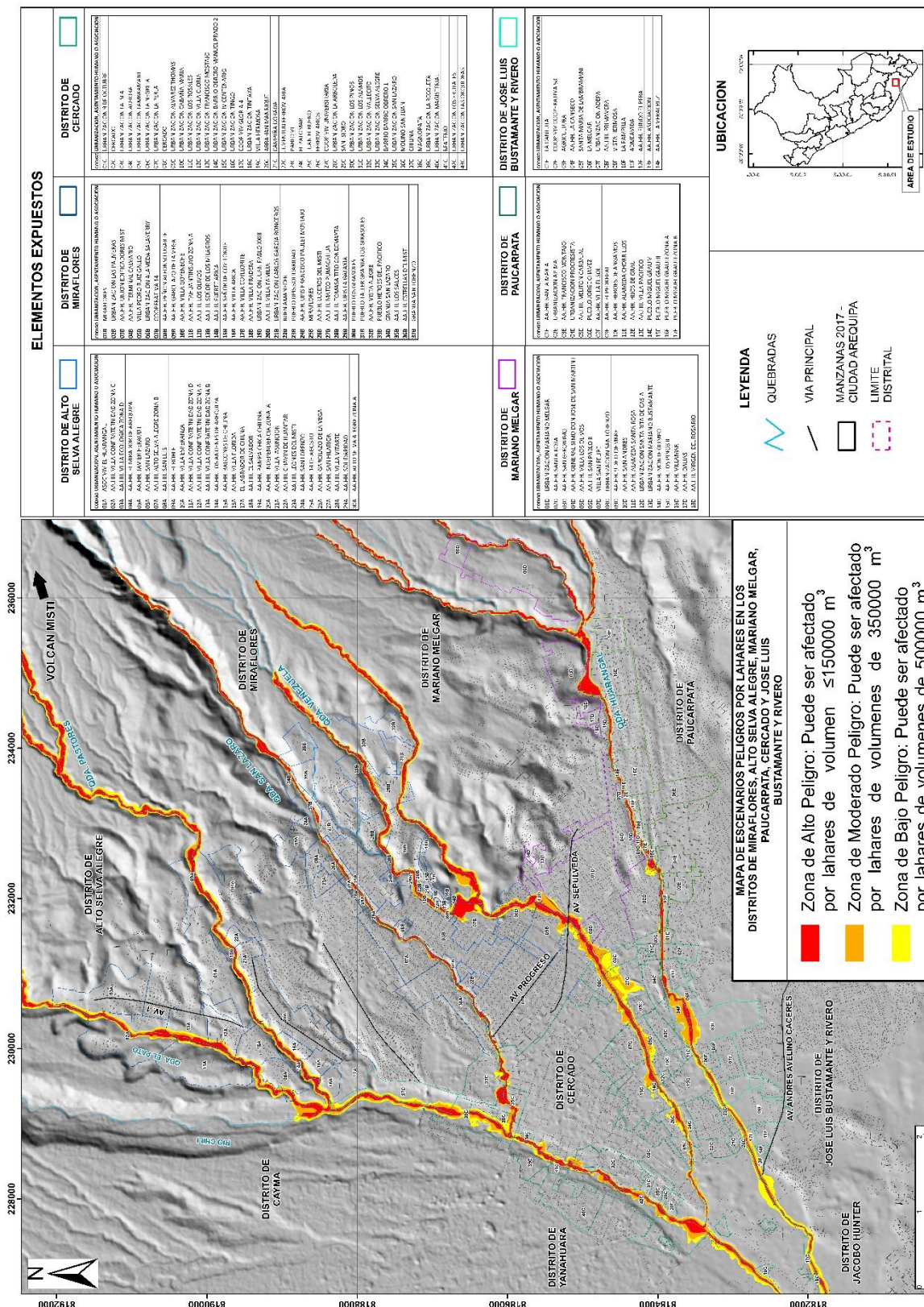


Figura 28.- Mapa preliminar de escenarios de peligros por descenso de lahares en las quebradas San Lázaro, Venezuela, Huarangal-Los Incas, El Pato y Pastores.

9.0.- ZONAS DE PELIGRO IDENTIFICADAS POR QUEBRADAS

9.1.- Quebrada San Lázaro

A lo largo de la quebrada San Lázaro se han identificado tres zonas de peligro: zona de alto peligro (rojo), zona de moderado peligro (naranja), y zona de bajo peligro (amarillo).

La zona roja considerada como de alto peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por lahares de 150 000 m³. En dicha quebrada se verían afectados las urbanizaciones y asentamientos humanos descritos en la tabla 9.

Tabla 9.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de alto peligro, en las riberas de la quebrada San Lázaro, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de alto peligro por lahares
Alto Selva Alegre	• A.H. San Luis • A.H. Garcilazo de Vega • A.H. San Hilarión • A.H. Villa Vitarte • A.H. 14 de agosto • A.H. Solidaridad • A.H. Selva Alegre B • A.H. Selva Alegre A • Urb. Selva Alegre
Miraflores	• Granja San Lázaro • Granja San Lorenzo • Upis Solidaridad • A.H. Unión Edificadores Misti • A.H. Alonso Ugarte • A.H. Terminal • Calvario • Miraflores
Arequipa	• Urb. San Lázaro • Molino San Juan • Magnopata • La Recoleta • Beaterio. • Urb. Magisterial • Urb. Los Frutales, Arequipa

La zona naranja considerada como de moderado peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por el descenso de lahares de 350 000 m³ de volumen. En dicha zona podrían ser afectados los asentamientos humanos y urbanizaciones descritos en la tabla 10.

Tabla 10.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de moderado peligro, en las riberas de la quebrada San Lázaro, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de moderado peligro por lahares
Alto Selva Alegre	• A.H. San Luis • A.H. Garcilazo de Vega • A.H. San Hilarión • A.H. Villa Vitarte • A.H. 14 de agosto • A.H. Solidaridad • A.H. Selva Alegre B • A.H. Selva Alegre A • Urb. Selva Alegre
Miraflores	• Granja San Lázaro • Granja San Lorenzo • Upis Solidaridad • A.H. Unión Edificadores Misti • A.H. Alonso Ugarte • A.H. Terminal • Calvario • Miraflores
Arequipa	• Urb. San Lázaro • Molino San Juan • Magnopata • La Recoleta • Beaterio • Urb. Magisterial • Urb. Los Frutales • Arequipa • Cercado

La zona amarilla, considerada como de bajo peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por el descenso de lahares de 500 000 m³. En esta zona se verían afectados urbanizaciones y distritos descritos en la tabla 11.

Tabla 11.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de bajo peligro, en las riberas de la quebrada San Lázaro, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de bajo peligro por lahares
Alto Selva Alegre	• A.H. San Luis • A.H. Garcilazo de Vega • A.H. San Hilarión • A.H. Villa Vitarte • A.H. 14 de agosto • A.H. Solidaridad • A.H. Selva Alegre B • A.H. Selva Alegre A • Urb. Selva Alegre
Miraflores	• Granja San Lázaro • Granja San Lorenzo • Upis Solidaridad • A.H. Unión Edificadores Misti • A.H. Alonso Ugarte • A.H. Terminal • Calvario • Miraflores
Arequipa	• Urb. San Lázaro • Molino San Juan • Magnopata • La Recoleta • Beaterio • Urb. Magisterial • Urb. Los Frutales • Arequipa • Cercado

9.2.- Quebrada Huarangal – Los Incas

A lo largo de dicha quebrada se identifican tres zonas de peligro: zona de alto peligro (rojo), zona de moderado peligro (naranja), y zona de bajo peligro (amarillo).

La zona roja considerada como de alto peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por el descenso de lahares de 150 000 m³. En dicha quebrada San Lázaro se verían afectados asentamientos humanos y urbanizaciones descritos en la tabla 12.

Tabla 12.- Asentamientos ubicados en zonas de alto peligro, en las riberas de la quebrada Huarangal - Los Incas, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de alto peligro por lahares
Paucarpata	• Pueblo Miguel Grau III • Pueblo Miguel Grau II Zona B • A.H. Villa Pacifico • A.H. Alameda Chorrillos • A.H. Hijos de Grau • A.H. Héroes de Angamos • A.H. El Pedregal • A.H. Villa el Sol • A.H. Melitón Carbajal • A.H. Francisco Montajo • A.H. Santa María
Mariano Melgar	• A.H. Los Olivos • A.H. San Gerónimo • A.H. Los Pinos II • A.H. Alto San Martín • Generalísimo Don José de San Martín I • Villa San Felipe • A.H. Alameda Santa Rosa • A.H. Santa Rosa • Urb. La Isla
José Luis Bustamante y Rivero	• Cooperativa 58 • La Cantuta • AA HH. La Canseco
Arequipa	• Urb. Aurora.

La zona naranja considerada como de moderado peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por lahares de 350 000 m³. En esta zona se verían afectados los siguientes asentamientos humanos y urbanizaciones descritos en la tabla 13.

Tabla 13.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de moderado peligro, en las riberas de la quebrada Huarangal- Los Incas, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de moderado peligro por lahares
Paucarpata	• Pueblo Miguel Grau III • Pueblo Miguel Grau II Zona B • A.H. Villa Pacifico • A.H. Alameda Chorrillos • A.H. Hijos de Grau • A.H. Héroes de Angamos • A.H. El Pedregal • A.H. Villa el Sol • A.H. Melitón Carbajal • A.H. Francisco Montajo • A.H. Santa María

Mariano Melgar	• A.H. Los Olivos • A.H. San Gerónimo • A.H. Los Pinos II • A.H. Alto San Martín • Generalísimo Don José de San Martín I • Villa San Felipe • A.H. Alameda Santa Rosa • A.H. Santa Rosa • Urb. La Isla
José Bustamante y Rivero	• Cooperativa 58 • La Cantuta • AA.HH. La Canseco • Agricultura
Arequipa	• Urb. Aurora • Urb. Francisco Mostajo • Juan Pablo IV • Urb. Los Vilcos • Urb. Los Angeles • Ferroviarios • Juan El Bueno • Juventud Ferroviaria

La zona amarilla considerada como de bajo peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por el descenso de lahares de 500 000 m³. En esta zona se verían afectados los asentamientos humanos y urbanizaciones descritos en la tabla 14.

Tabla 14.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de bajo peligro, en las riberas de la quebrada Huarangal - Los Incas, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de bajo peligro por lahares
Paucarpata	• Pueblo Miguel Grau III • Pueblo Miguel Grau II Zona B • A.H. Villa Pacifico • A.H. Alameda Chorrillos • A.H. Hijos de Grau • A.H. Héroes de Angamos • A.H. El Pedregal • A.H. Villa el Sol • A.H. Melitón Carbajal • A.H. Francisco Montajo • A.H. Santa María
Mariano Melgar	• A.H. Los Olivos • A.H. San Gerónimo • A.H. Los Pinos II • A.H. Alto San Martín • Generalísimo Don José de San Martín I • Villa San Felipe

	• A.H. Alameda Santa Rosa • A.H. Santa Rosa • Urb. La Isla
José Luis Bustamante y Rivero	• Cooperativa 58 • La Cantuta • A.H. La Canseco • Agricultura
Arequipa	• Urb. Aurora • Urb. Francisco Mostajo • Juan Pablo IV • Urb. Los Vilcos • Urb. Los Angeles • Ferroviarios. • Juan El Bueno. • Juventud Ferroviaria

9.3.- Quebrada Venezuela

A lo largo de dicha quebrada se identifican tres zonas de peligro: zona de alto peligro (rojo), zona de moderado peligro (naranja), zona de bajo peligro (amarillo).

La zona roja considerada de alto peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por el descenso de lahares de 150000 m³. En la quebrada Venezuela se verían afectados urbanizaciones y asentamientos humanos descritos en la tabla 15.

Tabla 15.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de alto peligro, en las riberas de la quebrada Venezuela, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de alto peligro por lahares
Miraflores	• A.H. Villa Goyeneche • A.H. Garcilazo de la Vega • Alameda Salaverry • Villa Pedro Ruiz Gallo • Miraflores • Asociación Villa Pradera • Urb. Juan Pablo XXIII
Mariano Melgar	• Urb. Mariano Melgar I.

La zona naranja considerada como de moderado peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por el descenso de lahares de 350 000 m³.

En la quebrada Venezuela se verían afectados urbanizaciones y asentamientos humanos descritos en la tabla 16.

Tabla 16.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de moderado peligro, en las riberas de la quebrada Venezuela, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de moderado peligro por lahares
Miraflores	• A.H. Villa Goyeneche • A.H. Garcilazo de la Vega • Alameda Salaverry • Villa Pedro Ruiz Gallo • Miraflores • Asociación Villa Pradera • Urb. Juan Pablo XXIII
Mariano Melgar	• Urb. Mariano Melgar I • Urb. Santa Rita de Casia • Urb. San lorenzo
Arequipa	• Sector de Cercado • Urb. La Perla • Urb. Cabaña María

La zona amarilla considerada como zona de bajo peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por el descenso de lahares de 500 000 m³. En la quebrada Venezuela se verían afectados las urbanizaciones y asentamientos humanos descritos en la tabla 17.

Tabla 17.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de bajo peligro, en las riberas de la quebrada Venezuela, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de moderado peligro por lahares
Miraflores	• A.H. Villa Goyeneche • A.H. Garcilazo de la Vega • Alameda Salaverry • Villa Pedro Ruiz Gallo • Miraflores • Asociación Villa Pradera • Urb. Juan Pablo XXIII
Mariano Melgar	• Urb. Mariano Melgar I • Urb. Santa Rita de Casia • Urb. San lorenzo
Arequipa	• Sector de Cercado • Urb. La Perla • Urb. Cabaña María • Urb. IV Centenario • Francisco Mostajo • El Palomar • Barrio Obrero Manuel Prado 2

9.4.- Quebrada El Pato

A lo largo de dicha quebrada El Pato se identifican tres zonas de peligro: zona de alto peligro (rojo), zona de moderado peligro (naranja), y zona de bajo peligro (amarillo).

La zona roja, considerada como de alto peligro, corresponde a la zona que podría ser afectada por el descenso de lahares de 150 000 m³. En la quebrada El Pato se verían afectados asentamientos humanos y urbanizaciones descritos en la tabla 18.

Tabla 18.- Asentamientos ubicados en zonas de alto peligro, en las riberas de la quebrada El Pato, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de moderado peligro por lahares
Alto Selva Alegre	• Villa Confraternidad Zona A y B
Arequipa	• Sector de Chilina

La zona naranja considerada como de moderado peligro, puede ser afectada por el descenso de lahares de 350 000 m³ de volumen. En la quebrada El Pato se verían afectados asentamientos humanos y urbanizaciones descritos en la tabla 19.

Tabla 19.- Asentamientos ubicados en zonas de moderado peligro, en las riberas de la quebrada El Pato, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de moderado peligro por lahares
Alto Selva Alegre	• Villa Confraternidad Zona A y B
Arequipa	• Sector de Chilina
	• Sector de Magnopata

La zona amarilla considerada como de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de 500000 m³ de volumen. En la quebrada El Pato se verían afectados asentamientos humanos y urbanizaciones descritas en la tabla 20.

Tabla 20.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de bajo peligro, en las riberas de la quebrada El Pato, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de moderado peligro por lahares
Alto Selva Alegre	• Villa Confraternidad Zona A y B
Arequipa	• Sector de Chilina • Sector de Magnopata • La Recoleta • Sector de Beaterio • Urb. Magisterial

9.5.- Quebrada Pastores

A lo largo de dicha quebrada se identifican tres zonas de peligro: zona de alto peligro (en color rojo), zona de moderado peligro (en color naranja) y zona de bajo peligro (en color amarillo).

La zona roja considerada de alto peligro, puede ser afectada por lahares de 150 000 m³ de volumen. En la quebrada Pastores se verían afectados asentamientos humanos y urbanizaciones descritos en la tabla 21.

Tabla 21.- Asentamientos ubicados en zonas de alto peligro, en las riberas de la quebrada Pastores, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de moderado peligro por lahares
Alto Selva Alegre	• Zona agrícola de A.H. El Salvador

La zona naranja considerada como de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 350 000 m³ de volumen. En la quebrada Pastores, se verían afectados los asentamientos humanos y urbanizaciones descritos en la tabla 22.

Tabla 22.- Urbanizaciones y asentamientos humanos ubicados en zonas de moderado peligro, en las riberas de la quebrada Pastores, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Urbanizaciones, asentamientos humanos y sectores en zona de moderado peligro por lahares
Alto Selva Alegre	• Zona agrícola de A.H. El Salvador
Arequipa	• Sector de Chilina • Sector de Magnopata

La zona amarilla, considerada de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de 500 000 m³ de volumen. En la quebrada Pastores se verían afectados asentamientos humanos y urbanizaciones descritos en la tabla 23.

Tabla 23.- Asentamientos ubicados en zonas de moderado peligro, en las riberas de la quebrada Pastores, que pueden ser afectados por el descenso de lahares.

Distrito	Sectores afectados
Alto Selva Alegre	• Zona agrícola de A.H. El Salvador
Arequipa	• Sector de Chilina • Sector de Magnopata • La Recoleta • Sector de Beaterio • Urb. Magisterial

CONCLUSIONES

- El estudio estratigráfico realizado muestra que en las quebradas San Lázaro, Huarangal - Los Incas, Venezuela, Pastores y El Pato, que se prolongan del volcán Misti y atraviesan la ciudad de Arequipa, existen más de 58 depósitos de lahares emplazados los últimos siglos y en épocas anteriores. En las quebradas Huarangal-Los Incas y San Lázaro se distingue un depósito de lahar de la erupción explosiva (tipo pliniana) del Misti que ocurrió hace 2050 años A.P., que corresponde a un depósito guía de la estratigrafía de los lahares estudiados.
- En la quebrada Huarangal-Los Incas, se identificaron 24 depósitos de lahares, con espesores de 0.10 a 1.20 m. Los tres últimos contienen gran cantidad de materiales antrópico: bolsas, ladrillos, vidrios, etc. Mientras que en la quebrada Venezuela se han identificado 14 secuencia de lahares recientes, con espesores de 0.22 a 1.20 m. En la quebrada San Lázaro se ha identificado 20 secuencias de lahares, con espesores de 0.10 a 0.7 m. Al menos dos depósitos de lahares recientes presentan pómez de la erupción de hace 2050 años A.P. del Misti, y materiales de escombros.
- Todos los depósitos encontrados y descritos de las quebradas San Lázaro, Huarangal - Los Incas y Venezuela fueron emplazados los últimos 2050 años A.P. Los depósitos de lahares tienen espesores centimétricos, y una concentración de limo y arena, con fragmentos líticos lávicos polimícticos, y se generaron principalmente debido a precipitaciones pluviales intensas que ocurrieron en periodos de lluvia (diciembre-marzo), pues acarrearón parte del material volcánico disponible en los lechos de las quebradas, así como material antrópico arrojado por los pobladores.

- En muchos sectores, a lo largo de las riberas de las quebradas Huarangal-Los Incas, Venezuela, San Lázaro, Pastores y El Pato (distritos de Alto Selva Alegre, Paucarpata, Miraflores y Mariano Melgar, José L. Bustamante y Rivero), en los últimos 60 años se han asentado viviendas acortando el ancho natural del cauce de las quebradas, desde los ~50 m a 5 m. Las viviendas más vulnerables están ubicadas en áreas aledañas (50–100 m de distancia) de los cauces de las quebradas y en las llanuras de inundación.
- Se han realizado simulaciones de lahares en las quebradas San Lázaro, Huarangal-Los Incas, Venezuela, Pastores y El Pato usando el código VolcFlow, considerando tres volúmenes de lahar: 150 000, 350 000 y 500 000 m³, para tres escenarios de peligro: alto, moderado y bajo, respectivamente. Esto permitió obtener un mapa de escenarios peligros por descenso de lahares que muestra áreas que podrían ser afectadas en caso descieran lahares en periodos de lluvia o una erupción volcánica del Misti.
- El modelamiento muestra peligros de inundación en todos los cauces modelados, particularmente en los puentes y alcantarillas en aguas abajo de las torrenteras. Cuando el canal es muy estrecho, como en áreas con canales reforzados con concreto, se produce incluso inundaciones en las calles y urbanizaciones o asentamientos humanos.
- Los resultados de evaluación de peligro muestran que en caso descieran lahares por la quebrada Huarangal, pueden ser afectados: 11 A.H. (asentamiento humano) en el distrito de Paucarpata, 9 A.H. en Mariano Melgar, y 3 en J.L.B. y Rivero, 1 en Cercado de Arequipa. En caso descieran lahares por la quebrada San Lázaro, pueden ser afectados: 09 A.H. en el distrito de Alto Selva Alegre, 9 A.H. en Miraflores, y 7 en Cercado de Arequipa. En caso descieran lahares

por la quebrada Venezuela, pueden ser afectados: 09 A.H. en el distrito de Alto Selva Alegre, 9 A.H. en Miraflores, y 7 en Cercado de Arequipa.

- Nuestros estudios muestran que las lluvias torrenciales que ocurren en la ciudad de Arequipa pueden ocasionar serios daños que a veces se podrían tornar en desastres. Queda demostrado que en Arequipa, el problema fundamental no es la ocurrencia de los fenómenos naturales climatológicos, sino la alta vulnerabilidad y exposición de la población ubicada en los lugares inadecuados.
- La quebrada Huarangal-Los Incas, San Lázaro, Venezuela y demás quebradas de la ciudad, presentan secciones que no soportarían grandes avenidas de agua en caso de tormentas más prolongadas a las presentadas en los últimos 25 años. Así mismo, la presencia de los puentes, las pocas obras de defensa ribereñas existentes, y la falta de mantenimiento o limpieza del cauce natural de las torrenteras, aumentan la vulnerabilidad y exposición de la población, sus bienes y actividades económicas.

RECOMENDACIONES

- Para evitar desbordes e inundaciones se recomienda construir gaviones flexibles y muros de contención en determinadas riberas del curso superior de las quebradas San Lázaro, Venezuela, Huarangal-Los Incas y El Pato.
- Realizar el mantenimiento y construcción de sistemas de drenaje pluvial y alcantarillado de las calles de los distritos de Alto Selva Alegre, Mariano Melgar, Paucarpata, Miraflores José L. Bustamante y Rivero, para evitar futuros peligros por ocurrencia de lahares.
- Tomar en cuenta las normas y ordenanzas municipales y provinciales elaboradas hasta la fecha, para disminuir el crecimiento no planificado hacia los lechos de las quebradas y/o torrenteras que se prolongan el volcán Misti.
- Realizar periódicamente la limpieza de los cursos naturales de las quebradas, sobre todo después del periodo de lluvias.
- Prohibir botar basura o desmonte en los lechos de las quebradas que se prolongan del volcán Misti (El Pato, Pastores, Venezuela, San Lázaro, Huarangal-Los Incas) que constituyen material disponible para ser arrastrado por los flujos ocurridos en periodos de lluvia.
- La construcción de puentes, alcantarillas, tuberías de agua y desagüe, e infraestructura hidráulica (canales y acueductos) que cruzan las quebradas, deben ser realizados teniendo en cuenta diseños que contemplen los caudales máximos de las quebradas.

- Con relación a las microcuencas de las quebradas, se evidencia la necesidad de adoptar medidas de forestación y plantación de especies vegetales adecuadas que generen una significativa disminución de la escorrentía superficial y la erosión del suelo, pudiéndose recomendar las plantaciones de tunales, cuyo aparato radicular con estructura de malla retiene eficazmente el agua y el suelo superficial.

BIBLIOGRAFÍA

- Blong, R.J. (1984). *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*: Sydney, Australia, Academic Press Australia, 424 p.
- Borga, M., Gaume, E., Creutin, J.D., Marchi, L. (2008). Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes. *Hydrol. Process.* 22 (18), 3883–3885
- Cacya, L., Meza, P., Carlotto, V., Mamani, L. (2013). Aluvión del 8 de febrero del 2013 en la ciudad de Arequipa. Resumen extendido Foro Internacional de Riesgos Geológicos. INGEMMET. Pp. 195-200.
- Charbonnier, S.J., Thouret, J.C., Gueugneau, Constantinescu, R. (2020). New insights into the 2070 cal yrBP pyroclastic currents at El Misti volcano (Peru) from field investigations, satellite imagery and probabilistic modeling. doi: 10.3389/feart.2020.557788.
- Chávez, J. (1992). *La erupción del volcán Misti. Pasado, presente, futuro*. Arequipa: Imp. Zenit, 158 p
- Cobeñas, G., Thouret, J.-C., Bonadona, C., Boivin, P. (2012). The c.2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: Eruption dynamics and hazard implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241-242, 105-120.
- Córdoba, G., Sheridan, M., Pitman, B. (2010). A Two-Phase, Depth-Averaged Model for Geophysical Mass Flows in the TITAN Code Framework, CMG-IUGG, Pissa, Italy, 6376
- Costa, A., Macedonio, G. (2005). Numerical simulation of lava flows based on depth averaged equations, *Geophysical Research Letters*, 32, L05304.
- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, M.F., Labazuy, P., Stinton, A., et al. (2005). Assessment of volcanic hazard of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphology N.F., supplement*, 140: 209-231.
- Cruz R. (2021). *Gestión de riesgo por inundación en asentamientos populares, Distrito Mariano Melgar, Arequipa*. Tesis de maestría en planeamiento y gestión urbano ambiental, Universidad Nacional de San Agustín, 231 p.
- Ettinger S., Mounaud L., Magill C., Yao-Lafourcade A-F, Thouret J.-C., Manville V., Negulescu C., Zuccaro G., De Gregorio D., Nardone S., Uchuchoque J.A.L., Arguedas A., Macedo L., Llerena N.M. (2015). Boulding vulnerability to hydro-geomorphic hazard: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology* V. 541, p. 563-581.
- Fuse, J., Benites, A. (2003). *Inundaciones en la localidad de Arequipa ocasionadas por el ingreso de las torrenteras*. Universidad Nacional San Agustín (UNSA). Reporte de investigación interna (no publicado), Arequipa, 51.

- Futuri O., Medina, J. (2018). Evaluación y análisis de la vulnerabilidad y peligros físicos de la torrentera de Miraflores en su paso por la Av. Venezuela. Universidad Nacional de San Agustín. Tesis Ing. Civil. 268 p.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovicová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *J. Hydrol.* 367 (1–2), 70–78.
- Guo, Z. (1995). Velocity-depth coupling in shallow-water flows, *J. Hydraul. Eng.*, 121, 717–724, 6377
- Gutiérrez, R. (1992). Evolución Histórica Urbana de Arequipa 1540-1990. Primera ed. Lima: Epígrafe Editores
- Harpel, C.J.; 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. Boulder, CO: Geological Society of America, 72 p. Special Paper, 484.
- Harpel, Ch., Cuno, J., Takach, M., Rivera, M., Aguilar, R. Tepley III, Frank J. (2023). The late Pleistocene Sacarosa tephra-fall deposit, Misti Volcano, Arequipa, Peru: its magma, eruption, and implications for past and future activity. *Bulletin of Volcanology*; 85:46
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) - Censos Nacionales 2018: XII de Población, VII de Vivienda y III de comunidades indígenas.
- Iverson, R. M., Denlinger, R. P. (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 10 January, 106(B1), 537-552.
- Kelfoun, K., Druitt, T.H. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile, *J. Geophys. Res.*, 112, B12202.
- Kelfoun, K. (2017). A two-layer depth-averaged model for both the dilute and the concentrated parts of pyroclastic currents. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 1–19.
- Kelfoun, K. (2011). Suitability of simple rheological laws for the numerical simulation of dense pyroclastic flows and long-runout volcanic avalanches. *J. Geophys. Res.* 116, B08209.
- Legros, F. (2001). Tephra stratigraphy of Misti volcano, Peru. *Journal of South American Earth Science*, 14(1): 15-29.
- Legros, F., (2002). The mobility of long-runout landslides: *Engineering Geology*, 63(3–4), 301–331.

- INDECI (2019). Compendio Estadístico de Emergencias para el periodo 1995-2019. Lima: Instituto Nacional de Defensa Civil.
- Iverson, R. (1997). The physics of debris flows, *Rev. Geophys.*, 35, 2454–296, 1997. 6376, 6377, 6384.
- Iverson, R., Denlinger, R. (2001). Flow of variably fluidized granular material across threedimensional terrain 1: Coulomb mixture theory, *J. Geophys. Res.*, 6, 537–552, 2001. 6377
- National Research Council (1991). The eruption of Nevado Del Ruiz Volcano Colombia, South America, November 13, 1985: Washington, D.C., U.S.A., The National Academies Press, 128 p.
- National Research Council (1994). Mount Rainier: Active Cascade Volcano: Washington, D.C., USA, The National Academies Press, 128 p.
- Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J.-C., Macedo, L. (2016). *Geología y evaluación de peligros volcánicos del volcán Misti*, INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 60, 170 p.
- Martelli, K. M. (2011). The Physical Vulnerability of Urban Areas Facing the Threat of Inundation from Lahars and Floods: Application to the City of Arequipa, Peru. (Unpublished) PhD Thesis. Clermont-Ferrand: Laboratoire Magmas et Volcans, Université Blaise Pascal, 345.
- Mothes, P. A., Vallance, J. W. (2015). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador: Highlights from Stratigraphy and Observational Records and Related Downstream Hazards. En *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (págs. 141-168 p.). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00006-X>
- 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 Geothermal Research* 154, 251–275.
- Procter, J.N., Cronin, S.J., Fuller, I.C., Sheridan, M., Neall, V.E., Keys, H. (2010). Lahar hazard assessment using Titan2D for an alluvial fan with rapidly changing geomorphology: Whangaehu River, Mt. Ruapehu: *Geomorphology*, 116(1–2), 162–174.
- Ruprecht, P., Worner, G., (2007). Variable regimes in magma systems documented in plagioclase zoning patterns: El Misti strato-volcano and Andahua monogenetic cones. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 165, 142–162.
- Sandri, L., Thouret, J.-C., Constantinescu, R., Biass, S., and Tonini, R. (2014). Longterm multi-hazard assessment for El Misti volcano (Peru). *Bull. Volcanol.* 76, 771. doi:10.1007/s00445-013-0771-9

- Savage, S., Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline, *J. Fluid Mech.*, 199, 177–215. 6377
- Seltzer, G.O. (1990). Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes. *Quaternary Science Reviews* 9(2-3): 137-152.
- Sheridan, M.F. (1979). Emplacement of pyroclastic flows: A review, in Chapin, C.E., Elston, W.E. (eds.), *Ash-Flow Tuffs: U.S.A.*, Geological Society of America, 180, 125–136.
- Siebert, L., Simkim, T., Kimberley, P. (2010). *Volcanoes of the World*. 3. ed. Washington, D.C.: Smithsonian Institution, Berkeley, CA: University of California Press, 551 p.
- Suni, J. (1999). Estudio geológico y vulcanológico del volcán Misti y sus alrededores. Tesis Ingeniero geologo, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa – Perú, 179 pp.
- Thouret, J.C.; Finizola, A.; Fornari, M.; Legeley-Padovani, A.; Suni, J. & Freche, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610
- Thouret, J.C., Ettinger, S., Guitton, M., Santoni, O., Magill, C., Martelli, K., et al. (2014). Assessing Physical Vulnerability in Large Cities Exposed to Flash Floods and Debris Flows: the Case of Arequipa (Peru). *Nat. Hazards* 73 (3), 1771–1815. doi:10.1007/s11069-014-1172-x
- Thouret, J.C., Santoni, O., Arapa, E., Belizario, J., Guerrero, A., Rodriguez, D., et al. (2018). Methodology for Assessing Exposure, Physical Vulnerability and Risk Due to Mass Flows in the City of Arequipa, Peru, 9. Washington DC: AGU Fall meeting–14. December, Abstract ID 366543, Poster NH41D-1143. Session NH41D: The Collection of Natural Hazard, Exposure, and Vulnerability Data for Use in Risk Assessments and Other Novel Purposes.
- Thouret J.C., Antoine S., Magill C., Ollier C. (2019). Lahars and debris flows: characteristics and impacts. *Earth-Science Reviews* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.1030037>
- Thouret J.C., Arapa E., Charbonnier S., Guerrero A., Kelfoun K., Cordoba G., Rodriguez D., Santoni O. (2022). Modeling tephra fall and sediment-water flows to assess their impact on a vulnerable building stock in the City of Arequipa, Peru. *Frontiers in Earth Science* 10, 865989
- Tilling, R.I. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems: *Reviews of Geophysics*, 27(2), 237–269.
- Tilling, R.I. (1996). *Volcanoes: U.S.A.*, U.S. Geological Survey, 45p.

- Toro, EF. (2001). Shock-capturing methods for free-surface shallow flows. John Wiley & Sons, LTD
- Vallance, J. W., Iverson, R. M. (2015). Lahars and Their Deposits. Encyclopedia of volcanoes, 649-664 p.
- Vilchez, M., Sosa, N. (2021). Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa. INGEMMET, Boletín n° 85, serie C. 235 p.
- Zamácola y Jáuregui, J. (1958). Apuntes para la historia de Arequipa (1804). Arequipa: Primer festival del libro arequipeño, 98 p.

