



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS DE PELIGROS VOLCÁNICOS CON ORIGEN EN EL VOLCÁN MISTI: APLICACIÓN AL DISTRITO DE MARIANO MELGAR (Región Arequipa)

Informe Técnico N°011-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Mayo, 2021

Instituto Geofísico del Perú

Presidente ejecutivo: Hernando Tavera

Director científico: Edmundo Norabuena

Informe técnico

Análisis de los escenarios de peligros volcánicos con origen en el volcán Misti: Aplicación al Distrito de Mariano Melgar

Autores:

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

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

**ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS DE PELIGROS VOLCÁNICOS
CON ORIGEN EN EL VOLCÁN MISTI:
APLICACIÓN AL DISTRITO DE MARIANO MELGAR**

Lima – Perú
Mayo, 2021

RESUMEN

Al pie del volcán Misti, uno de los más peligrosos del mundo por haber presentado erupciones muy explosivas, viven más de 1 millón de personas y por ello, su estudio y monitoreo es de vital importancia por parte del Instituto Geofísico del Perú (IGP) a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL). Ante una eventual explosión, son las avalanchas de escombros, los flujos de lavas y de piroclásticos los que afectarían a la ciudad de Arequipa y principalmente al distrito de Mariano Melgar.

El modelado numérico de las avalanchas de escombros muestra que afectarían al área urbana del distrito de Mariano Melgar, sobretodo en su extremo noreste, ya que a la fecha viene ocupándose de manera acelerada. El modelado de flujos de lava y piroclásticos muestran no afectar al área del distrito, pero considerando el acelerado crecimiento urbano, es de esperar que a futuro la afectación sea de alto riesgo.

La información contenida en el presente informe es base para la elaboración de planes de evacuación en caso de una erupción volcánica del Misti.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

2.- GENERALIDADES

2.1.- Objetivos

2.2.- Peligros volcánicos

2.2.1.- Avalancha de escombros

2.2.2.- Flujos de lava

2.2.3.- Flujos piroclásticos

2.3.- Contexto geológico del volcán Misti

2.4.- Distrito de Mariano Melgar

3.- DATOS Y MÉTODO DE ANÁLISIS

3.1.- Modelo digital de elevación

3.2.- Modelamiento de peligros volcánicos

3.2.1.- Avalancha de escombros

3.2.2.- Flujos de lava

3.2.3.- Flujos de piroclásticos

4.- RESULTADOS

4.1.- Escenarios de peligro por avalancha de escombros

4.2.- Escenarios de peligro por flujos de lava

4.3.- Escenarios de peligro por flujos piroclásticos

5.- GESTIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

5.1.- Percepción del riesgo volcánico

5.2.- Medidas de prevención y gestión del riesgo

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

AGRADECIMIENTOS

BIBLIOGRAFIA

ANEXO: Encuesta para percepción del riesgo volcánico

1.- INTRODUCCIÓN

En las regiones de Arequipa, Moquegua y Tacna existen ocho volcanes activos: Sabancaya, Misti, Coropuna, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca y Yucamane. Seis de estos volcanes erupcionaron durante los últimos 500 años (Ubinas, Sabancaya, Huaynaputina, Misti, Ticsani y Tutupaca) y actualmente, hay un volcán con actividad eruptiva, Sabancaya (en alerta naranja), en la región Arequipa.

El volcán Misti es uno de los ocho 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, con más de 1 millón de pobladores que viven a tan solo 12 km del cráter. El Misti presentó erupciones de tipo pliniana como la ocurrida hace 2000 años (Mariño et al., 2016), pero también presentó erupciones vulcanianas moderadas como la ocurrida entre los años 1440 a 1470, la cual diezmó la población de Arequipa (Macedo, 1994). Actualmente, el volcán Misti presenta actividad fumarólica esporádica.

La vulnerabilidad de la ciudad de Arequipa frente a un posible escenario de erupción del volcán Misti se incrementa diariamente debido a que la ciudad crece en dirección de esta estructura volcánica, acercándose cada vez más a su cráter. Asimismo, varias viviendas se han edificado dentro del cauce de las quebradas que descienden del volcán, como San Lázaro, Pastores, Huarangal, Agua Salada y El Chical (Macedo, 2012), todas dentro de los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Paucarpata.

Este crecimiento de la ciudad, hace pensar que la población tiene una percepción baja del peligro volcánico y del riesgo al cual se encuentran; por lo tanto, es necesario implementar medidas de educación, difusión y

sensibilización sobre los peligros volcánicos, especialmente a la población que habita en zonas cercanas a la estructura volcánica. Para ello, es necesario cuantificar el nivel de percepción de la población arequipeña sobre el peligro volcánico y sus consecuencias.

El distrito de Mariano Melgar, ubicado al noreste de la ciudad de Arequipa, es uno de los distritos más cercanos al volcán Misti, y su población se asienta a tan solo 12 km al suroeste del cráter (Figura 1). Por tal motivo, a solicitud de la municipalidad de este distrito, se ha realizado el modelamiento numérico de avalanchas de escombros, flujos de lava y flujos piroclásticos para conocer las principales zonas que serían afectadas y evaluar el nivel del riesgo al cual se encuentra la población de dicho distrito.

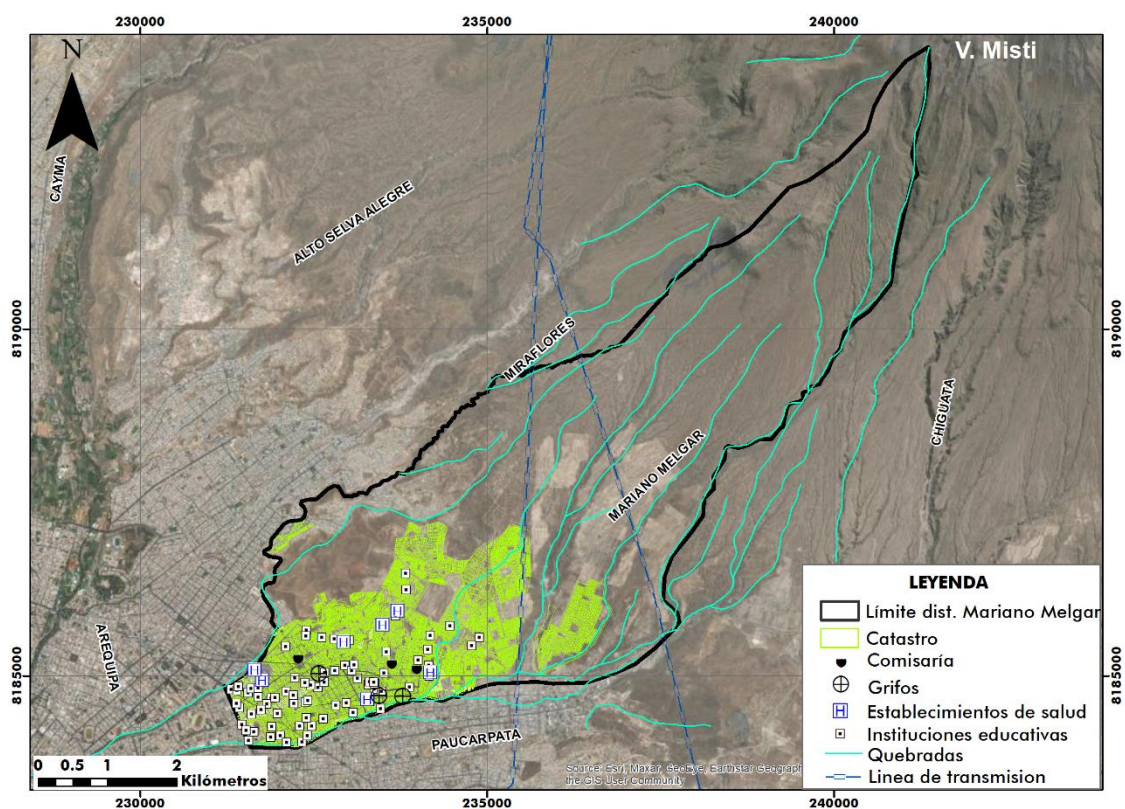


Figura 1.- Ubicación del distrito de Mariano Melgar con respecto a la estructura del volcán Misti. Se muestra el límite distrital y la ubicación de los principales establecimientos públicos del distrito.

2.- GENERALIDADES

El presente estudio está enmarcado en el Proyecto “Dinámica de los productos volcánicos Misti y análisis de exposición y afectación en la población de la ciudad de Arequipa” y la información a generarse servirá de insumo para la elaboración de protocolos de evacuación ante futuros procesos eruptivos del volcán Misti en el distrito de Mariano Melgar.

2.1.- Objetivos

El objetivo del presente estudio es establecer escenarios de alto, moderado y bajo riesgo ante la ocurrencia de peligros volcánicos como avalanchas de escombros, flujos de lava y flujos piroclásticos emitidos por el volcán Misti ante un posible escenario de erupción y que afectaría al distrito de Mariano Melgar. La información a generarse será de utilidad para las autoridades en la toma de decisiones y la mitigación de riesgos.

2.2.- Peligros Volcánicos

En el volcán Misti, durante sus procesos eruptivos pasados se ha identificado la generación de caída de piroclastos y proyectiles balísticos, flujos y oleadas piroclásticas, flujos de escombros (lahares), flujos de lava, avalanchas de escombros y gases volcánicos (Mariño et al., 2016). A continuación, se describen los tres productos volcánicos en los cuales se enfoca este estudio:

2.2.1.- Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros es un flujo seco, denso y rápido, compuesto de clastos volcánicos que se desplazan en una ladera de volcán debido a un súbito sacudimiento por la ocurrencia de una erupción, movimientos sísmicos, alteración hidrotermal o explosiones volcánicas. Este

tipo de producto volcánico ocurre con poca frecuencia y puede alcanzar decenas de kilómetros de distancia debido a su gran velocidad de desplazamiento, llegando a arrasar todo lo que encuentra a su paso. Las avalanchas volcánicas han ocurrido en numerosos conos compuestos o estratovolcanes durante tiempos históricos. Algunos han ocurrido después de varios meses de actividad precursora sísmica, de deformación o explosiva; otras han ocurrido con aparentemente escaso aviso previo (Macedo, 2012)

En el caso del volcán Misti, los afloramientos de avalanchas de escombros se extienden hacia el sur, oeste y suroeste de la estructura volcánica, a distancias entre 11 y 8 km del cráter. Estos depósitos tienen un espesor promedio de 60 m y cubren una superficie aproximada de 40 km². Algunos afloramientos, principalmente en el sector suroeste (Villa Ecológica), presentan morfología típica de montículos o colinas pequeñas (hummocks) de hasta 70 m de alto (Figura 2). El depósito presenta predominantemente facies de matriz y, ocasionalmente, facies de bloques (Mariño et al., 2016).

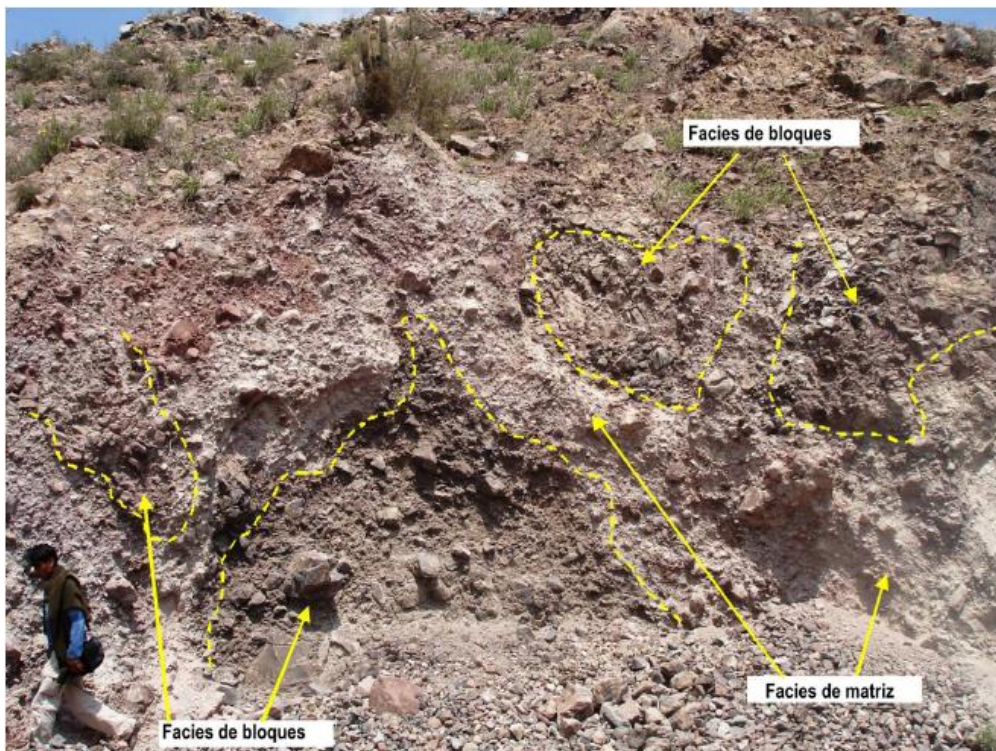


Figura 2.- Depósitos de avalanchas de escombros del volcán Misti presente en el sector de Villa Ecológica (Mariño et al., 2016).

2.2.2.- Flujos de lava

Son corrientes de roca fundida que son expulsadas por el cráter o fracturas existentes en los flancos del volcán y fluir por el fondo de las quebradas hasta alcanzar varios kilómetros de distancia. En volcanes peruanos, al tener magmas viscosos, normalmente los flujos se enfrían en la zona del cráter para formar domos de lava o recorren escasos kilómetros. Los flujos de lava destruyen y calcinan todo a su paso; sin embargo, no representan una gran amenaza para las personas debido a su baja velocidad de desplazamiento (Macedo, 2012).

El volcán Misti, típicamente, ha emitido lavas viscosas de composición andesítica a dacítica que al ser expulsadas se han trasladado hasta distancias entre 10 y 12 km en dirección suroeste, aunque en promedio las distancias alcanzadas fue entre 5 y 8 km (Mariño et al., 2016), ver Figura 3.

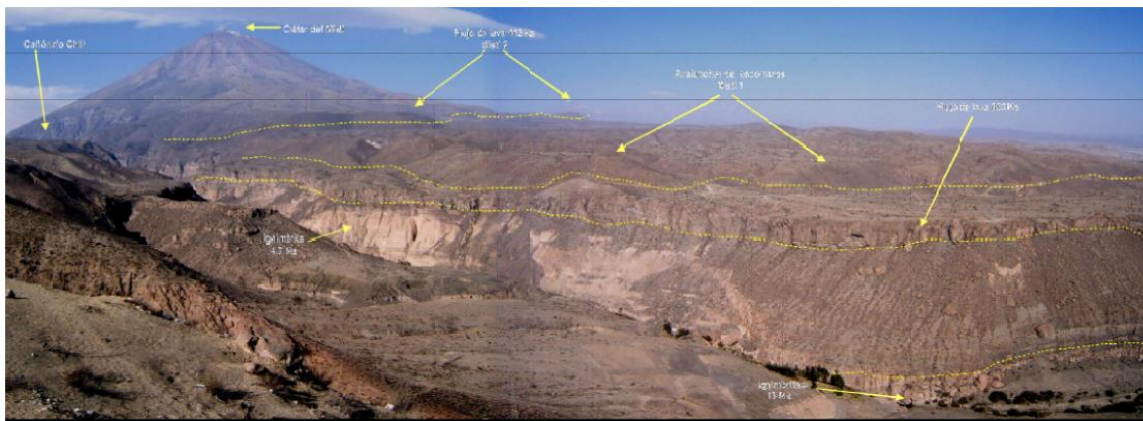


Figura 3.- En la base, se observa ignimbritas que conforman el sustrato la Ignimbrita Río Chili (13.1 Ma) e ignimbrita La Joya (4.7 Ma). Sobreyace a las ignimbritas el flujo de lava de hace 833 ka y depósitos de avalanchas de escombros provenientes del edificio Misti 1. Al fondo, se observa la secuencia de flujos de lava datadas en 112 ka, perteneciente al edificio Misti 2 (foto del flanco suroeste del volcán Misti). Tomado de Mariño et al., (2016).

2.2.3 Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos son masas calientes (300 °C a 500 °C) conformadas por una mezcla de ceniza, fragmentos de roca y gases, que

descienden por los flancos del volcán a velocidades entre 200 y 300 m/s. Estos flujos poseen normalmente una parte inferior densa que se encauza y desplaza por el fondo de las quebradas o valles y otra superior menos densa, denominada oleada piroclástica, compuesta por una nube turbulenta de gases y ceniza que con facilidad sale del valle, sobrepasa relieves importantes y afecta un área mayor.

Estos flujos y oleadas piroclásticas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Macedo, 2012). La erupción del Misti de hace 2050 años generó flujos piroclásticos de pómez y ceniza canalizados en las quebradas hasta alcanzar distancias, desde el cráter de hasta 13 km en dirección sur y suroeste (Cobeñas, 2009; Cobeñas et al., 2012). Estos flujos poseen hasta 30 m de espesor a 6 km del cráter y entre 4 y 6 m de espesor a 11 km del cráter. Thouret et al. (2001) estimó que el flujo piroclástico posee 0.7 km³ de volumen y para Harpel et al. (2011), el flujo piroclástico tiene un volumen muy limitado, de solo 0.01 km³ (Mariño et al., 2016), ver Figura 4.



Figura 4.- Flujos piroclásticos de pómez y cenizas de hace 40 Ka. Afloramiento en el río Chili cercano al Santuario de Chapi (Fotografía tomada de Mariño et al., 2016).

2.3.- Contexto geológico del volcán Misti

El volcán Misti se emplazó sobre un substrato conformado por ignimbritas y depósitos volcanoclásticos del Mioceno-Pleistoceno, y está constituido por cuatro edificios principales denominados por Thouret et al. (2001) como Misti 1, Misti 2, Misti 3 y Misti 4 (Figura 5).

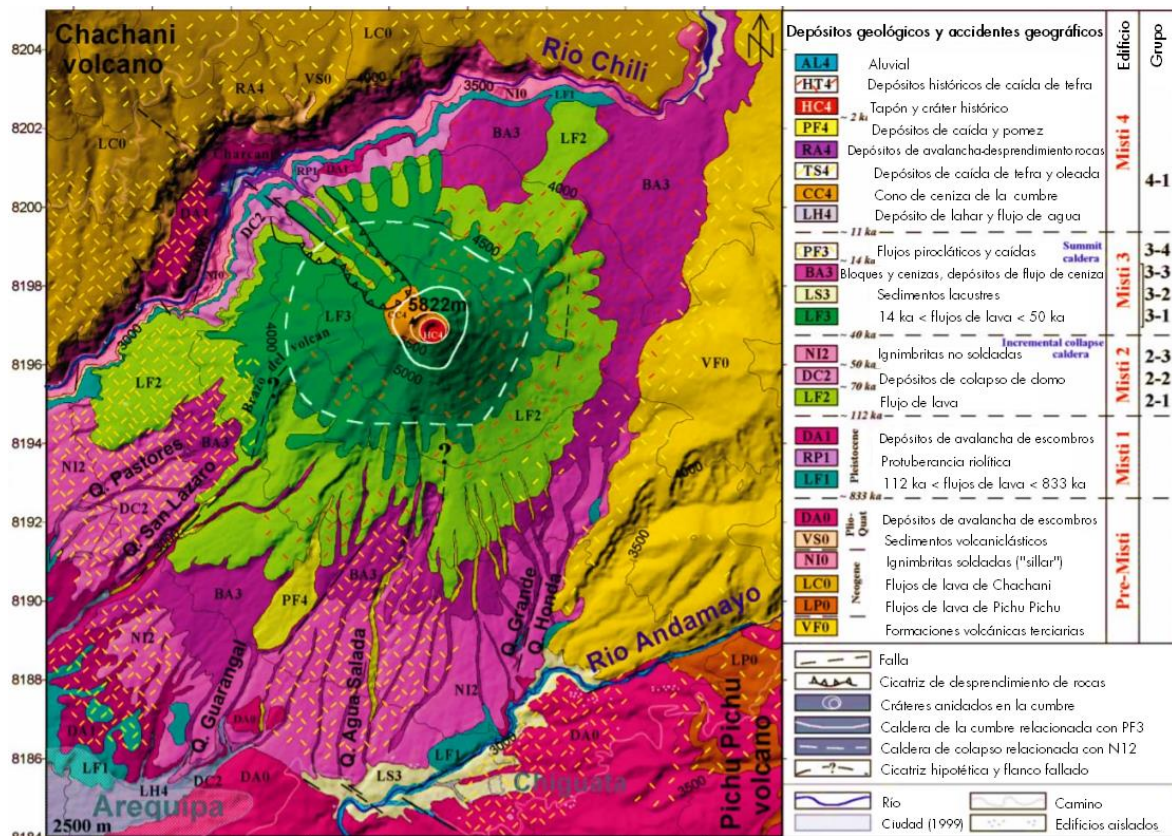


Figura 5.- Mapa geológico del volcán Misti superpuesto a un DEM (modelo digital de elevación), cartografiando solo los grupos estratigráficos más voluminosos (Modificado de Thouret et al., 2001)

El Misti 1 forma la base del edificio volcánico y está conformado por flujos de lava y depósitos de avalanchas de escombros intercalados con depósitos volcanoclásticos y flujos de escoria, todos emplazados posiblemente entre 833 y 112 ka. El edificio Misti 2 fue construido entre los 112 y 40 ka aproximadamente; y está constituido por flujos de lava y flujos piroclásticos, así como caídas piroclásticas. El edificio Misti 3 se emplazó entre los 4400 y 5400 m s. n. m. aproximadamente, y se le asigna una edad

de 40-50 hasta 14 ka. Este edificio está conformado por flujos de lavas en bloques, domos, así como flujos, caídas y oleadas piroclásticas. El edificio Misti 4 se construyó en los últimos 11000 años, por encima de los 5400 m s. n. m. como producto de erupciones explosivas que emplazaron flujos y caídas piroclásticas. Durante los últimos 50000 años, el volcán ha emplazado cerca de 10 flujos piroclásticos y 20 caídas de pómez y ceniza. La última erupción de gran magnitud ocurrió hace 2050 años y tuvo un IEV 4-5. Durante la era cristiana, el Misti ha presentado por lo menos tres erupciones: en 1784 d. C., 1787 d. C. y mediados del siglo XV, esta última tuvo IEV 2 (Mariño et al., 2016).

2.4.- Distrito de Mariano Melgar

La historia del distrito de Mariano Melgar se remonta a los inicios del siglo XX, allá por el año de 1929 un grupo de 25 familias conformadas en su mayoría por constructores, solicitaron al gobierno la adjudicación de los terrenos de lo que es hoy la avenida Jesús. Al ser denegada la respectiva solicitud, estos pobladores empezaron a ubicarse en las inmediaciones de la torrentera que corría junto a los límites del distrito de Miraflores. Como es de suponerse, la dureza del árido sector tuvo que ser superada lenta pero sistemáticamente por esta incipiente población, quienes poco a poco fueron aprovechando la gran existencia de materiales de construcción próxima a sus nuevas ubicaciones. Allí existían áreas con gran cantidad de piedra, cascajo y arena.

En poco tiempo, surgieron los asentamientos humanos Generalísimo San Martín, Santa Rosa, San Lorenzo y Cerro la Chilca. Junto a estos nuevos pueblos se quedaron grabados los nombres de sus forjadores, entre ellos tenemos a Manuel Herrera, Facundo Mendoza, Víctor Huancalla, Manuel Alarcón, Máximo Salinas, entre otros. Años más tarde se incrementaría de forma significativa la población del sector y se generarían problemas para el abastecimiento de los servicios públicos, tal como ocurrió en el caso del agua

potable, ya que solo se tenía para servicio de la población dos piletas públicas que se encontraban ubicadas en lo que hoy es son las Avenidas Lima y Simón Bolívar.

Para superar las deficiencias administrativas, y ante la iniciativa de gente del sector, se promovió la formación del distrito de Mariano Melgar, creado en 1965. El área asignada para el naciente distrito fue de aproximadamente 285 hectáreas, dentro de las cuales se encuentra una cambiante y muy agreste topografía que va desde zonas planas y arenosas hasta grandes pendientes y cascadas rocosas.



Figura 6: Plaza Umachiri del distrito de Mariano Melgar

El distrito de Mariano Melgar se encuentra ubicado en el noreste de la ciudad de Arequipa (Figura 6), a 4 km de la Plaza de Armas. Su elevación varía entre los 2335 a 2370 m s. n. m. y ocupa un área de aproximadamente 34.8 km². Los límites de este distrito son: por el norte, el distrito de Miraflores, desde el cruce de malecón Zolezzi con la avenida Jesús, siguiendo la primera torrentera hasta sus contrafuertes y la avenida Jesús por el medio; por el este, los cerros Chilca y Atalaya, hasta sus

contrafuertes y, por el oeste, el Cercado de Arequipa y la Avenida Jesús por medio (Ley de creación del Distrito, 1965). Según INEI (2018), la población del distrito es de 63 899 habitantes.

3.- DATOS Y METODO DE ANÁLISIS

Para el análisis de los escenarios de peligros provenientes del volcán Misti, es necesario contar como datos de entrada un modelo digital de elevación que recree la topografía de la zona de estudio y mediante el uso de la técnica de modelamiento numérico construir los escenarios de riesgo de la población ante los peligros provenientes del Misti. A continuación, se describen los datos y la metodología empleada en el presente estudio.

3.1.- Modelo digital de elevación

Para la construcción de escenarios numéricos sobre el comportamiento dinámico de los diferentes peligros volcánicos, es importante contar con un modelo digital de elevación (DEM) de gran resolución. Por tal motivo, se ha seleccionado y descargado dos DEM adquiridos en órbita ascendente del satélite ALOS-PALSAR; el primero abarca un área de 6.4 km² y fue adquirido el 9 de marzo de 2011 con una resolución espacial de 12.5 m., siendo esta la mejor resolución disponible de libre descarga (Figura 7).

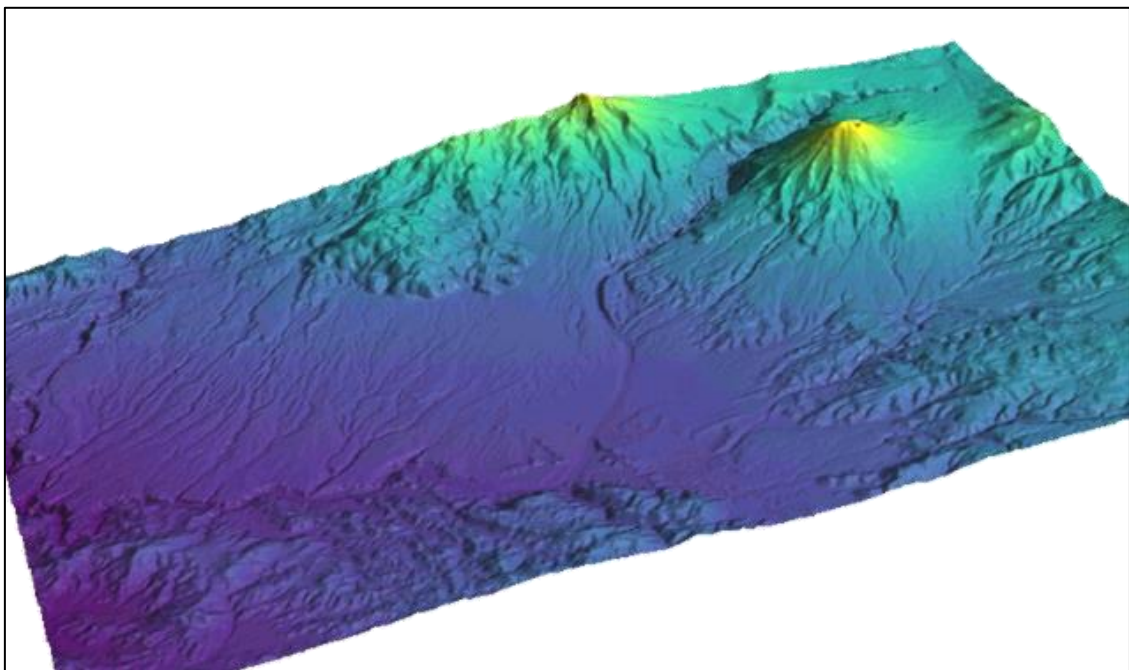


Figura 7.- Visualización de modelo en tres dimensiones en software GRASS que abarca el volcán Misti y la ciudad de Arequipa.

3.2.- Modelamiento de peligros volcánicos

3.2.1.- Avalanchas de escombros

Las simulaciones de avalanchas de escombros en el volcán Misti se realizaron utilizando el software TITAN2D, aplicado anteriormente para la simulación de lahares y flujos piroclásticos (Delaite et al., 2005; Vargas et al., 2010; Constantinescu et al., 2011). El software TITAN2D ha sido diseñado para simular flujos granulares secos con un área original de colapso sobre una superficie de terreno natural y utilizando un término de fricción de Coulomb para la interfaz entre el material granular y la superficie basal; y un término de fricción interna del flujo (Pitman et al., 2003; Patra et al., 2005).

Entre los datos de entrada para el TITAN2D se encuentran la ubicación y dimensiones de la zona de colapso, los cuales pueden ser representados por un cilindro o un paraboloide. En el modelamiento se simuló un paraboloide presente en la zona suroeste del cráter con diferentes dimensiones y volúmenes dependiendo del tipo de erupción y de cada escenario construido. Además, se consideró un valor de 34° para el ángulo de fricción interno (Galarza et al., 2014) y uno de 15° para el ángulo de fricción basal, teniendo en cuenta el coeficiente de 0.22 obtenido de los estudios realizados por Hayashi y Self (1992) en 40 avalanchas producidas en volcanes calcoalcalinos y de la clasificación que propone Stinton et al. (2004).

- **Primer escenario:** En la simulación se estimó una velocidad inicial referencial de 5 m/s y una escala de longitud de 6 km. Se ha considerado que el paraboloide tenga las dimensiones de 200 m x 150 m x 100 m de largo, ancho y profundidad respectivamente, estimándose un volumen inicial total de $4.21E+07 \text{ m}^3$.

- **Segundo escenario:** En la simulación se estimó una velocidad inicial referencial de 35 m/s y una escala de longitud de 9 km. Se ha considerado un paraboloide con dimensiones de 450 m x 300 m x 250 m de largo, ancho y profundidad respectivamente, estimándose un volumen inicial total de $4.27E+08 \text{ m}^3$.
- **Tercer escenario:** En la simulación se consideró una velocidad inicial referencial de 70 m/s y una escala de longitud de 15 km. Se ha considerado que el paraboloide tenga dimensiones de 950 m x 700 m x 525 m de largo, ancho y profundidad respectivamente, estimándose un volumen inicial total de $2.4E+09 \text{ m}^3$ (tomando como referencia la avalancha ocurrida en el Monte Santa Helena, Estados Unidos, en el año 1980, cuyo volumen fue calculado en $2.5E+09 \text{ m}^3$, aproximadamente)

3.2.2.- Flujos de lava

Para las simulaciones de flujos de lava en el volcán Misti se utilizó el software VolcFlow (Kelfoun y Druitt, 2005). Este algoritmo es un código euleriano de diferencias finitas dentro de la interfaz MATLAB y está basado en el enfoque promediado en profundidad y desarrollado para la simulación de flujos geofísicos isotérmicos, siendo idóneo para la simulación de la velocidad del flujo de lava a lo largo del tiempo, así como para la extensión de flujos de lava solidificada (Kelfoun y Vallejo, 2016). Entre los parámetros de entrada se consideró una viscosidad de 10^5 Pa (Tepley et al., 2007, 2008), una densidad de 2600 kg/m^3 como el volcán andesítico Mt. Hood (Murase and McBirney, 1973) y una cohesión de 3500 Pa como del volcán Merapi (Gertisser et al., 2012). El magma, al ser muy viscoso, no recorre grandes distancias; por lo tanto, sus productos volcánicos son menos peligrosos porque su trayectoria es predecible.

Para este estudio se consideró como fuente del flujo de lava el cráter del volcán Misti, aunque su borde noroeste, debido a la altura del cono de ceniza de la cumbre, actuaría como una barrera (Figura 8).

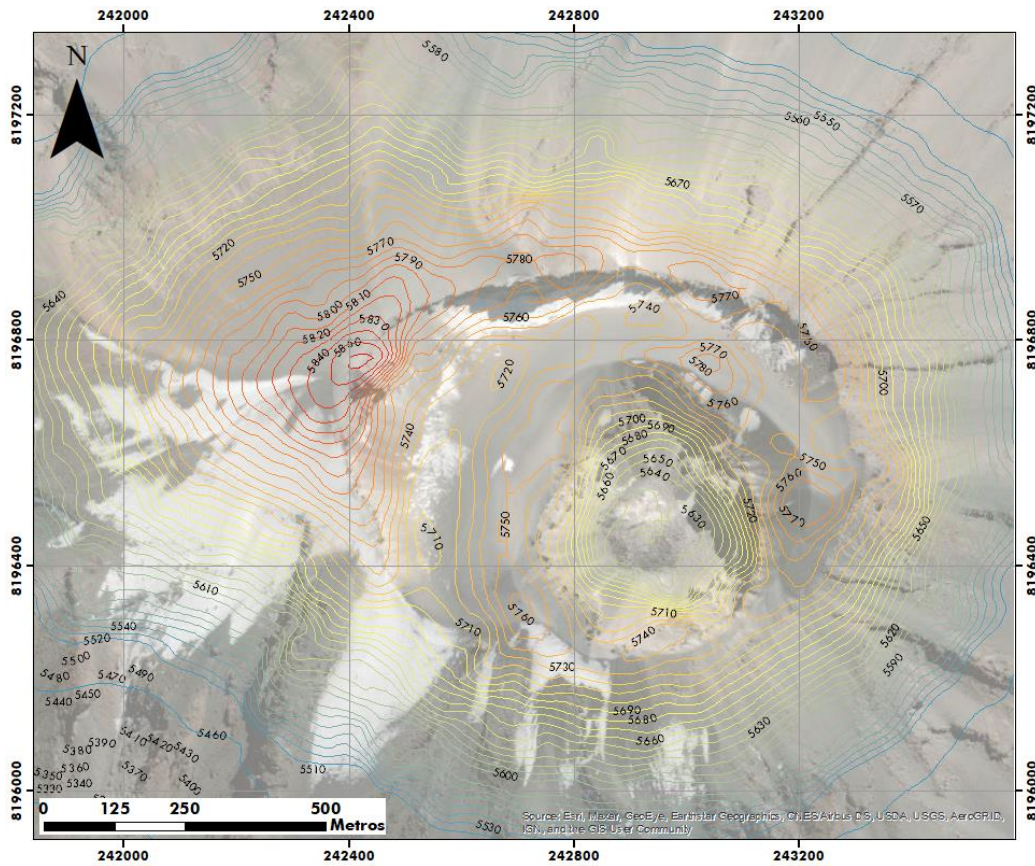


Figura 8.- Curvas de nivel en el cráter del volcán Misti.

Los volúmenes de lava considerados están en función de tres tipos de erupciones explosivas conocidas y que corresponderían a los tres escenarios que a continuación se describe:

- **Primer escenario:** Para el volcán Misti se consideró en el modelamiento un volumen de $5.7 \times 10^7 \text{ m}^3$.
- **Segundo escenario:** En el modelamiento se consideró un volumen de $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$.
- **Tercer escenario:** Se consideró un volumen de $3.7 \times 10^8 \text{ m}^3$.

3.2.3.- Flujos piroclásticos

Para las simulaciones de flujos piroclásticos en el volcán Misti se utilizó el software VolcFlow y que, en este caso, simula el flujo isotérmico de fluidos Newtonianos o Bingham sobre un modelo de elevación digital - DEM (Kelfoun y Druitt, 2005). Para este tipo de peligro volcánico, el modelo explora las características de los flujos y sus depósitos obtenidos en topografías simplificadas mediante la variación de las condiciones de la fuente y la reología.

La reología plástica, con o sin una tensión dependiente de la velocidad (p. Ej., Bingham), es más adecuada para la simulación de flujos piroclásticos densos. Con esta reología, los flujos numéricos se forman por pulsos que, a menudo, se observan durante el emplazamiento de un flujo natural con velocidades y depósitos de espesores realistas (Kelfoun, 2011). Para el caso específico de este estudio se consideró una fuente ubicada en la zona suroeste del cráter del Misti, de tal manera que podría recorrer el flanco suroeste, dirección en donde se ubica el distrito de Mariano Melgar. Entre los parámetros de entrada para la simulación están el tiempo de alimentación de 2700 segundos, una densidad de 1200 kg/m³, gravedad de 9.81 m/s² y un paso de tiempo de 0.15 segundos.

Los volúmenes considerados fueron:

- **Primer escenario:** En la simulación se estimó un volumen de 1E+07 m³.
- **Segundo escenario:** En el modelamiento se estimó un volumen de 5E+07 m³.
- **Tercer escenario:** En la simulación se consideró un volumen de 1E+08 m³.

4.- RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos para el modelamiento de avalanchas de escombros, flujos de lava y flujos piroclásticos provenientes del volcán Misti y el escenario de riesgo para el distrito de Mariano Melgar. En los mapas se incluye el catastro del distrito hasta el año 2019.

4.1.- Escenarios de peligro por avalanchas de escombros

Los resultados obtenidos para el modelado numérico han sido clasificados en escenarios de alto, moderado y bajo peligro, siendo sus características las siguientes (Figura 9):

- **Zona de peligro alto** (área de color rojo): La avalancha se desplazaría, desde la cima del volcán hasta distancias de 5 a 9 km en un tiempo de aproximadamente 15 minutos con velocidades de hasta 80 m/s en el primer minuto, para finalmente culminar su recorrido con una velocidad promedio de 0.5 m/s. En este escenario, la avalancha ocuparía un área de $\sim 8.2 \text{ km}^2$ del distrito de Mariano Melgar, y considerando el límite urbano actual, no afectaría población ni área urbana. Es importante tener en cuenta este escenario al momento de planificar la expansión urbana y planes de desarrollo para el futuro, en especial para la seguridad y la gestión del riesgo volcánico en favor de la población del distrito.
- **Zona de peligro moderado** (zona de color naranja): La avalancha de escombros recorrería, desde la cima del volcán hasta distancias entre 6 a 13.3 km en un tiempo de aproximadamente 50 minutos con velocidades de hasta 76 m/s en el primer minuto, para finalmente culminar su recorrido con una velocidad promedio de 1 m/s. La zona de peligro moderado cubre aproximadamente 12.6 km^2 del distrito

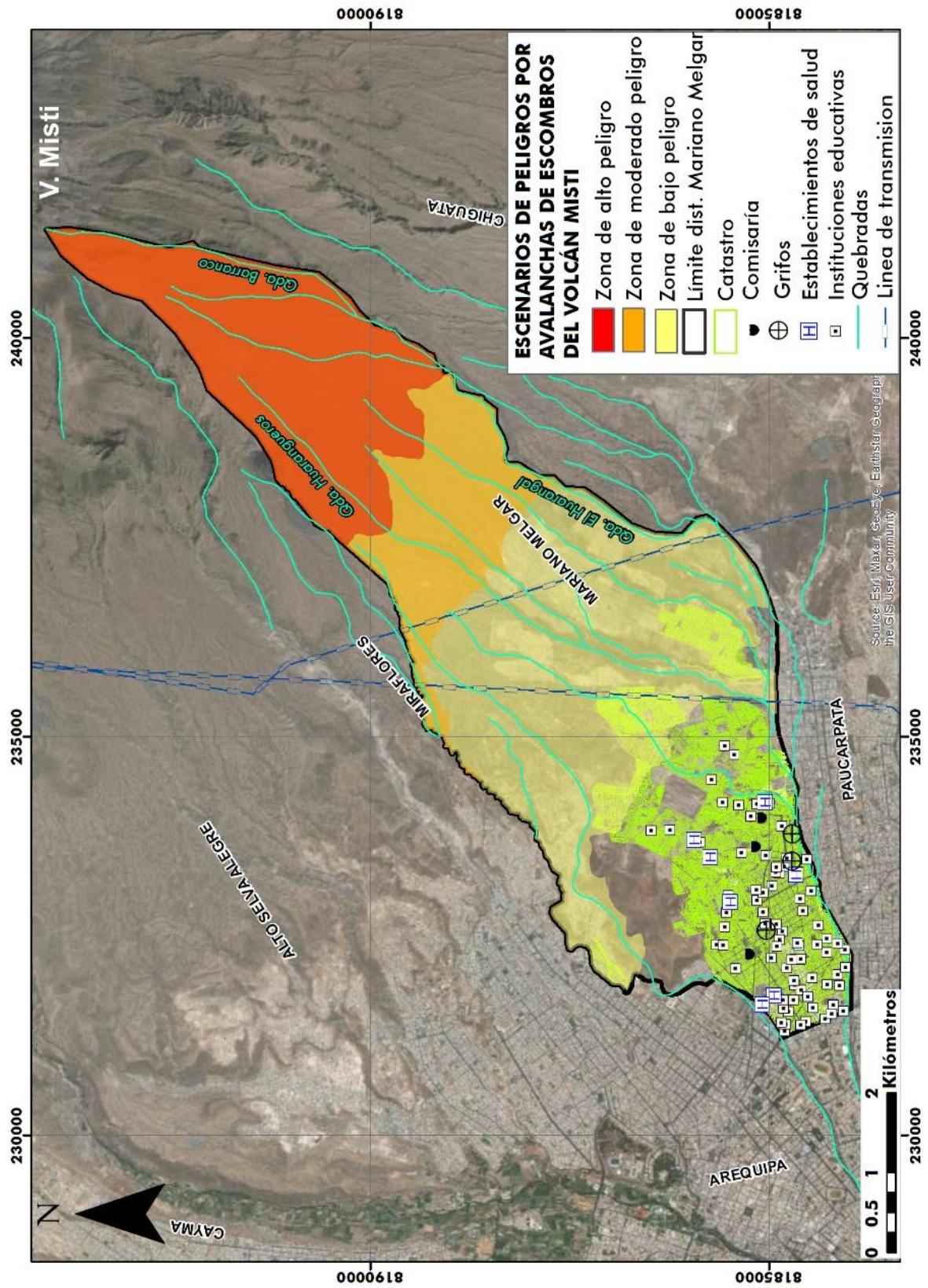


Figura 9.- Escenarios de peligro por avalancha de escombros del volcán Misti en el distrito de Mariano Melgar.

(un poco menos del 50 % del área total), pero aún sin llegar al límite urbano.

Es importante considerar que cerca del límite de avance de la avalancha de escombros, existen áreas delimitadas, posiblemente para venta de lotes y futura ocupación. En este caso, es necesario considerar estos resultados y no consolidar la ocupación, por cuanto la atención de una emergencia de origen volcánico podría ser bastante complicada.

- **Zona de peligro bajo** (zona de color amarilla): La avalancha se desplazaría, desde a la cima del volcán hasta distancias entre 6 a 15 km en un tiempo de aproximadamente 1 hora y 15 minutos con velocidades máximas de hasta 80 m/s en el primer minuto, para finalmente terminar su recorrido con una velocidad promedio de 1.5 m/s. El área afectada en este escenario es de $\sim 26.1 \text{ km}^2$; por lo tanto, serían afectados los sectores noreste y noroeste del distrito de Mariano Melgar. Es importante considerar que tipo de escenario eruptivo no es ajeno al volcán Misti, por cuanto ya ocurrió hace 2050 años y podría volver a presentarse en una próxima reactivación; por lo tanto, se debe evitar el crecimiento poblacional hacia el volcán Misti a fin de reducir el riesgo del distrito.

4.2.- Escenarios de peligro por flujos de lava

Los resultados obtenidos han sido clasificados en escenarios de alto, moderado y bajo peligro, aun considerando que los flujos de lava no afectarían al distrito de Mariano Melgar debido a que las lavas emitidas por el Misti son viscosas y por lo tanto, su recorrido es predecible y además, recorren distancias cortas (Figura 10).

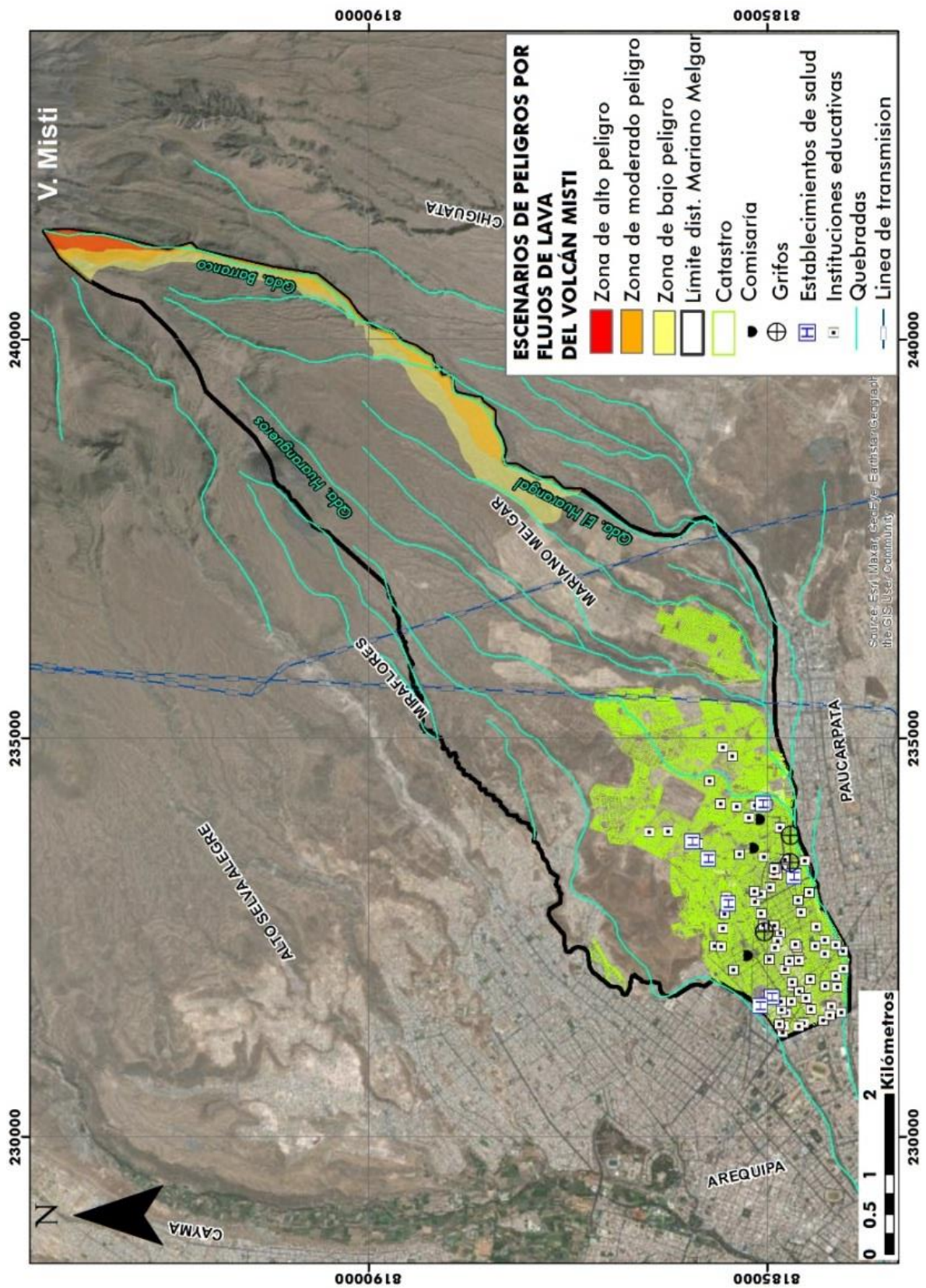


Figura 10.- Escenarios de peligro por flujos de lava del volcán Misti en el distrito de Mariano Melgar.

- **Zona de peligro alto** (zona de color rojo): En este escenario, las lavas se desplazarían, desde la cima del volcán hasta distancias entre 1 a 5 km en un tiempo de 19 minutos con una velocidad máxima de 23 m/s. La distancia recorrida por el flujo de lava, es similar a la alcanzada durante erupciones pasadas, por ejemplo, durante del edificio "Misti 3" (Thouret et al., 2001). El área crítica alcanzaría los $\sim 0.2 \text{ km}^2$ sin afectar al área urbana.
- **Zona de peligro moderado** (zona color naranja): Los flujos de lava recorrerían, desde la cima del volcán una distancia de 3 a 9 km en un tiempo de 23 minutos con una velocidad máxima de 36 m/s. El mayor desplazamiento de flujos de lava llegarían al sector suroeste por la quebrada Barranco, ocupando el sector noreste del distrito de Mariano Melgar. El área afectada en el distrito es de $\sim 1.1 \text{ km}^2$, pero no corresponde a área urbanizada.
- **Zona de peligro bajo** (zona de color amarillo): En este escenario, los flujos de lava se desplazarían, desde la cima del volcán hasta distancias de 4 a 10 km en un tiempo de aproximadamente 28 minutos con velocidades máximas de hasta 43 m/s. El flujo cubriría parte de la zona este del distrito de Mariano Melgar sobre un área de $\sim 2.4 \text{ km}^2$. En este, los flujos de lava no afectarían a la población emplazada en la actualidad, pero es una zona crítica porque la expansión urbana en los últimos años tiende a crecer hacia ese sector, lo cual sería muy complicado al momento de ocurrir este fenómeno por la logística que involucra la atención de una emergencia volcánica.

4.3.- Escenarios de peligro por flujos piroclásticos

De igual manera que los peligros volcánicos anteriores, los resultados obtenidos para cada escenario han sido clasificados en alto, moderado y bajo peligro, siendo sus características las siguientes (Figura 11):

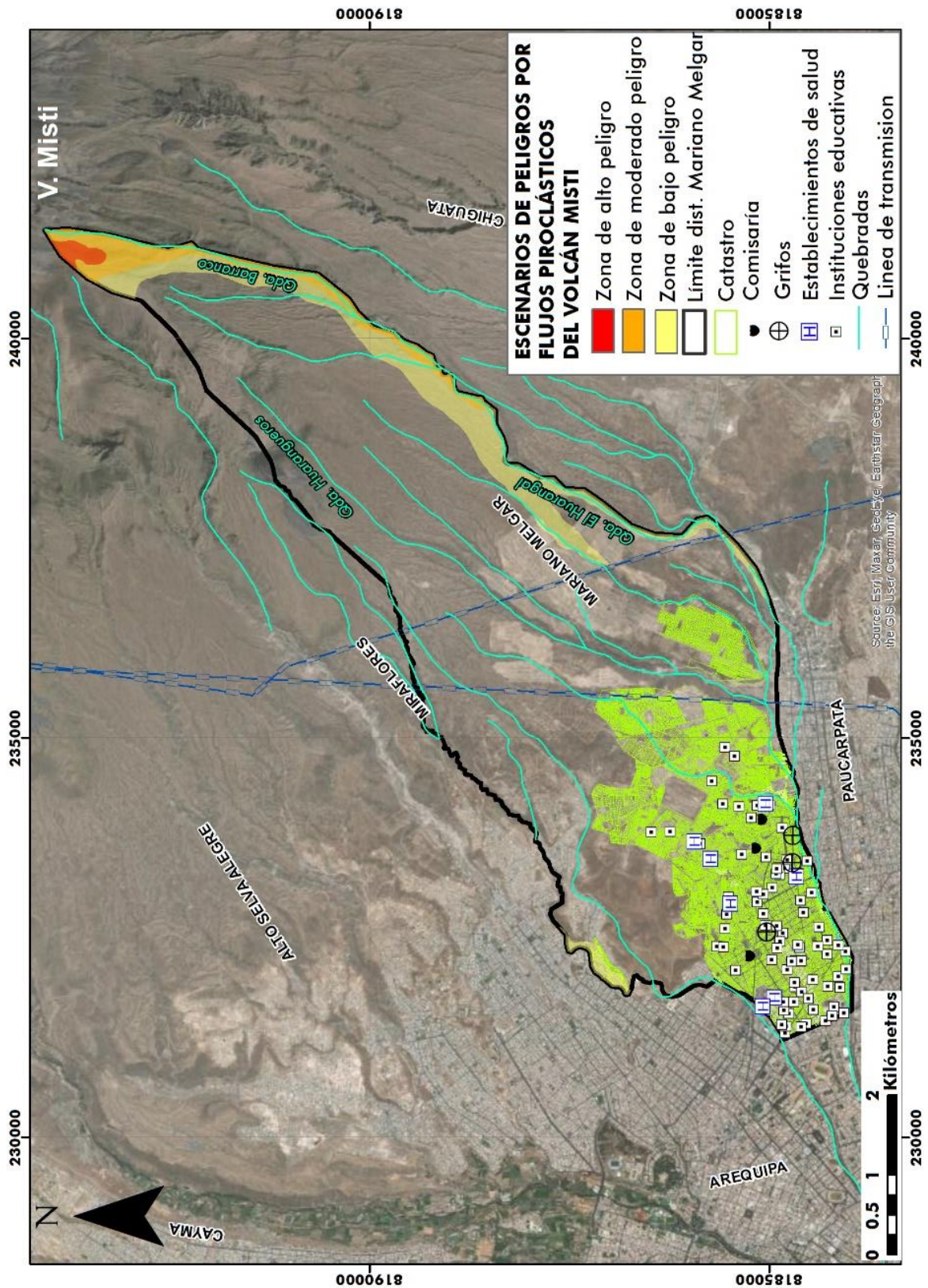


Figura 11.- Escenarios de peligro por flujos piroclásticos del volcán Misti en el distrito de Mariano Melgar.

- **Zona de peligro alto** (zona de color rojo): Los flujos piroclásticos se desplazarían, desde la cima del volcán hasta distancias de 2 a 4.2 km en un tiempo de aproximadamente 75 segundos con una velocidad máxima de 41 m/s. El área afectada ocupa un área de $\sim 0.1 \text{ km}^2$ y no afectaría población ni viviendas.
- **Zona de peligro moderado** (zona de color naranja): Los flujos piroclásticos recorrerían, desde la cima del volcán hasta distancias de 4 a 11.5 km en un tiempo de aproximadamente 6 minutos con una velocidad máxima de 50 m/s. La zona de moderado peligro ocupa un área de $\sim 1 \text{ km}^2$ del distrito y tampoco llegaría hasta el límite urbano actual.
- **Zona de peligro bajo** (zona de color amarillo): Los flujos piroclásticos se desplazarían, desde la cima del volcán hasta distancias de 4 a 17.3 km en un tiempo de aproximadamente 12 minutos con velocidades máximas de hasta 51 m/s. El área afectada por el peligro de flujos piroclásticos ocupa $\sim 3.4 \text{ km}^2$ y sería menor que el obtenido para las avalanchas de escombros. Según el escenario obtenido, el flujo se desplazaría por la quebrada Barranco y cubriría parte del área este de Mariano Melgar. De ocurrir este fenómeno en este momento, no afectaría a la población; sin embargo, es considerado como un escenario crítico porque la expansión urbana en los últimos años tiende a crecer justamente hacia la zona este del distrito.

5.- GESTIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

La experiencia en emergencias volcánicas ha mostrado que es sumamente difícil mantener una percepción equilibrada del riesgo volcánico y que el nivel de conciencia depende fundamentalmente del tiempo transcurrido desde la última erupción devastadora en la misma región (UNESCO, 1987). Para el caso del volcán Misti, la última erupción de gran magnitud ocurrió hace 2050 años, siendo poco probable que haya habido población circundante. Recientemente, en el siglo XV, el volcán Misti presentó una erupción moderada tipo vulcaniana, la cual ocasionó la destrucción de algunos poblados aledaños, así como la huida de los indígenas locales hacia la región Cusco.

La erupción del siglo XV habría dejado como prueba los depósitos de lahares encontrados a lo largo de varias quebradas que descienden del volcán Misti y que hoy en día ya se encuentran poblados. Asimismo, se puede encontrar dentro de estos depósitos restos de cerámica que evidencia el desastre acaecido en aquella época; sin embargo, la transmisión verbal es mínima o nula, por lo que la percepción del riesgo volcánico en la población de Arequipa pareciera inexistente. Hoy en día existe mucha población asentada en zonas de alto peligro volcánico, ya sea en los mismos cauces de las quebradas que descienden del cráter del volcán Misti o debido a la tendencia de crecimiento poblacional hacia el mismo edificio volcánico. (Figura 12).

Una herramienta para intentar revertir tal escenario, es la construcción de una buena base de datos que indique el nivel de percepción del riesgo volcánico del Misti de la población arequipeña. Para ello, es necesaria la aplicación de encuestas en la población conteniendo preguntas claves que involucre, por ejemplo, el conocimiento de la historia eruptiva del volcán, la disponibilidad y acceso por parte de la población a la información

sobre los peligros volcánicos y el riesgo existente, así como la percepción del riesgo volcánico por la población de Arequipa (Anexo1).



Figuras 12.- Parte superior: viviendas ubicadas sobre los depósitos de lahares históricos de la erupción del siglo XV del volcán Misti. Abajo: evidencias de restos de cerámicas de la época pertenecientes a las civilizaciones afectadas por esta erupción.

5.1.- Percepción del riesgo volcánico

Es importante entender que el riesgo es un fenómeno social y existen múltiples razones por la cuales un individuo o una comunidad no toma acciones a pesar que reciben información sobre los posibles peligros que pueda representar un riesgo. En nuestro país la falta de una cultura de

prevención basada en estrategias sólidas y confianza entre actores se hace cada vez de mayor necesidad. En ese sentido, se debe buscar comprender el accionar de la comunidad no acatando las disposiciones dadas por las autoridades para proceder, ante la ocurrencia de una erupción volcánica, con la evacuación o la reubicación que podrían llevar a modificar sus prácticas cotidianas. Una respuesta real por parte de la población, por ejemplo, es su respuesta del genuino temor de perder lo que han logrado y construido en el tiempo.

En este escenario, las instituciones públicas y privadas deben esforzarse por elaborar campañas de comunicación bien direccionadas que consideren el contexto del territorio, los conocimientos y las necesidades de información de los actores locales con la finalidad de recuperar la confianza de las comunidades y así mejorar todo el proceso sistémico de la gestión del riesgo de desastres.

5.2.- Medidas de prevención y reducción de riesgos

Las medidas de prevención y reducción del riesgo se reconocen como aquellas que se realizan con anterioridad a la ocurrencia de un peligro que pueda generar desastres y así, lograr disminuir sus efectos. La prevención y reducción del riesgo es una acción que se realiza antes de ocurrir el peligro y requiere de la participación de todos los actores del SINAGERD, cada uno de ellos deben asumir el rol que les corresponde, solo así se lograra el éxito esperado.

Una de las medidas importantes para la población que habita en áreas de peligro volcánico es la educación y sensibilización frente a la ocurrencia de una reactivación del volcán. Es necesario conocer el tipo de erupción que ha presentado anteriormente, así como los escenarios eruptivos para considerar ello en los planes de emergencia, información ya

elaborada por las instituciones de investigación y disponibles en formatos impresos y digitales a disposición de las autoridades y población.

Cuando la población se encuentra capacitada son mucho más efectivas las acciones de prevención, mitigación y atención de emergencias; sin embargo, estas capacitaciones deben ser realizadas por los funcionarios municipales acompañados de los profesionales de las instituciones de investigación como el Instituto Geofísico del Perú. Este trabajo conjunto permitirá contar con información verídica y confiable que pueda ayudar a construir y entender estos procesos.

Por otro lado, es importante entender que los centros responsables del monitoreo volcánico en el Perú, como el Centro Vulcanológico Nacional del Instituto Geofísico del Perú, emitirá reportes o información con anterioridad al desarrollo del proceso eruptivo de un volcán, y por ello la práctica de simulacros de evacuación es un ejercicio eficiente que debe ejecutarse con regularidad. Por ejemplo, para el distrito de Mariano Melgar con una población de aproximadamente 52144 habitantes, se debe considerar el número de vehículos necesarios para trasladar a la población en riesgo a zonas seguras, además de la logística que esta actividad demanda.

La información contenida en este informe, permite disponer de insumos técnico – científicos para realizar la tarea de prevención y con ella planificar otras que permitan en el tiempo reducir menormente el riesgo de la población ante una posible erupción del volcán Misti. Los escenarios contruidos para peligros como avalanchas de escombros, flujos de lava y flujos piroclásticos deben ayudar a proyectar la ejecución de proyectos para mejorar el crecimiento urbano y construcción de obras vitales que permitan el crecimiento sostenible y seguro del distrito.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El distrito de Mariano Melgar es vulnerable ante la ocurrencia de avalanchas de escombros del volcán Misti, por encontrar población habitando áreas por donde discurrirían estos flujos. El sector noreste del área urbana (habitada y en proyecto de ampliación para viviendas) sería afectada en escenarios de moderado y bajo peligro, el cual se incrementaría si la población sigue avanzando hacia la estructura volcánica.
- Actualmente, los flujos de lava y piroclásticos tienen menor probabilidad de afectar el distrito ante una eventual erupción, pero se debe considerar que la población está ocupando áreas críticas. Por tal motivo, se exhorta a las autoridades realizar acciones para detener la expansión urbana hacia la estructura volcánica.
- El presente informe constituye un aporte importante para la elaboración de planes de desarrollo y planificación urbana; además de proveer insumos para los planes de prevención y gestión del riesgo.
- Se recomienda a las autoridades considerar, dentro de sus actividades la educación y sensibilización de la población sobre los peligros volcánicos a fin propiciar a futuro una mejor acción para la atención de una emergencia volcánica que pudiera presentarse ante una posible erupción del volcán Misti.
- Se recomienda a las autoridades y población mantenerse informadas en todo momento sobre el comportamiento dinámico del volcán Misti mediante la información emitida por el IGP a través del Centro vulcanológico Nacional (<http://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>).

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a las autoridades de la Municipalidad Distrital de Mariano Melgar por su esfuerzo de proporcionar para la ejecución de este estudio su catastro actualizado al año 2019; así como a la población que participo en las primeras encuestas realizadas como plan piloto del proyecto “Dinámica de los productos volcánicos del Misti y análisis de la exposición y afectación en la población de la ciudad de Arequipa”

BIBLIOGRAFÍA

- Cobeñas, G. (2009) – Étude des produits de l'éruption plinienne du Misti, Pérou (ca. 2050 ans BP). Master 2 Recherche, Université Blaise Pascal-Clermont Ferrand I, 51 p.
- Cobeñas, G.; Thouret, J.-C.; Bonadonna, 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.
- 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., Labazuy P., Stinton A., Souriot T., Westen C.-V. (2005). Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Z. Geomorph. N. F.*, v. 140, p. 209-231.
- Galarza, J., Laverde C., Zuluaga I., Monsalve M. (2014). Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé (Uso de Tephra2, Titan2D, Lava PL y LaharZ). SGC. Informe Interno.
- Gertisser, Ralf; Charbonnier, Sylvain J.; Keller, Jörg; and Quidelleur, Xavier, "The Geological Evolution of Merapi Volcano, Central Java, Indonesia" (2012). School of Geosciences Faculty and Staff Publications. 603.

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.

Hayashi, J.N. & Self, S. (1992) - A comparison of pyroclastic flow and debris avalanche mobility. *Journal of Geophysical Research*, 97(B6): 9063-9071.

INEI (2018). Perú: Crecimiento y distribución de la población total, 2017. Población censada más población omitida. Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.

Kelfoun, K. & T.H. Druitt, 2005, Numerical modelling of the emplacement of the 7500 BP Socompa rock avalanche, Chile. *J. Geophys. Res.*, B12202, doi: 10.1029/2005JB003758, 2005.

Kelfoun, K., Vallejo, S. (2016) *VolcFlow* capabilities and potential development for the simulation of lava. *The Geological Society, London, Special Publications, Geological Society of London*, 426 (1), pp.337-343.

Kelfoun, K. (2011), Suitability of simple rheological laws for the numerical simulation of dense pyroclastic flows and long-runout volcanic avalanches, *J. Geophys. Res., Solid Earth*, doi:10.1029/ 2010JB007622.

Ley de creación del distrito de Mariano Melgar LEY 15594 (1965).
Recuperado de:
[https://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/10486/PLAN_10486_Ley_de_Creaci%C3%B3n_del_Distrito_2011.pdf](https://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/10486/PLAN_10486_Ley_de_Creacion_del_Distrito_2011.pdf)

- Macedo, L. (1994) - Peligro volcánico potencial del Misti. Tesis Ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 112 p.
- Macedo, L. (2012). Preparación ante emergencias de origen volcánico: una guía para la reducción del riesgo volcánico en el Perú. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 49, 125 p.
- Mariño, J.; Rivera, M.; Jean-Claude Thouret & Macedo, L. (2016). Geología y mapa de peligros del volcán Misti, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 60, 170 p., 2 mapas.
- Murase T. & McBirney AR (1973) Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures. Bull Geol Soc Am 84:3563-3592.
- Patra, A., Bauer A., Nichita, C., Pitman, E.B., Sheridan, M. F. Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Namikawa, L. And Renschler, C. (2005). Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 139:1–21.
- Pitman, E.B., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M.F., Bursik, M.I. (2003). Computing debris flow and landslides. Physics of Fluids 15, 3638–3646.
- Stinton, A. J., Sheridan, M.F., Patra, A., Dalbey, K., & Namikawa, L.M. (2004). Integrating variable bed friction into TITAN2D mass-flow model: application to the Little Tahoma Peak avalanches. Washington. Acta Vulcanol. 16, 153-163.
- Tepley, F.J., Salas, G., and de Silva, S., 2007, Recharge as an eruption trigger revealed at El Misti, southern Peru [abs.]: Eos (Transactions, American Geophysical Union), v. 88, no. 52, abstract v41D-0813.

- Tepley, F.J., III, de Silva, S.L., and Salas, G., 2008, Unraveling complex volcanic processes using amphibole: A case study from El Misti: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 72, no. 12, p. A941.
- 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.
- Vargas Franco, R., Thouret, J.-C., Delaite, G., van Westen, C., Sheridan, M.F., Siebe, C., Mariño, J., Souriot, T., Stinton, A. (2010) Mapping and assessing volcanic hazards and risks in the city of Arequipa, Peru, based on GIS techniques. In: G Gropelli & L. Viereck-Goette (eds) *Stratigraphy and geology of volcanic areas. Geol Soc Amer Special Paper 464*: 265–280, doi: 10.1130/2010.2464 (13).

ANEXO

Encuesta para percepción del riesgo volcánico

ENCUESTA

PERCEPCIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN LA POBLACIÓN DE LA CIUDAD DE AREQUIPA

PARTICIPANTES

COLABORADORES



El IGP invita cordialmente a participar, a la población de la ciudad de Arequipa, de la siguiente encuesta virtual.

Puede hacer clic en el siguiente enlace o escanear el código QR.

<https://bit.ly/33koP0I>



IGP | ENCUESTA

¿CONOCES EL RIESGO QUE REPRESENTA EL VOLCÁN MISTI?

Completa nuestra encuesta que nos ayudará a **SALVAR VIDAS.**



