



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



**ESCENARIOS CRÍTICOS POR DESCENSO DE LAHARES
EN EL DISTRITO DE MARIANO MELGAR
-Arequipa-**

Informe Técnico N°025-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Septiembre, 2021

Instituto Geofísico del Perú

Presidente ejecutivo: Hernando Tavera

Director científico: Edmundo Norabuena

Informe técnico

Escenarios críticos por descenso de lahares en el distrito de Mariano Melgar, Arequipa

Autores:

John Cruz Igme
Luisa Macedo Franco
Ivonne Lazarte Zerpa
Katherine Vargas Alva

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

**ESCENARIOS CRÍTICOS POR DESCENSO DE LAHARES
EN EL DISTRITO DE MARIANO MELGAR
-Arequipa-**

Lima – Perú
Agosto, 2021

RESUMEN

Se analiza la dinámica y las características de los lahares (o flujos de lodo volcánico) que pueden descender del volcán Misti en periodos de lluvia y afectar áreas que ocupa el distrito de Mariano Melgar. Se hace uso de la técnica de modelado numérico, así como una base de datos de elevación digital del terreno con 12 m de resolución e información histórica de lahares ocurridos en la ciudad de Arequipa.

Los resultados obtenidos indican que los lahares discurrirían principalmente por las quebradas Huarangueros, Huarangal, Barranco, quebrada s/n que desciende por el sector de los Olivos, La Riconada y quebrada s/n del sector de Mariano Bustamante del distrito de Mariano Melgar. Los eventos laháricos con volúmenes que sobrepasan los 1.5 Mm³ provocarían daños en la infraestructura educativa, centros de salud, viviendas, calles y avenidas del distrito de Mariano Melgar, y distritos aledaños como Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero; así como el Cercado de la ciudad de Arequipa.

En Mariano Melgar, las zonas críticas son aquellas ocupadas por las áreas urbanas de San Jerónimo, Cerrito Belén, Intersección Prolongación Lima con Rosaspata, Malecón Santa Rosa, entre otras. Esta información debe ser considerada en los planes de reducción y prevención del riesgo por el descenso de lahares provenientes del volcán Misti.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

2.- DISTRITO DE MARIANO MELGAR

2.1.- Condiciones geológicas

2.2.- Población, vivienda y actividad económica

2.3.- Condiciones hidrográficas y climáticas

3.- LOS LAHARES

3.1.- Tipos de lahares

3.1.1.- Lahares primarios

3.1.2.- Lahares secundarios

4.- DATOS Y MÉTODO DE ANÁLISIS

4.1.- Modelamiento con LaharZ

5.- ESCENARIOS POR PELIGRO DE LAHARES

6.- ÁREAS CRÍTICAS POR LAHARES

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

1.- INTRODUCCIÓN

El volcán Misti es uno de los diez volcanes activos situados en la cadena volcánica Plio-Cuaternaria del sur peruano, perteneciente a la ZVC (Zona Volcánica Central) de los Andes. Este volcán se encuentra a 17 km del centro de la ciudad de Arequipa, donde viven más de 1 millón de personas. Históricamente, el Misti presentó una última erupción explosiva de gran magnitud (Índice de Explosividad Volcánica - IEV igual a 5) hace 2000 años (Harpel et al., 2011) y otras moderadas, de tipo vulcaniana, entre los años 1440 - 1470 que diezmo a la población de Arequipa (Macedo, 1994).

En la actualidad, el volcán Misti presenta actividad fumarólica esporádica que no representa mayor peligro para la población, pero se han incrementado los estudios orientados al análisis de la vulnerabilidad de la ciudad de Arequipa ante el posible impacto de los peligros volcánicos (Harpel et al. 2011; Thouret et al. 2014; Charbonnier et al. 2020), información que ha contribuido a gestionar el riesgo volcánico.

En general, la vulnerabilidad frente al peligro volcánico del Misti en la ciudad de Arequipa se incrementa diariamente debido a que la ciudad crece en dirección del volcán, principalmente los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Paucarpata. A la fecha se observa la presencia de áreas urbanas dentro del cauce de las quebradas que descienden de dicho volcán como: San Lázaro, Pastores, Huarangal, Agua Salada y El Chilcal (Macedo, 2012).

El distrito de Mariano Melgar es uno de los 29 distritos que conforman la provincia de Arequipa, ubicado a 2.9 km del cráter del volcán Misti, por lo que se encuentra expuesto a los peligros volcánicos que sucederían en una eventual erupción del Misti. De estos peligros, los lahares que podrían discurrir por sus quebradas ocurren durante o luego de lluvias

intensas; es decir, entre los meses de diciembre a abril de cada año. Históricamente, en Arequipa los lahares (flujos de lodo volcánico) han ocasionado el desborde de torrenteras afectado calles, avenidas y viviendas, e incluso obras de infraestructura pública, como centrales hidroeléctricas y ductos de suministro de agua potable.

Finalmente, como parte del Proyecto de Investigación: “Dinámica de los productos volcánicos del Misti y análisis de la exposición y afectación en la población de la ciudad de Arequipa” realizado por el Instituto Geofísico del Perú entre los años 2020 y 2021, en este estudio se define los escenarios de Peligro Alto, Moderado y Bajo para el distrito de Mariano Melgar ante la ocurrencia de avalanchas de escombros, flujos de lava y flujos piroclásticos emitidos por el volcán Misti ante un posible escenario de erupción. La información a generarse será de utilidad para las autoridades en la toma de decisiones y la mitigación de riesgos.

2.- DISTRITO DE MARIANO MELGAR

El distrito de Mariano Melgar se encuentra ubicado en la provincia de Arequipa a 2.9 km del cráter del volcán Misti con una población de alrededor de 60000 habitantes (INEI, 2018). El distrito colinda con Miraflores, Chiguata, Paucarpata y el Cercado de Arequipa. Desde el cráter del volcán Misti, las principales quebradas que atraviesan el distrito de Mariano Melgar son Huarangueros, Huarangal y Barranco; así como otras de corta longitud como las que cruzan el sector de la Rinconada, la quebrada del sector del AA.HH. Los Olivos y la quebrada ubicada entre el límite de los distritos de Mariano Melgar y Miraflores, en la zona de Mariano Bustamante (Figura 1).

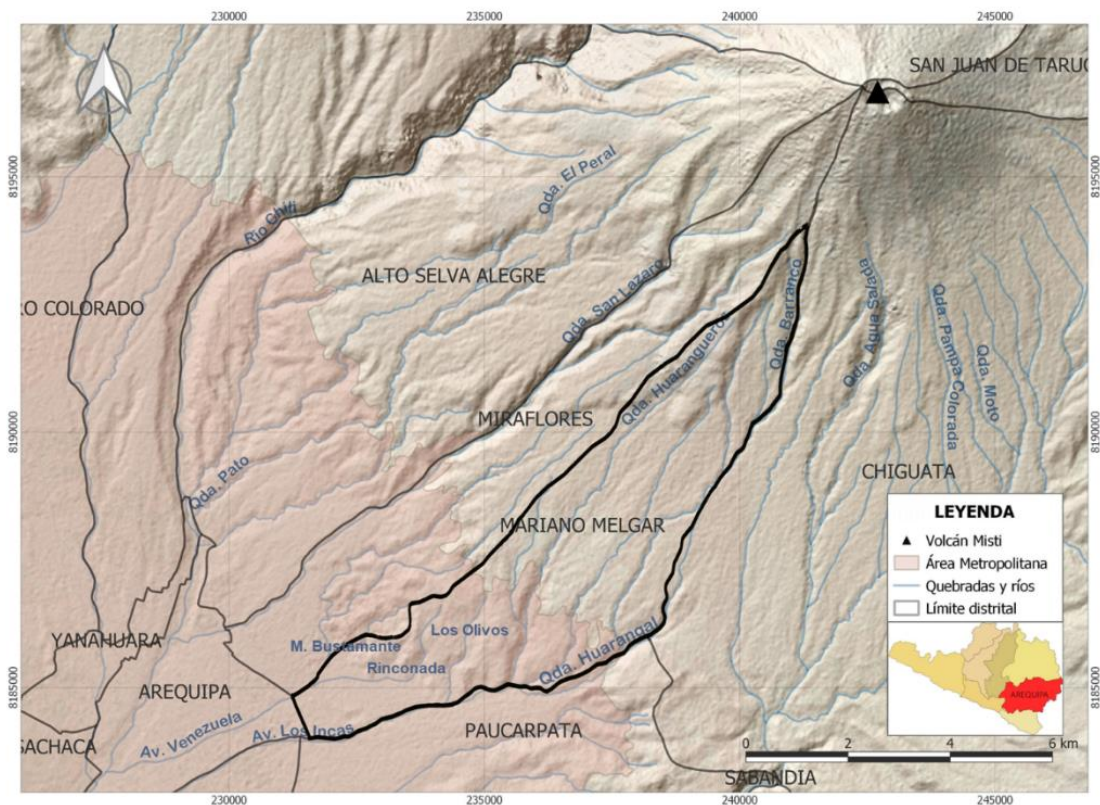


Figura 1.- Mapa de ubicación del distrito de Mariano Melgar y principales quebradas como Huarangueros, Huarangal y Barranco.

Es preciso señalar que este distrito, por su ubicación, no está libre de ser afectada por los procesos eruptivos ante una eventual erupción del Misti, así como por la generación de lahares como consecuencia del periodo estacional de lluvias.

2.1.- Condiciones geológicas

El distrito de Mariano Melgar se encuentra al pie del volcán Misti, sobre suelos compuestos por flujos de lava, intercalados con depósitos de flujos y caídas piroclásticas, y lahares (Thouret et al. 2001). Así mismo afloran depósitos de avalancha de escombros y depósitos de caídas y flujos piroclásticos de la erupción pliniana del volcán Misti de hace 2000 años (Harpel et al., 2011).

Los depósitos de lahares son observables en el fondo y los márgenes de las quebradas, estando constituidos de gravas y bloques con matrices de arena y limo poco o no consolidados de espesor variable. Asimismo, se ha logrado observar la presencia de depósitos de lahares de hasta 4 m de espesor y otros depósitos aluviales con espesores de hasta 3 m (Luna, 2019) originados por acción de corrientes temporales de aguas de lluvias (Figura 2).



Figura 2.- Depósitos pluviales. Torrentera ubicada a lado de la Asociación Flor de Oro del distrito de Mariano Melgar.

2.2.- Población, vivienda y actividad económica

El distrito de Mariano Melgar alberga alrededor de 59918 habitantes, con 20518 viviendas, de las cuales 1625 se encuentran desocupadas (INEI, 2018). De estas viviendas, el 68.2 % de viviendas están construidas a base de concreto armado, un 30.7 % a base de calamina o teja y 0.7 % de material precario (INEI 2018). Por otro lado, la actividad y fuente económica principal del distrito está enfocada en servicios: un 48 % de la población económicamente activa se dedica a este rubro; mientras que, un 18 % se dedica a la actividad comercial. También son fuentes de ingreso actividades como la agricultura, ganadería, minería, artesanía, entre otros (INEI 2016).

2.3.- Condiciones hidrográficas y climáticas

El distrito de Mariano Melgar presenta una red hidrográfica cuya naciente proviene del volcán Misti, por donde discurren las aguas producto de las precipitaciones estacionales. Sumado a esto, la ocurrencia del Fenómeno El Niño en años anteriores ha generado intensas lluvias que provocaron inundaciones, como los ocurridos en los años de 1779-1780, 1997, 1999. La intensidad de las lluvias en los años 1997, 1999 y 2001 alcanzaron los 45.3 mm, 29.97 mm y 34.1 mm (Municipalidad Distrital Mariano Melgar /Fondo Ítalo Peruano, 2006).

Por otro lado, los periodos fluviales de la zona están directamente asociados a la época húmeda, durante el cual se presentan las mayores precipitaciones en los meses de diciembre a marzo. La época seca se extiende de mayo a octubre, siendo los meses de abril y noviembre como los de transición. Asimismo, según datos de la estación de la Pampilla para el 2017 (SENAMHI 2017), en el distrito de Mariano Melgar las lluvias alcanzaron un nivel de umbral superior a los 25 mm; es decir, precipitaciones extremadamente intensas (Luna, 2019).

3.- LOS LAHARES

Los lahares (flujos de lodo) son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizados por el agua y que fluyen a velocidades de 20 a 60 km/h por valles y quebradas que drenan de los volcanes. El agua que traslada los lahares puede provenir de fuertes lluvias, fusión de hielo o nieve, ríos, o lagunas cratéricas y pueden generarse en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica (Tilling, 1989).

3.1.- Tipos de lahares

Basados en su origen o si están directa o indirectamente relacionados con una erupción volcánica, los lahares pueden ser clasificados en primarios o secundarios, siendo sus características las siguientes:

3.1.1.- Lahares primarios

Los lahares primarios son consecuencia directa de una erupción volcánica y pueden ser calientes o fríos. Los lahares calientes presentan temperaturas mayores a 60°C y durante un proceso eruptivo, materiales incandescentes emitidos por un volcán producen la rápida fusión de grandes volúmenes de hielo y nieve que yacen en la cumbre o laderas de un volcán. Estos lahares también se producen cuando los flujos piroclásticos generados durante erupciones explosivas irrumpen en el cauce de un río.

Las intensas precipitaciones acaecidas durante o inmediatamente después de una erupción volcánica remueven los productos eruptivos acumulados en los flancos del volcán, de esta manera se forman lahares que bajan por las pendientes del cono volcánico arrastrando todo a su paso.

Los lahares primarios tienden a ser muy voluminosos ($107\text{-}109\text{ m}^3$) y desarrollarse a altas velocidades ($>20\text{ m/s}$), permitiendo que ellos tengan la capacidad de fluir a grandes distancias del volcán, incluso hasta cientos de kilómetros corriente abajo.

En la ciudad de Arequipa se ha identificado la presencia de lahares primarios a lo largo de las quebradas que nacen en la parte alta de la estructura del volcán Misti, así mismo en el cauce del río Chili con la presencia de restos de cerámicos que evidencian la existencia de poblaciones indígenas antes de la llegada de los españoles y que fueron afectadas por la actividad eruptiva del Misti (Figura 3).



Figura 3.- Lahares en el río Chili correspondientes a la última erupción del volcán Misti, donde aún se observan restos cerámicos de la época (reg. fotográfico L. Macedo).

3.1.2.- Lahares secundarios

Dentro de este grupo están los lahares que se producen después del cese de una actividad eruptiva, luego de días, meses o incluso años (posteruptivos); además de aquellos que no tienen ninguna relación con una actividad volcánica, llamados no eruptivos, estos últimos generados por precipitaciones pluviales intensas, como los que ocurren en temporada de lluvias. En este escenario, los materiales piroclásticos no consolidados, depositados por erupciones previas, pueden ser fácilmente removidos por la lluvia.

En temporadas de lluvia, estos lahares pueden crecer en magnitud y repetirse en el mismo periodo o cada año, lo que hace que el nivel de riesgo de las áreas urbanas y población sea crítico (Vallance & Iverson, 2015). Debe entenderse, que 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 10^4 a 10^6 m³ y su descarga está en el orden de 10^2 a 10^3 m³/s; y generalmente alcanzan distancias menores de 10 km (Mothes y Vallance, 2015).

En el sur del Perú, lahares de este tipo ocurrieron el 8 de febrero de 2019 en el centro poblado de Mirave, región de Tacna, donde más de 570 familias se vieron afectadas, además de viviendas, obras de infraestructura y vías de acceso.

4.- DATOS Y MÉTODO DE ANÁLISIS

Para elaborar los escenarios a presentarse en el distrito de Mariano Melgar por flujo de lahares, fue necesario contar con un modelo digital de elevación que recree la topografía de la zona de estudio y un algoritmo de modelamiento numérico como el LaharZ. A continuación, se describen los datos y la metodología empleada en el presente estudio.

4.1.- Modelamiento con LaharZ

LaharZ es un programa computacional (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) que correlaciona el volumen del lahar con el área planimétrica a ser inundada; además es capaz de generar mapas de flujos de escombros y lahares. Asimismo, define las zonas de peligro por lahares en un área volcánica y define en función de la distancia y el volumen de la descarga la ubicación de las posibles zonas de inundación.

Autores como Harpel et al. (2011) y Charbonnier et al. (2020) han realizado el modelamiento numérico de lahares en Arequipa, llegando a estimar volúmenes de flujos críticos que podrían afectar sus áreas urbanas (Figura 4A). Estudios similares usando el algoritmo LaharZ, fueron realizados por Thouret et al. (2014), llegando a definir las áreas a ser potencialmente inundadas por estos tipos de flujos (Figura 4B).

El procedimiento para la elaboración de un mapa de peligros por lahares comprende, en primera instancia, elaborar o disponer de un Modelo Digital de Elevación (DEM) para la zona de estudio, en este caso, para el volcán Misti y la ciudad de Arequipa. En este estudio se consideró un DEM con una resolución de 12 m descargado de los servidores del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), ver Figura 5.

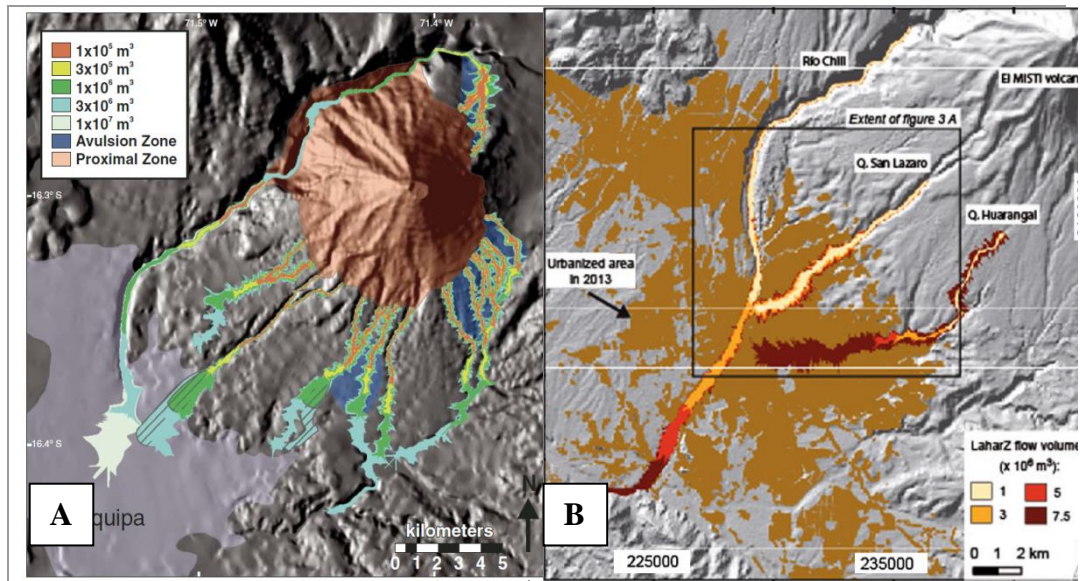


Figura 4.- (A) Mapa de escenarios de lahares de la ciudad de Arequipa (Harpel et al., 2011) y (B) mapa de áreas afectadas por lahares de la ciudad de Arequipa (Thouret et al., 2014). En ambos casos se utilizó el algoritmo LaharZ.

Dentro de los principales procesos para el modelamiento se consideran la creación de superficies hidrológicas y la definición de la zona de peligro proximal H/L en base a la altura del macizo y la distancia hasta donde el terreno no resulta erosionado. En este estudio se considera valores de H/L en un rango entre 0.3 a 0.47.

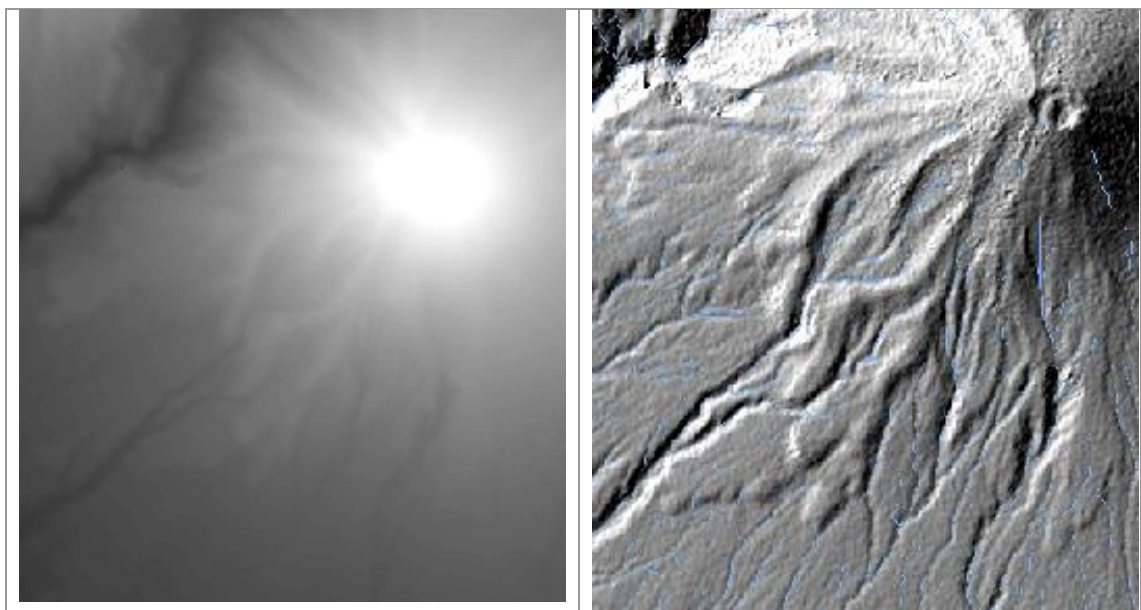


Figura 5.- DEM utilizado para modelamiento de la zona de Mariano Melgar (Izquierda). Generación de superficies hidrológicas (drenajes) para la zona de estudio (Derecha).

Considerando la topografía y la distancia del distrito de Mariano Melgar a la estructura del volcán Misti, se ha considerado para los lahares volúmenes de descarga de 1.5 Mm^3 , 3 Mm^3 y 9 Mm^3 ; así como los “start points” o puntos de origen y/o inicio del modelamiento de lahares provenientes del SHP de la zona proximal de peligros.

Finalmente, luego de generados los rasters de lahares, se utilizan herramientas computacionales para su digitalización a archivos de formas y suavizado de contornos para cada capa de volumen modelado.

5.- ESCENARIOS POR PELIGRO DE LAHARES

En los últimos años, se han realizado estudios sobre el impacto que tendrían en la ciudad de Arequipa la ocurrencia de flujos piroclásticos, emisión y caída de tefras, colapso sectorial del edificio volcánico y descenso de lahares (Thouret et al., 2001; Delaite et al., 2005; Harpel et al., 2011; Constantinescu et al., 2011; Sandri et al., 2014 y Charbonnier et al., 2020). Sin embargo, pocos estudios se han elaborado tomando en cuenta zonas específicas como aquellas delimitadas por distritos, en este caso, el distrito de Mariano Melgar.

Históricamente, en Arequipa, los volúmenes máximos de lahares registrados fueron del orden de $1,5 \text{ Mm}^3$ a 4 Mm^3 para periodos entre 300 a 1000 años, asociados a veces a erupciones explosivas moderadas (IEV 1-2). Lahares con volúmenes del orden de 9 Mm^3 a 10 Mm^3 son menos frecuentes y al parecer ocurren cada 1000 a 5000 años, y estarían asociados a erupciones explosivas con $\text{IEV} \geq 3$ (Delaite et al., 2005; Vargas et al., 2010).

Para la elección de los volúmenes de lahares a ser considerados en este estudio, se ha tomado en cuenta los aportes de Thouret et al. (2001), Delaite et al. (2005), Harpen et al. (2011), así como los volúmenes de lahares ocurridos recientemente en el volcán Misti y que fueron reportados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP). En este sentido, se ha considerado volúmenes de 1.5 Mm^3 , 3 Mm^3 y 9 Mm^3 para la zona del distrito de Mariano Melgar; lo cual ha permitido generar 3 escenarios críticos y cuyas características se describen a continuación (Figura 6):

- Escenario 1: Este escenario toma en consideración la ocurrencia de lahares o flujos de barro que alcanzarían volúmenes de 1.5 Mm^3 (áreas sobre quebradas en color rojo), que discurrirían por las quebradas Huarangueros, Huarangal y Barranco, así como por los

sectores de Los Olivos, La Riconada y Mariano Bustamante. Estos lahares se presentarían con mayor probabilidad en periodos fluviales con altas descargas. Esto lahares podrían afectar la zona sur del distrito de Mariano Melgar, especialmente viviendas aledañas a las quebradas antes indicadas y al distrito colindante de Paucarpata. Los lahares continuarían su paso y afectarían también al distrito de José Luis Bustamante y Rivero, así como el Cercado de Arequipa. Estos lahares son del tipo secundarios.

- Escenario 2: Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 3 Mm³ que discurrirían por las quebradas Huarangueros, Huarangal y Barranco, así como aquellas que pasan por los sectores de Los Olivos, La Riconada y Mariano Bustamante (áreas sobre quebradas en color naranja). Posteriormente, seguirían su paso por las torrenteras colindantes con las avenidas Los Incas y Venezuela hasta confluir con el río Chili. La ocurrencia de estos lahares afectarían en mayor grado a los distritos de Mariano Melgar, Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero, así como el cercado de Arequipa.

- Escenario 3: Considera la ocurrencia de lahares que alcanzan volúmenes de 9 Mm³ y que discurrirían por las mismas quebradas del escenario 2, pero con mayor intensidad, mayor caudal, por lo que causarían mayor afectación a su paso, no solo se sumaría a los caudales del río Chili, sino que tendría un alcance del orden de 27 km. Estos lahares afectarían severamente viviendas, instituciones educativas, centros de salud, infraestructura urbana y vías no solamente del distrito de Mariano Melgar, sino de los distritos aledaños como Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero, así como el cercado de Arequipa. La probabilidad de ocurrencia de estos lahares es baja por depender de una eventual erupción del Misti o lluvias muy intensas.

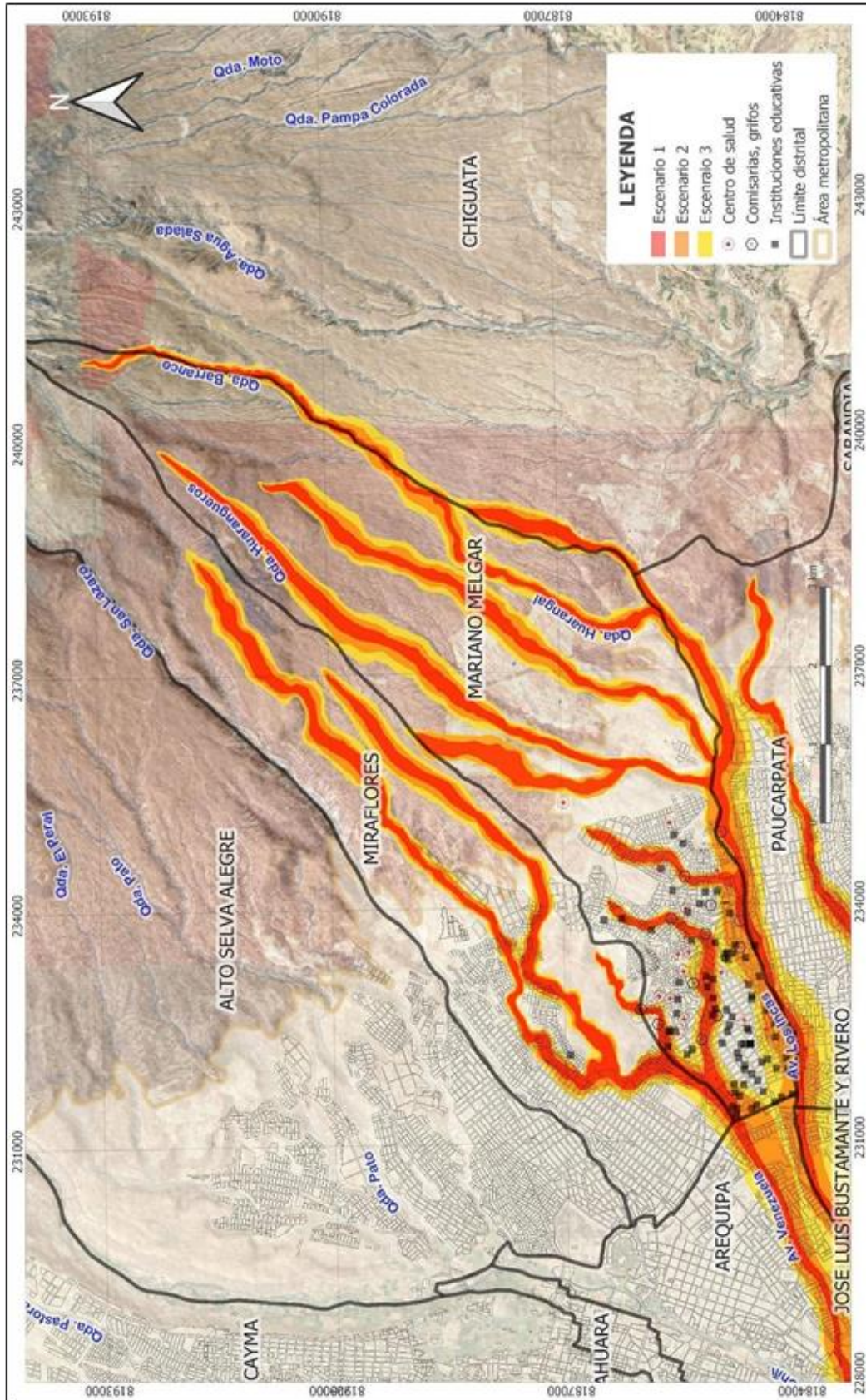


Figura 6.- Mapa de zonificación de escenarios críticos por descenso de lahares para la zona del distrito de Mariano Melgar. Las áreas en color rojo corresponden al Escenario 1; las áreas en color naranja al Escenario 2 y las áreas en color amarillo, al Escenario 3.

6.- ÁREAS CRÍTICAS POR LAHARES

Las zonas de afectación por lahares en el distrito de Mariano Melgar obtenidos en este estudio, tienen estrecha relación con los escenarios observados en las últimas décadas en la provincia de Arequipa. De acuerdo a esto, las áreas urbanas que destacan por su exposición al peligro de lahares son:

Área de San Jerónimo: Aquí se tiene la presencia de la quebrada Huarangal que divide a los distritos de Mariano Melgar y Paucarpata, y en cuyas riberas más de 500 familias están expuestas a la ocurrencia de lahares. Entre los principales elementos que incrementan el riesgo están la presencia de un botadero de desmonte de escombros y las viviendas precarias distribuidas a lo largo del cauce de la quebrada. Asimismo, en las zonas más altas existe actividad minera no metálica; es decir, movimiento y extracción de agregados para la construcción, lo que genera las modificaciones en el cauce natural de la quebrada. Por este sector, desde hace varios años en temporada de lluvias discurren lahares, tal como el ocurrido el 1 de noviembre de 2015 (Figura 7D).

Área Cerrito Belén: Aquí, las partes altas y bajas son vulnerables ante la ocurrencia de lahares que afectarían viviendas, vías de acceso, y podrían aislar el reservorio de agua de Sedapar que se encuentra en la parte baja. Hecho similar fue observado el 25 de febrero de 2020 en la cual el lahar afectó principalmente las vías de acceso y por ende el tránsito hacia las zonas altas (Figura 7B).

Intersección Prolongación Lima con Rosaspata: En esta zona pueden confluír los lahares originados en el sector de la Rinconada. Asimismo, se debe considerar que a pocas cuadras se encuentra la Plaza Umachiri.

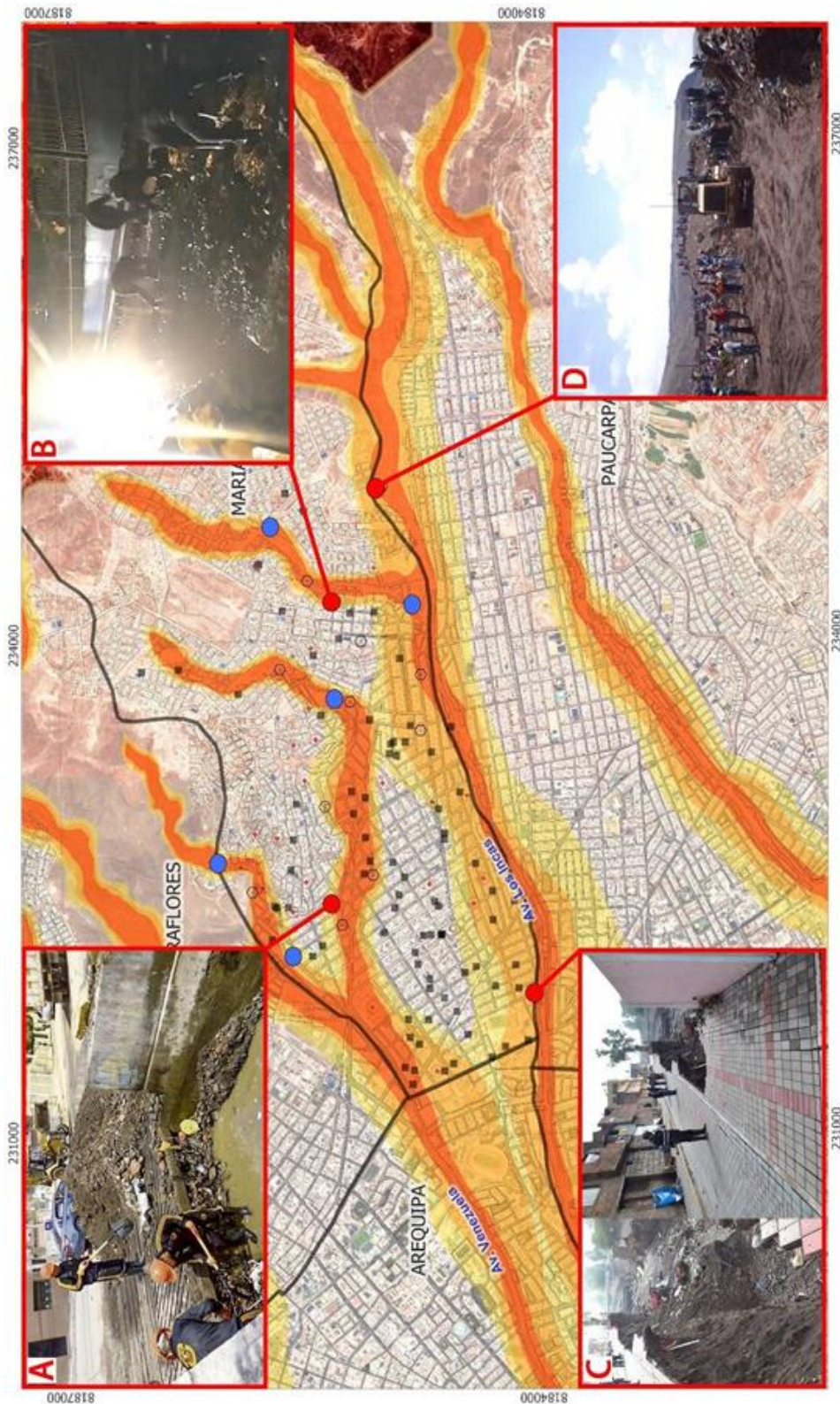


Figura 7.- Zonas vulnerables ante escenarios críticos por lahares en el distrito de Marian Melgar. A: Lahar que afectó intersección Prol. Lima con Rosapata el 21 febrero de 2019 (Fuente: La República). B: Lahar que afectó la zona de Jerusalén el 20 de febrero de 2020 (Fuente: Arequipa en directo). C: Afectación por lahar en la zona del malecón Santa Rosa, ocurrido el 3 de enero de 2021 (Fuente: La República). D: Ocurrencia de lahar que afectó la zona de San Jerónimo el 1 de noviembre de 2015 (Fuente: La República). Los círculos en azul indican zonas vulnerables por activación de quebradas (Alfaro & Quiñones 2016).

Como antecedente histórico, se tiene que el día 21 de febrero de 2019, un lahar rebasó la vía pública a la altura del campo deportivo Revolución, debido a que un pequeño túnel detuvo su curso hacia la torrentera Venezuela provocando la afectación en la vías y transporte público (Figura 7A).

Malecón Santa Rosa: En más de una ocasión, esta zona se ha visto afectada por lahares de gran volumen provenientes de la quebrada Huarangal afectando las riberas de la torrentera y debilitando muros de contención para luego generar derrumbes que alcanzaron la vía paralela y viviendas. El lahar ocurrido el 3 de enero de 2021 destruyó muros de contención a lo largo de 50 metros exponiendo al peligro a las viviendas colindantes con la torrentera y la vía paralela a la misma (Figura 7C).

Finalmente, estudios realizados en los años 2015 y 2016 por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Ministerio de Agricultura y Riego (Alfaro & Quiñones, 2016) identificaron poblaciones vulnerables por activación de quebradas que se encuentran dentro de las áreas delimitadas como críticas ante la ocurrencia de lahares. Entre las zonas vulnerables se encuentran la ampliación Alto Cenepa, la zona del Soldado Desconocido de la parte baja de Mariano Bustamante, el sector de la Rinconada, la zona de la quebrada Huarangal a la altura de Miguel Grau, Héroes del Cenepa (Figura 7; círculos en azul).

Inicialmente, muchos sectores vulnerables se encontraban deshabitados; sin embargo, con el pasar del tiempo fueron rellenados con escombros en algunos casos y, en otros, simplemente fueron lotizados, lo que generó su exposición a los lahares al registrarse lluvias intensas. En la Figura 8 se compara dos imágenes satelitales (Fuente Google Earth) de los años 2002 y 2019, observándose el irresponsable crecimiento de las áreas urbanas hacia espacios de alto riesgo para el peligro de lahares.



Figura 8.- Comparación de Imágenes satelitales de la quebrada Huarangal del distrito de Mariano Melgar (Fuente: Google Earth). Arriba: Imagen para el mes de junio - 2001 y Abajo: Imagen correspondiente al mes de julio - 2019. Obsérvese el crecimiento de las áreas urbanas.

CONCLUSIONES

Utilizando un modelo digital de terreno con una resolución de 12 metros y el algoritmo LaharZ, se ha construido los escenarios críticos por descenso de lahares que afecten al área ocupada por el distrito de Mariano Melgar, siendo las principales conclusiones las siguientes:

- Considerando diferentes volúmenes para los lahares se definieron tres escenarios, siendo el más crítico el que considera los lahares que discurrirían por las quebradas Huarangueros, Huarangal y Barranco, además de las quebradas que cruzan los sectores de los Olivos, la Rinconada y Mariano Bustamante que limita con el distrito de Miraflores. Estos lahares seguirían su paso por las torrenteras de distritos colindantes como José Luis Bustamante y Rivero, así como el Cercado de Arequipa, hasta confluir al caudal del río Chili.
- Las zonas críticas por peligro de lahares identificadas en el modelamiento numérico guardan estrecha relación con las áreas inundadas por los lahares ocurridos en el año 2021 y en años anteriores, afectando a San Jerónimo, zona Cerrito Belén, intersección Prolongación Lima con Rosaspata y malecón Santa Rosa.
- La información obtenida es útil en la gestión del riesgo y permite confirmar que la ocurrencia de un lahar podría poner en riesgo la población, medio ambiente y obras de ingeniería.

RECOMENDACIONES

- Evitar la construcción de viviendas próximas a quebradas Huarangal, Huarangueros y Barranco, además de las quebradas que cruzan los sectores de los Olivos, la Rinconada y Mariano Bustamante del distrito de Mariano Melgar.
- Realizar periódicamente la limpieza y descolmatación de los cauces de las quebradas o torrenteras y en periodos de lluvias, alejarse de las quebradas por donde descienden los lahares.
- El Instituto Geofísico del Perú pone a disposición de las autoridades regionales y locales su capacidad de desarrollo tecnológico, investigación y asesoría técnico-científica para la instalación de sistemas de alerta inminente de lahares mediante la firma de convenios.
- Mantenerse informado en todo momento sobre la ocurrencia de lahares mediante la información proporcionada por el IGP mediante su portal web del Centro Vulcanológico Nacional (<http://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>) y la aplicación Volcanes Perú.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, T & Quiñones, S. (2016) - Identificación de poblaciones vulnerables por activación e quebradas 2015-2016. Autoridad Nacional del Agua (ANA). Biblioteca Nacional del Perú N•2015-12868
- Charbonnier, S.J., Thouret, J.-C., Gueugneau, V., Constantinescu, R (2020) - New Insights Into the 2070 cal yr BP Pyroclastic Currents at El Misti Volcano (Peru) From Field Investigations, Satellite Imagery and Probabilistic Modeling. *Front. Earth Sci.* 8:557788.
- Constantinescu, R., Thouret, J. C., Irimuş, I. A. (2011) - Computer modeling as tool for volcanic hazards assessment: an example of pyroclastic flow modeling at El Misti volcano, southern Peru. *Geographia Technica*, 14(2).
- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, M.F., Stinton, A., Labazuy, P., Souriot, T., Van Westen, C. (2005). Assessment of volcanic hazards 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, vol. 140, p. 209–231.
- Harpel, C., de Silva, S., Salas, G. (2011). The 2 ka eruption of Misti volcano, southern Peru-The most recent Plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. *Geological Society of America Special papers* 484, 72 pp.
- INEI (2018). Directorio Nacional de Centros Poblados, Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas (https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm).
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), (2016). Sistema de Información estadístico de apoyo a la prevención a los efectos del fenómeno El Niño.
- Iverson, R. M., Schilling, S. P., Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8), 972-984.
- Luna, R. (2019). Evaluación de riesgos ante precipitaciones intensas y modelamiento hidrológico de la quebrada huarangal limitante entre los distritos de Paucarpata - Mariano Melgar, provincia de Arequipa, región Arequipa". Tesis de grado.
- Macedo, L. (1994). Peligro volcánico Potencial del Misti. Convenio DHAUNDRO/UNSA. Tesis de grado UNSA.

- 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* (141-168 p.). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00006-X>.
- PERÚ. Municipalidad distrital Mariano Melgar / fondo ítalo-peruano. 2006. Proyecto de tratamiento y encauzamiento de torrenteras I, II, III del distrito de Mariano Melgar. Arequipa: Municipalidad Distrital Mariano Melgar / Fondo Ítalo-Peruano.
- Sandri L., Thouret J.C., Constantinescu R., Blass S., Tonini R. (2014). Longterm multi-hazard assessment form El Misti volcano (Peru). *Bulletin of Volcanology* (2014) 76:771.
- Schilling, S. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar inundation hazard zones. Report, 98-638 p. USGS.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), (2017). Proyecciones para las precipitaciones Diciembre 2017, Enero-Febrero 2018 en la región Arequipa, 6 páginas.
- Thouret, J. C., Ettinger, S., Guitton, M., Santoni, O., Magill, C., Martelli, K., & Arguedas, A. (2014). Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: the case of Arequipa (Peru). *Natural Hazards*, 73(3), 1771-1815.
- Thouret, J.C.; Finizola, A.; Fornari, M.; Legeley-Padovani, A.; Suni, J. & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610.
- Tilling, R. I. (1989). Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos. Santa Fe, Nuevo México, USA.
- Vallance, J. W., Iverson, R. M. (2015). Lahars and Their Deposits. *Encyclopedia of volcanoes*, 649-664 p.
- Vargas, R.; Thouret, J.-C.; Delaite, G.; Van Westen, C.; Sheridan, M.F., (2010). Mapping and assessing volcanic and flood hazards and risks, with emphasis on lahars, in Arequipa, Peru. En: Groppelli, G., & Viereck-Goette, L., eds. *Stratigraphy and geology of volcanic areas*. Boulder, CO: Geological Society of America, Special Paper 464, p. 265-280.

