



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



EXPOSICIÓN DEL DISTRITO DE MIRAFLORES A PELIGROS VOLCÁNICOS Y SU CONTRIBUCIÓN A LA GRD (Región Arequipa)

Informe Técnico N°046-2024/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Diciembre, 2024

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Exposición del distrito de Miraflores a peligros volcánicos y su contribución a la GRD
(Región Arequipa)

Autores

John Cruz
Lady Quispe
Marquinho Cabrera
Ivonne Lazarte
Marco Rivera

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

**EXPOSICIÓN DEL DISTRITO DE MIRAFLORES A PELIGROS
VOLCÁNICOS Y SU CONTRIBUCIÓN A LA GRD
(Región Arequipa)**

Arequipa – Perú
Diciembre, 2024

RESUMEN

Basados en simulaciones numéricas, datos de campo, imágenes satelitales, así como estudios de erupciones pasadas del Volcán Misti se han obtenido mapas de peligro por erupción que puedan afectar al distrito de Miraflores. En el caso de los lahares que puedan descender por las quebradas San Lázaro, Venezuela y tributarias, se han identificado 636 viviendas expuestas en zonas de peligro alto y un total de 7,063 habitantes expuestos en zonas de peligro bajo. En caso del descenso de flujos piroclásticos se han identificado 31 sectores ubicados en zona de peligro bajo con una población de 27,083 personas; además se encuentran expuestos 49 centros educativos, 2 centros de salud y 11 puentes. En caso de descenso de avalancha de escombros, se han identificado un total de 14 sectores ubicados en zona de peligro moderado con aproximadamente 5,878 habitantes y zonas de peligro bajo con 31 sectores expuestos y con alrededor de 20,085 habitantes. En caso que el Misti presente erupciones vulcanianas y plinianas puede generar caídas de ceniza que cubriría todo el distrito de Miraflores. Finalmente, dado la morfología agreste del Misti, los flujos de lava no tienen alcance a las zonas urbanas del distrito de Miraflores.

En caso que el Misti presente una erupción de tipo subpliniana a pliniana (IEV >2), que considera importante la evacuación de 9 sectores en nueve etapas de evacuación. Así mismo, se identificaron 9 puntos de concentración como lugares de espera transitoria para el traslado de la población. También se identificó vías de rápido recorrido para la evacuación y la sugerencia de una zona de albergue alejada de la ciudad de Arequipa.

CONTENIDO

RESUMEN

- 1.- INTRODUCCIÓN
- 2.- DISTRITO DE MIRAFLORES
 - 2.1.- Ubicación
 - 2.2.- Clima
 - 2.3.- Quebradas o torrenteras
 - 2.4.- Condiciones sociales
 - 2.5.- Viviendas
- 3.- CONTEXTO GEOLÓGICO
 - 3.1.- Geomorfología
 - 3.2.- Geología
- 4.- PELIGROS VOLCÁNICOS
 - 4.1.- Flujos de lahares
 - 4.2.- Flujos piroclásticos
 - 4.3.- Avalanchas de escombros
 - 4.4.- Flujos de lava
 - 4.5.- Caída de tefras
- 5.- ESCENARIOS ERUPTIVOS
 - 5.1.- Erupción vulcaniana con IEV 1-2
 - 5.2.- Erupción subpliniana a pliniana con IEV 3-5
 - 5.3.- Colapso de flanco y emplazamiento de avalanchas de escombros
- 6.- MODELAMIENTO NUMÉRICO DE PELIGROS VOLCÁNICOS
 - 6.1.- Lahares
 - 6.2.- Flujos piroclásticos
 - 6.3.- Avalancha de escombros
 - 6.4.- Flujos de lava
 - 6.5.- Caída de cenizas

7.- MAPAS DE PELIGRO Y NIVEL DE EXPOSICIÓN

- 7.1.- Descenso de lahares
- 7.2.- Descenso de Flujos piroclásticos
- 7.3.- Avalancha de escombros
- 7.4.- Flujos de lava
- 7.5.- Caída de ceniza

8.- APORTES A UN PLAN DE CONTINGENCIA

- 8.1.- Evacuación por peligros volcánicos
- 8.2.- Etapas de evacuación
- 8.3.- Puntos de concentración (PC)
- 8.4.- Vías de evacuación
- 8.5.- Zona de albergue

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

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 Zona Volcánica Central (ZVC) 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 explosivas importantes de tipo pliniana, como la ocurrida hace 2 050 años AP. (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011), pero también presentó erupciones vulcanianas moderadas, como la ocurrida entre los años 1440 a 1470 que diezmó la población de Arequipa (Macedo, 1994; Thouret et al., 2001). Actualmente, el volcán Misti presenta actividad fumarólica esporádica.

La exposición de la ciudad de Arequipa frente al peligro volcánico del Misti se incrementa diariamente, debido a que la ciudad crece en dirección del Misti, acercándose cada vez más a las laderas de este volcán. Así mismo, varias viviendas en los distritos de Alto Selva Alegre, Mariano Melgar, Miraflores, Chiguata y Paucarpata se han edificado dentro del cauce de las quebradas que se prolongan del volcán Misti, como las quebradas San Lázaro, Pastores, Huarangal, Agua Salada y El Chical. Este hecho amerita realizar, en el marco de la gestión del riesgo de desastres, un estudio detallado sobre las zonas que se verían afectadas en caso de una erupción del Misti o la ocurrencia de lluvias excepcionales.

El presente estudio tiene como propósito evaluar el grado de exposición del distrito miraflorentino ante la ocurrencia de una erupción del Misti haciendo uso de datos de campo sobre depósitos volcánicos del Misti, imágenes satelitales, imágenes de dron, e información bibliográfica de eventos eruptivos anteriores del Misti. Se realizaron simulaciones numéricas para la obtención de mapas de peligros volcánicos y se realizó también el análisis de la exposición de la población de Miraflores ubicadas en zonas de alto, moderado y bajo peligro.

Finalmente, se plantea un escenario probable que implique la evacuación de la población para el diseño de etapas de evacuación, puntos de concentración, vías de evacuación y la sugerencia de una zona de albergue. Los trabajos se realizaron bajo la observación de las autoridades en Gestión del Riesgo de desastres de la municipalidad de Miraflores.

2. DISTRITO DE MIRAFLORES

2.1 Ubicación

El distrito de Miraflores se encuentra ubicado en la ladera suroeste del volcán Misti, el cual colinda por el norte con las estribaciones del volcán Misti, por el sur con la capital de la provincia de Arequipa, por el este con el distrito de Mariano Melgar y por el oeste con el distrito de Alto Selva Alegre (Figura 1). El distrito se halla conectado al sistema vial de Arequipa Metropolitana. La Plaza Principal (Plaza Mayta Cápac), se encuentra a 3 km del centro de la ciudad de Arequipa. Las calles y avenidas están asfaltadas desde la parte baja del distrito; siendo la Av. Progreso la de mayor importancia.

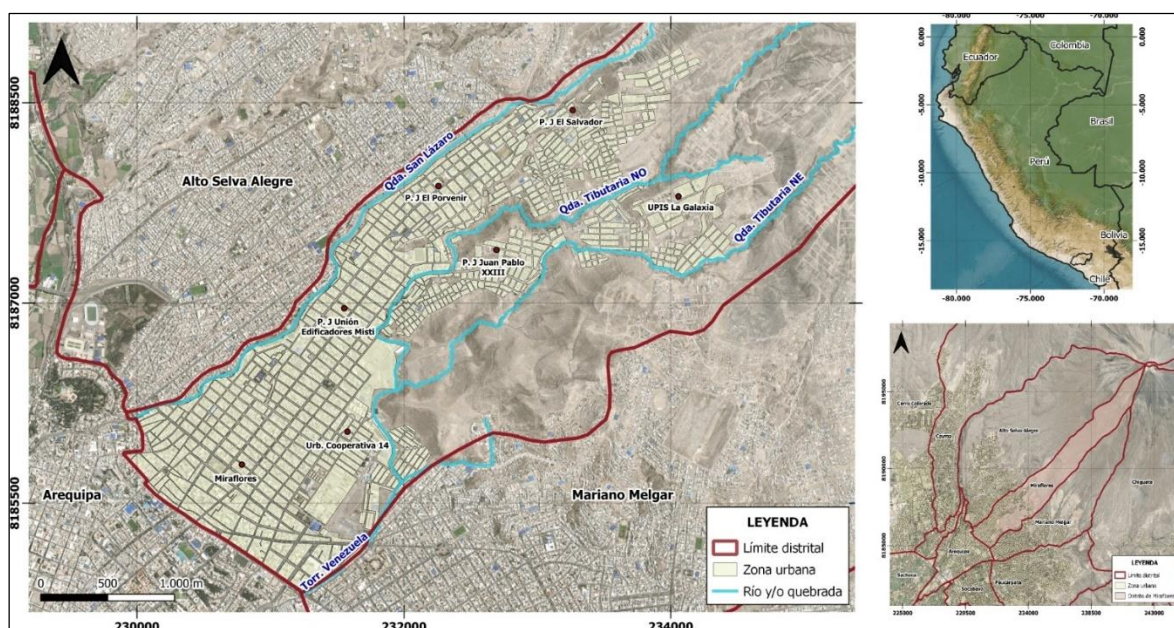


Figura 1.- Mapa de ubicación geopolítica, y principales quebradas y límites del distrito de Miraflores.

2.2 Clima

El distrito de Miraflores presenta un clima predominantemente seco especialmente en temporada de invierno, otoño y primavera. Por su condición térmica presenta también un clima templado. El periodo de lluvias por lo

general comienza en enero y se prolonga hasta marzo. El mes con más lluvia es febrero con un promedio de 19 mm (Figura 2) en los últimos 5 años.

Otro agente climático de gran importancia para el análisis de peligros volcánicos (caída de cenizas), es la velocidad y dirección de los vientos que durante el año permanece en un margen de 0.8 km/h de 10.1 km/h. El mes con mayor velocidad de viento es noviembre con un promedio de 10.8 km/h. De acuerdo a su dirección, el viento que viene del norte permanece desde mediados de abril a octubre (6 meses) y el viento que viene del sur los demás meses del año.

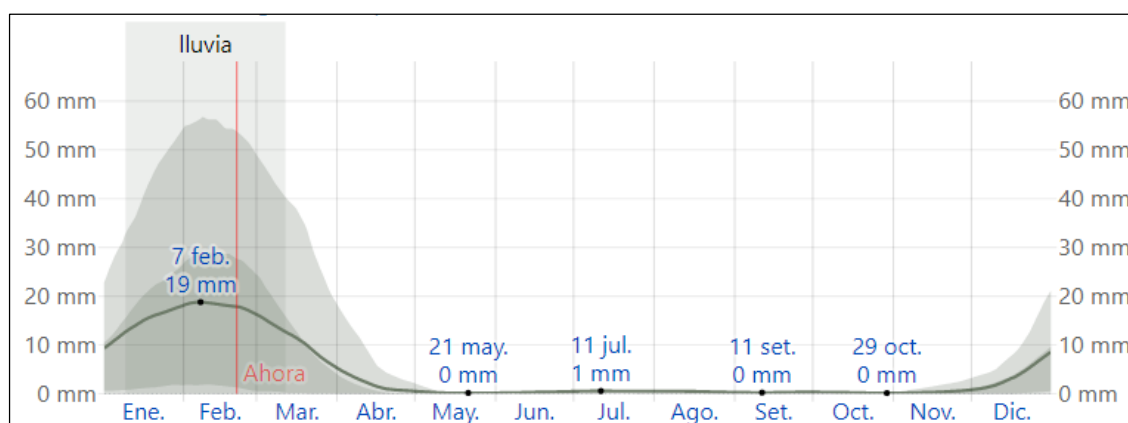


Figura 2. Lluvia promedio de la ciudad Arequipa. Fuente: Weatherspark.

2.3 Quebradas o torrenteras

El distrito de Miraflores presenta dos quebradas representativas:

San Lázaro y Venezuela, esta última tiene tres quebradas tributarias. Las quebradas cruzan el distrito en una dirección aproximada de NE-SO hacia el cercado de Arequipa y finalmente se unen al río Chili (Figura 3). Eventualmente, durante el periodo de lluvias estas quebradas son activadas por donde discurren lahares o flujos de lodo volcánico. Las características de estas quebradas son descritas a continuación:

Quebrada San Lázaro: Se inicia en lo alto del flanco SO del volcán Misti (3800 m s.n.m.), cuyo lecho está conformado por depósitos de lava y avalancha de escombros. Presenta una extensión próxima a los 4.5 km y en su trayecto divide los distritos de Miraflores y Selva Alegre, uniéndose al río Chili en el sector norte del cercado de Arequipa. Se caracteriza por ser una quebrada seca, pero eventualmente en periodos fluviales se activa transportando lahares. La quebrada San Lázaro es la más representativa del distrito por su ancho y longitud.

Torrentera Venezuela: Tradicionalmente conocida como la tercera torrentera de Arequipa, se origina en las depresiones topográficas occidentales del cerro "El Botadero". A partir de su origen hasta el Cuartel Mariano Bustamante presenta un rumbo NO-SE para luego desembocar en el río Chili a 90 m aguas arriba del puente San Isidro, en donde toma una dirección Noreste-Suroeste. Este cambio en la dirección de su cauce es debido a la acción antrópica producida por el crecimiento de la ciudad que ha invadido su cauce (Tavera, 2014).

2.4 Condiciones sociales

El distrito de Miraflores presenta una población de más de 60,589 habitantes, del cual, el 51.8% son mujeres y el 48.16% son hombres (INEI, 2018). Según la clasificación por grupo etario (Tabla 1) la población conformada por menores de 1 año, niños y adolescentes, representa el 30.59%; los jóvenes y adultos el 56.59% y los adultos mayores el 12.82%; siendo la población más vulnerable el 43.41% (niños, adolescentes y adulto mayores) del total de la población.

Tabla 1. Rango de edad de la población del distrito de Miraflores. Fuente: Censo de Población y Vivienda 2017 – INEI.

Rango de edad	Número de Población
Menores de 1 año	840
Niños de 1 a 9 años	8,145
Adolescentes de 10 a 19 años	9,550
Jóvenes de 20 a 29 años	10,852
Adultos de 30 a 60 años	23,436
Adultos mayores de 60 y más años	7,766

2.5 Viviendas

El distrito de Miraflores cuenta con 15,041 viviendas ocupadas por 59,596 pobladores (Tabla 2), de los cuales el 87.35% de ocupantes viven en casas independientes, el 8.92% en departamentos, el 1.78% en quintas y el 1.95% en casa de vecindad, así como en viviendas improvisadas y no aptas para ser ocupadas por humanos. De la población total censada 1,164 personas viven en condiciones inseguras por el tipo de vivienda que ocupan.

Tabla 2. Tipo de viviendas del distrito de Miraflores. Fuente: INEI (2018).

Tipo de vivienda	Cantidad de viviendas	Cantidad de ocupantes
Casa independiente	12,775	52,055
Departamento en edificio	1,671	5,314
Vivienda en quinta	259	1,063
Vivienda en casa de vecindad	320	1,107
Vivienda improvisada	2	8
Local no dest. para hab. humana	14	49

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Geomorfología

Los principales elementos geomorfológicos (Figura 3) identificados en del distrito de Miraflores son:

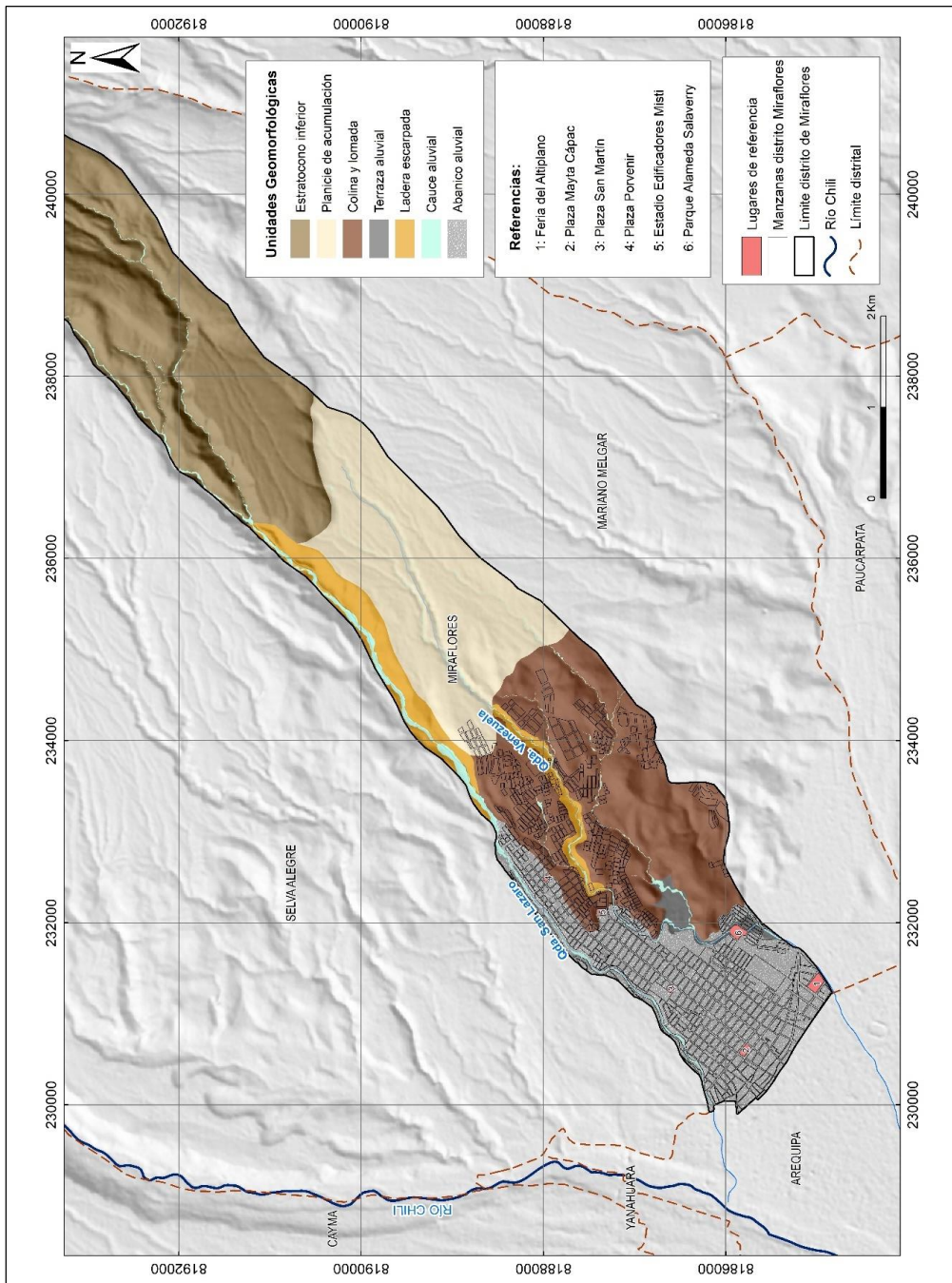


Figura 3. Mapa geomorfológico de la zona de estudio.

Abanico aluvial: Este tipo de morfología están ubicadas en la parte baja del distrito de Miraflores, presenta una pendiente inclinada (5° a 10°), están constituidas de material origen aluvial y proluvial. Sobre estos depósitos se encuentran asentados asentamientos humanos y urbanizaciones, como: Edificadores Misti, Cooperativa 14, Las Palmeras, Alameda Salaverry, Villa Militar, Santa Rita de Casia y Pedro Ruiz Gallo.

Cauce aluvial: Corresponde a los cursos de las quebradas, que sólo tiene caudales de agua durante los periodos de lluvia (enero-marzo).

Ladera escarpada: Corresponde a una zona con pendiente pronunciada, ubicada por los sectores de Estrellas del Misti, Los Sauces, Los Girasoles, Héroes del Pacifico, UPIS La Galaxia y Juan Pablo XXIII localizadas en la parte media y alta de las quebradas San Lázaro y Venezuela. Está constituido de depósitos volcanoclásticos, avalancha de escombros y lavas. En el área de estudio las laderas presentan una pendiente moderada a fuerte (20° a 40°).

Terraza aluvial: Las terrazas aluviales constituyen pequeñas plataformas de materiales no consolidados acumulados por acción de los flujos hídricos. Estas terrazas presentan pendientes suaves y se ubican adyacentes al lecho de los cauces (Figura 4).



Figura 4. Se observa colinas con una fuerte pendiente; así como una terraza aluvial y el cauce seco de quebrada Venezuela, por inmediaciones de Urb. Alameda Salaverry.

Colina: Corresponden a superficies topográficas onduladas, conformadas por depósitos volcánicos: flujos de lava, depósitos de flujos piroclásticos y otros. Poseen pendientes fuertes a muy fuertes de (25° a 45°). Algunas colinas están siendo pobladas.

Planicie de inundación: Corresponde a una superficie de baja pendiente entre 5° y 15°, conformada por acumulación de depósitos volcanoclásticos, surcada por quebradas. Este sector viene siendo urbanizado en la parte alta del distrito de Miraflores.

Estratocono inferior: Se caracteriza por presentar pendientes moderadas (entre 15° y 40°) y un sistema de drenaje radial, con quebradas de 10 a 50 m de profundidad.

3.2 Geología

Las rocas que afloran en el área de estudio están conformadas por depósitos de flujos piroclásticos, avalancha de escombros y lavas de edad Pleistocena (Figura 5), así como por depósitos de lahares del Holoceno y recientes. A continuación, se describen las unidades que existen en la zona de estudio:

Lavas: Corresponden a lavas de composición andesítica de color gris oscuro, masivos, que forman colinas. Estos se encuentran en el curso superior de la quebrada Venezuela, por inmediaciones de urbanización Salaverry (Figura 6), cooperativa 14 y Alto Misti. En algunos sectores sobre estas lavas se han construido viviendas.

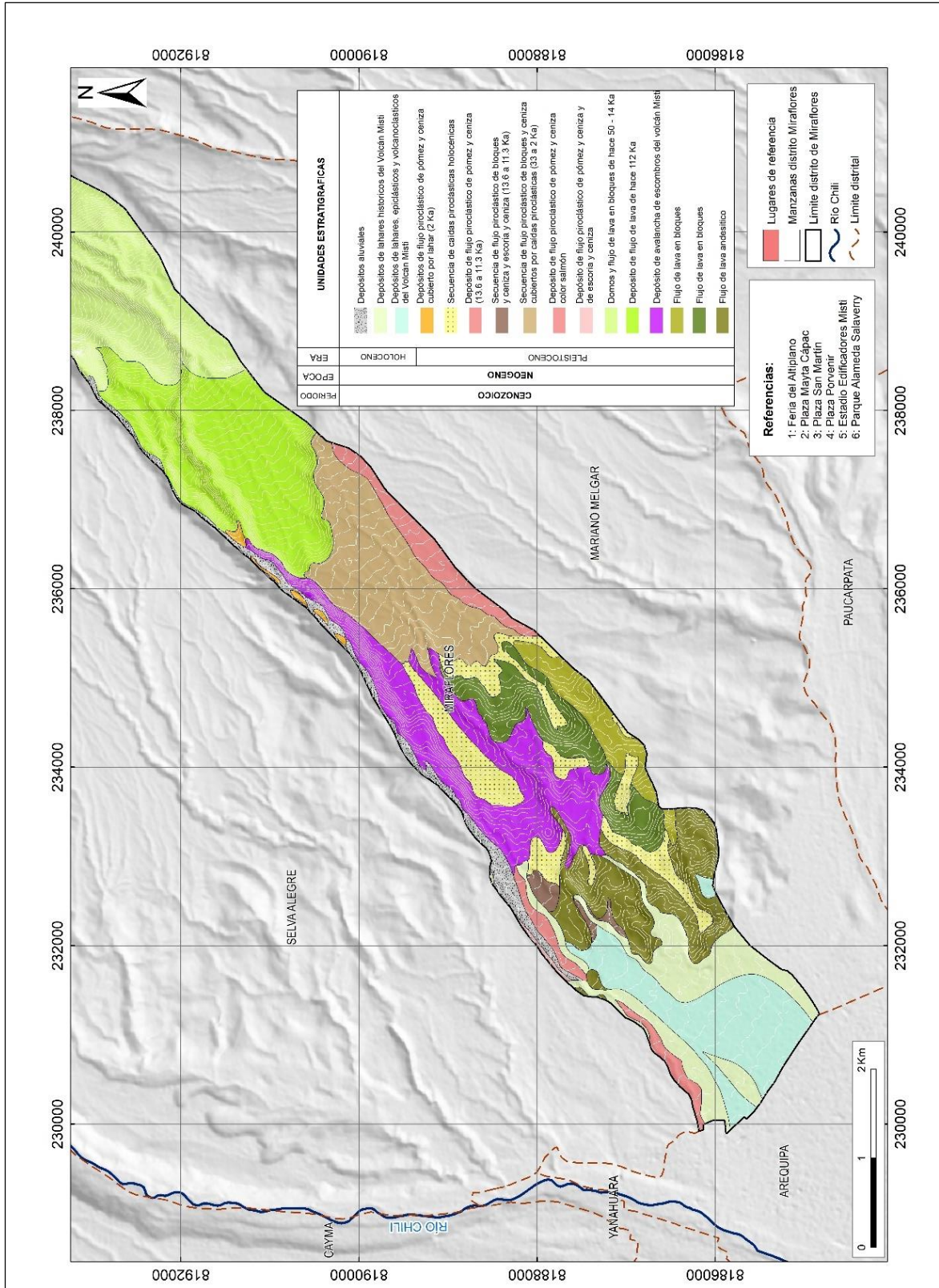


Figura 5. Mapa geológico de la zona de estudio, modificado de Mariño 2016.



Figura 6. Afloramiento de lava masiva por inmediaciones de la urbanización Salaverry.

Depósito de avalancha de escombros: Este depósito se encuentra en la parte alta del distrito de Miraflores, en forma de montículos o colinas, y están conformados por bloques lávicos fragmentados con tamaños decimétricos englobados dentro de una matriz limosa. Estas colinas están siendo pobladas (Figura 7). Actualmente, sobre estos depósitos se asientan los sectores AA. HH. El Mirador, Héroes del Pacífico, Señor de los Milagros y Los Girasoles.

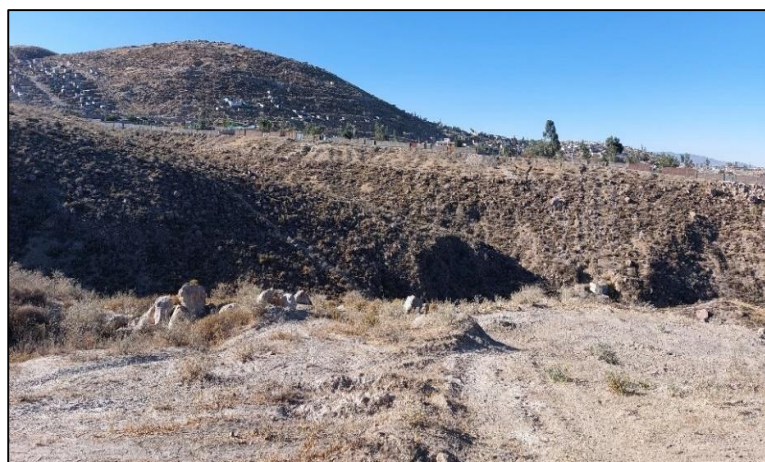


Figura 7. Avalancha de escombros en forma de montículos o colinas por inmediaciones del cementerio de Miraflores.

Depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza: Son depósitos que tienen un espesor de entre 2 a 5 m, y está constituido por pómez y una matriz de ceniza. Estos depósitos afloran por inmediaciones del AA. HH. Solidaridad, AA. HH. 14 de agosto, AA. HH. El Porvenir y AA. HH. San Hilarión.

Depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza: Son depósitos que tienen un espesor de hasta 5 m, son de color salmón y están constituidos por bloques densos de textura porfirítica y una matriz de ceniza, los bloques llegan a medir hasta 0.70 m de diámetro. Estos depósitos afloran por inmediaciones del AA. HH. El Porvenir y AA. HH. El Salvador.

Depósito de lahar del Holoceno: Conforman terrazas antiguas y abanicos extensos. Están compuestos por fragmentos heterométricos y heterogéneos (gravas, arenas, etc.) subredondeados (Figura 8).



Figura 8. Depósitos de lahares antiguos de unos 4 m de espesor.

Depósito de lahar histórico: Lo constituyen los materiales de los lechos de las quebradas. Están conformados por bloques y gravas subredondeados heterométricos con una matriz de arena y limo. Presentan espesores de hasta 0.40 m (Figura 9) y se encuentran por las inmediaciones de la Alameda Salaverry.



Figura 9. Depósitos de lahares constituidos por cantos y gravas.

4. PELIGROS VOLCÁNICOS

El volcán Misti podría presentar un proceso eruptivo vulcaniano o pliniano y peligros volcánicos asociados que podrían afectar el distrito de Miraflores como se detallan a continuación:

4.1 Flujos de lahares

Son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizados por el agua y que fluyen rápidamente (20-60 km/h) por valles y quebradas originados en los volcanes. Se generan en períodos de erupción o de tranquilidad volcánica (Tilling & Beate, 1993). El área afectada depende del volumen de agua y de materiales sueltos disponibles, así como de la pendiente y topografía. Normalmente destruyen todo a su paso, pueden alcanzar grandes distancias (>200 km) e incluso generar inundaciones cerca al cauce de ríos (Tilling & Beate, 1993). Según Thouret et al. (2001), poco después de la erupción de hace 2050 años B.P. del volcán Misti, se generaron lahares. Estos lahares han sido reconocidos al sur y SO del volcán Misti. El lahar es fácilmente identificable, ya que contiene un importante porcentaje de pómez bandeado. En la quebrada San Lázaro, Delaite et al. (2005) estimaron que posee por lo menos 9 km de largo, 4 m de espesor y aproximadamente 3.6×10^6 m³ de volumen (Mariño et al., 2016).

4.2 Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos son masas calientes (300°C a 800°C) conformados por una mezcla de ceniza, fragmentos de roca y gases. Estos flujos descienden por los flancos del volcán al ras de la superficie y a grandes velocidades comprendidas entre 100 y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Estos flujos destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Tilling & Beate, 1993). El volcán Misti ha presentado varias erupciones de tipo pliniano con IEV (Índice de

Explosividad Volcánica) comprendido entre 5 y 6 donde se han identificado depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza de gran volumen (47.3 ka), que afloran en las quebradas San Lázaro, Huarangal y el Chical, así como en la zona de Miguel Grau. Estos depósitos poseen entre 1 y 3 m de espesor a 17 km al sur y SO del cráter. Otro depósito rico en pómez de hace 40 000 años, aflora en la margen derecha del río Chili, cerca al santuario de Chapi, a 14 km al oeste del cráter (Mariño et al., 2016).

4.3 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros ocurren con poca frecuencia, pueden alcanzar decenas de kilómetros de distancia y se desplazan a gran velocidad (Glicken, 1996). Las avalanchas de escombros entierran y destruyen todo lo que encuentran a su paso. Adicionalmente, pueden generar lahares y crecientes a partir del desagüe de agua represada por la avalancha (Tilling & Beate, 1993). 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 (Mariño et al., 2016).

4.4 Flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida expulsadas por el cráter o fracturas en los flancos del volcán. Pueden fluir por el fondo de los valles y alcanzar varios kilómetros de distancia, pero raramente llegan a más de 8 km del centro de emisión (Francis, 1993). Los flujos de lava calcinan y destruyen todo a su paso, sin embargo, no representan un peligro violento para las personas debido a su baja velocidad (Tilling & Beate, 1993). 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 fueron entre 5 y 8 km (Mariño et al., 2016).

4.5 Caída de tefras

Las tefras están constituidas por fragmentos de roca y lava que han sido expulsadas hacia la atmósfera. Pueden alcanzar grandes distancias dependiendo de la dirección y la fuerza del viento (Tilling, 1989). Las tefras varían de tamaño, desde cenizas (64 μm) que pueden alcanzar diámetros de varios metros (Fisher, 1961). Estas partículas pueden causar problemas de salud en las personas, contaminar fuentes de agua, colapsar los techos por el peso acumulado, afectar cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, entre otros (Tilling & Beate, 1993). En el volcán Misti se han identificado varios depósitos de caída de ceniza, los cuales han sido asociados a erupciones vulcanianas, debido a su limitado volumen. Un depósito de caída de ceniza de 4 cm de espesor aflora a 9 km del cráter y ha sido datado en 1290 ± 100 años B.P. (Thouret et al., 2001).

5. ESCENARIOS ERUPTIVOS

El volcán Misti a lo largo de su evolución ha presentado una serie de erupciones explosivas. En caso que este volcán inicie un proceso eruptivo puede generar los siguientes tipos de erupciones o escenarios:

5.1 Erupción vulcaniana con IEV 1-2

El volcán Misti puede reactivarse y presentar una erupción de tipo vulcaniana, este tipo de erupciones son explosivas que emiten materiales juveniles, como ceniza, proyectiles balísticos, bloques, bombas y eventualmente lapilli de pómez (Sigurdsson et al., 2000). En este escenario, se considera la probabilidad del emplazamiento de flujos piroclásticos de muy corto alcance como se ha observado en erupciones similares recientes de volcanes peruanos como el Sabancaya. También es frecuente la formación de lahares en erupciones vulcanianas, sobre todo cuando la tefra es emplazada sobre un casquete glaciar o en épocas de fuertes precipitaciones. La caída de ceniza puede alcanzar varios kilómetros de distancia según la dirección de los vientos. Existen menores probabilidades respecto a la ocurrencia de flujos de lava, pero si hay más probabilidades a la formación de algún domo de lava. Se estima que en el volcán Misti ocurren erupciones vulcanianas con IEV 1-2, cada 500 a 1500 años, aproximadamente. Por tanto, la posibilidad de ocurrencia de erupciones con IEV es alta en el volcán Misti.

5.2 Erupción subpliniana a pliniana con IEV 3-5

Existen también probabilidades de ocurrencia de erupciones mucho más violentas en el Misti de tipo pliniano, como sucedió hace 2050 años B.P., proceso eruptivo que emplazó depósitos de caída de pómez en toda el área de Arequipa y ha podido ser identificado a más de 25 km al SO del cráter (Mariño et al., 2016). Esta erupción también generó depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza canalizados en las quebradas. Los flujos alcanzaron hasta 13 km

de distancia del cráter, en dirección sur y SO (Cobeñas, 2009; Cobeñas et al., 2012). Una erupción subpliniana y pliniana del Misti puede generar flujos piroclásticos de gran alcance, caídas de tefras (lapilli de pómez, ceniza, etc.) y también puede generar lahares. Según (Thouret et al., 2001), poco después de la erupción de hace 2050 años B.P. del volcán Misti, se generaron lahares con volúmenes considerables.

5.3 Colapso de flanco y emplazamiento de avalanchas de escombros

En el volcán Misti se han encontrado dos depósitos de avalanchas de escombros asociados al colapso de sus flancos sur, SO y NO. El flanco Noroeste del Misti tiene una pendiente abrupta, el cual a su vez es cruzado por dos fallas normales (NO-SE), este flanco ha colapsado anteriormente, y durante una erupción o sismo fuerte puede volver a colapsar y generar avalanchas de escombros (Rivera et al., 2010). Por las características geomorfológicas y estructurales del estratovolcán Misti la posibilidad de ocurrencia de avalanchas de escombros no se puede descartar.

Si el colapso asociado a una erupción volcánica o sismo fuerte fuera del flanco NO, fácilmente se represaría en el río Chili, cuyo desembalse generaría lahares que se desplazarían a lo largo del río, inundando áreas distantes. Si el colapso fuera del flanco sur, las avalanchas de escombros afectarían el sur, SE y SO. La distancia que alcanzaría es variable y dependería del volumen del material involucrado.

6. MODELAMIENTO NUMÉRICO

Con el fin de conocer las áreas por donde discurrirían los productos generados por una eventual erupción del volcán Misti se han realizado el modelamiento numérico utilizando diferentes softwares y códigos.

6.1 Lahares

Para conocer las áreas por donde discurrirían los lahares y elaborar un mapa de peligro por descenso de lahares se ha realizado una simulación por descenso de lahares utilizando el código VolcFlow, que funciona en la plataforma Matlab. Básicamente el software simula la trayectoria de un flujo desde una fuente como punto de inicio (Kelfoun, 2009) a fin de identificar zonas de inundaciones y zonas de afectación. Se basa en las ecuaciones de equilibrio de masa y momento promediadas en aguas poco profundas, además el código permite el uso de diferentes leyes reológicas y condiciones de fuente. Las ecuaciones se resuelven utilizando un método numérico basado en un esquema euleriano por diferencias finitas.

Entre los datos de ingreso para la situación numérica en el VolcFlow se consideran el volumen del flujo o descarga, la duración de la descarga, densidad del flujo, la cohesión, los ángulos de fricción basal e interna y la viscosidad.

Se establecieron tres volúmenes para el modelamiento numérico en las quebradas que descienden del distrito de Miraflores, como San Lázaro, Venezuela y tributarias. Los parámetros de ingreso para cada escenario se describen en la Tabla 3, los dos primeros escenarios presentan volúmenes de $1.5 \times 10^5 \text{m}^3$ y de $4.5 \times 10^5 \text{m}^3$, estos escenarios representan eventos de flujos hiperconcentrados (HCF) desencadenados por lluvias intensas y duraderas que remobilizan el material suelto (Thouret et al., 2022). Mientras que, para el tercer escenario se ha considerado un volumen de $16 \times 10^5 \text{m}^3$ (Thouret et al.,

2013) asociado a lahares luego de la erupción vulcaniana del Misti en año 1440-1470 (Tabla 3).

Tabla 3. Principales parámetros ingresados en el script del código VolcFlow para la simulación de los flujos de lahares, correspondiente a la Qda. San Lazaro (Vargas et al., 2021).

Escenario	Volumen	Tiempo	Densidad	Cohesión	Fricción basal	Fricción interna	Viscosidad
	V $\times 10^5 m^3$	Min	ρ kg/m ³	τ_0 Pa	°	°	μ Pa.s
1	1.5	60	1300	1	10	20	0
2	4.5	60	1600	20	10	20	1
3	16	60	1800	50	10	20	1

6.2 Flujos piroclásticos

Las simulaciones numéricas para flujos piroclásticos fueron realizadas haciendo uso del software VolcFlow ((Kelfoun et al., 2009). Dicho software considera las propiedades del flujo, su reología plástica con o sin una tensión dependiente de la velocidad (p. Ej., Bingham), utilizando topografías simplificadas; características que se ajustan más a flujos piroclásticos densos formando pulsos con velocidades y depósitos de espesores realistas (Kelfoun, 2011). El modelamiento considera una fuente ubicada en la zona suroeste del Misti, de tal manera que podría recorrer el flanco suroeste, dirección en donde se ubica el distrito de Miraflores. Entre los parámetros de entrada generales están el tiempo de alimentación de 2,700 segundos, la gravedad de 9.81 m/s^2 y un paso de tiempo de 0.15 segundos (Vargas et al., 2021). Los datos de entrada principales se muestran en la Tabla 4.

6.3 Avalancha de escombros

El modelamiento numérico se realizó utilizando el software TITAN2D, software gratuito creado por el Geophysical Mass Flow Group de la Universidad Estatal de Nueva York en Buffalo (EE.UU.), que permite a los usuarios simular flujos granulares sobre modelos de elevación digital (DEM) (Patra et al.,

2005; Sheridan et al., 2005; Pitman et al., 2003). El programa TITAN2D se basa en un modelo de profundidad promedio continuo de Coulomb incompresible para un flujo granular de "aguas poco profundas". TITAN2D combina simulaciones numéricas de un flujo con datos digitales de elevación del terreno natural respaldados a través de una interfaz de Sistema de Información Geográfica (GIS).

Tabla 4. Principales parámetros ingresados en el script del código VolcFlow para la simulación de los flujos piroclásticos (Vargas et al., 2021).

Escenario	Volumen	Densidad
	V $\times 10^7 \text{ m}^3$	ρ Kg/m^3
1	1	1200
2	5	1200
3	10	1200

Entre los datos de entrada 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 (Vargas et al., 2021). 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 calco-alcalinos y de la clasificación que propone Stinton et al. (2004). Los datos de entrada principales se muestran en la Tabla 5.

6.4 Flujos de lava

Para las simulaciones de flujos de lava, también se utilizó el software VolcFlow (Kelfoun y Druitt, 2005). Entre los parámetros de entrada se consideró una viscosidad de 10^5 Pa (Tepley et al., 2007, 2008), una densidad de 2600

kg/m³ 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. Los datos de entrada principales se muestran en la Tabla 6 (Vargas et al., 2021).

Tabla 5. Principales parámetros ingresados en el script del código Titan2D para la simulación de avalanchas de escombros (Vargas et al., 2021).

Escenario	Volumen	Fricción basal	Fricción interna	Velocidad Inicial	Escala de longitud	Dimensiones de paraboloides
	V x10 ⁷ m ³	°	°	m/s	Km	m
1	4.21	15	34	5	6	200 x 150 x 100
2	4.27	15	34	35	9	450 x 300 x 250
3	2.4	15	34	70	15	950 x 700 x 525

Tabla 6. Principales parámetros ingresados en el script del código Titan2D para la simulación de flujos de lava (Vargas et al., 2021).

Escenario	Volumen	Densidad	Viscosidad	Cohesión
	V x10 ⁷ m ³	ρ Kg/m ³	x10 ⁵ Pa	Pa
1	5	2600	1	3500
2	17	2600	1	3500
3	37	2600	1	3500

6.5 Caída de cenizas

La simulación numérica para la elaboración de los mapas de peligros por caída de ceniza se realizó mediante el software Ash3D, software que utiliza un modelo atmosférico Euleriano para el transporte, dispersión y deposición de la tefra. Ash3D modela el transporte de ceniza volcánica dividiendo la atmósfera en una cuadrícula tridimensional de células y calculando el flujo de masa a través de las paredes celulares. Debe entenderse que durante la erupción de un volcán se inyecta tefra a un ritmo constante en la columna usando un

campo de viento en tres dimensiones (Mastin et al; 2009). Los parámetros que utiliza el software son: hora de inicio (aaaa mm dd h.hh (UT), duración (horas), altura de la pluma (km sobre el nivel del mar) y volumen eyectado (km³ DRE).

Para el caso de una erupción de tipo vulcaniana, se consideró un volumen de ceniza de $1 \times 10^8 \text{m}^3$, volumen frecuente en pequeñas erupciones explosivas de tipo freáticas, freatomagmáticas y vulcanianas ($\text{IEV} \leq 2$) como la presentada por el volcán Ubinas durante los últimos 1000 años (Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2020). También se consideró una altura de la pluma volcánica de 5 km. Estos resultados obtenidos para el volcán Misti muestran que las cenizas alcanzan distancias mayores a 30 km, siendo dispersadas predominantemente en dirección oeste del volcán Misti (Lazarte et al., 2021).

Para el caso de una erupción de tipo Pliniana, se considera un volumen de pómez emitido de $14 \times 10^8 \text{m}^3$, tomando como ejemplo el volumen de pómez emitido durante la erupción de hace 2050 años del volcán Misti (Harpel et al., 2011). Ver Tabla 7. Dicha erupción generó una pluma de pómez y ceniza de aproximadamente 30 km de altura y duración de 4 horas. Estos resultados obtenidos muestran que las cenizas alcanzan distancias mayores a 100 km, siendo dispersadas predominantemente en dirección oeste, este y sureste del volcán Misti (Lazarte et al., 2021).

Tabla 7. Principales parámetros ingresados al software Ash 3D para la simulación caídas de ceniza.

Escenario	Volumen	Altura de pluma
	V $\times 10^8 \text{m}^3$	Km
Vulcaniano	1	5
Pliniano	14	30

7. MAPAS DE PELIGRO Y NIVEL DE EXPOSICIÓN

A continuación, se presentan mapas de peligro por el descenso de lahares, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, flujos de lava y caída de ceniza; se observa el alcance de cada peligro y las zonas por donde puede darse su ocurrencia clasificándose en zonas de peligro alto, peligro moderado y peligro bajo. Se presentan también mapas de zonas expuestas que permiten identificar la exposición de viviendas, manzanas, núcleos urbanos, e infraestructura.

7.1 Descenso de lahares

Tomando en consideración los trabajos geológicos de campo, la identificación de lahares recientes y el análisis de imágenes satelitales con los resultados de la simulación numérica sobre el descenso de lahares (distrito Miraflores) se ha elaborado un mapa de peligros por el descenso de lahares (Figura 10) donde se identifican tres zonas de peligro, en base a tres volúmenes de lahares:

Zona de peligro alto. - corresponde a áreas ubicadas sobre las quebradas del distrito de Miraflores, representadas en color rojo, las cuales podrían ser afectada por lahares con volúmenes próximos a los $1.5 \times 10^5 \text{m}^3$, como se observa en el mapa de peligros (Figura 10). Los flujos tienen un alcance que sobrepasa el distrito de Miraflores, la ocurrencia de este peligro es alta sobre todo en periodos de lluvias o de ocurrir erupciones de tipo vulcaniano (IEV 1-2).

Zona de peligro moderado. – Corresponde a las áreas ubicadas sobre las quebradas del distrito de Miraflores representadas en color naranja, las cuales podrían ser afectadas con lahares que alcancen volúmenes próximos a los $4.5 \times 10^5 \text{m}^3$. La ocurrencia de estos lahares tiene una mayor área de afectación, pero una menor probabilidad de ocurrencia respecto al primer escenario,

su alcance sobrepasa el distrito de Miraflores y el cercado de Arequipa hasta llegar al Río Chili. En caso de ocurrir procesos eruptivos en el Misti con un IEV 1-2 podrían generar lahares que alcancen estos volúmenes como se observaron en procesos eruptivos del Misti en los últimos mil años.

Zona de peligro bajo. – Corresponde a las áreas ubicadas sobre las quebradas del distrito de Miraflores representadas en color amarillo, las cuales podrían ser afectadas por lahares que alcanzan volúmenes próximos a los $16 \times 10^5 \text{m}^3$. Su probabilidad de ocurrencia es baja; lahares con estos volúmenes podrían generarse de ocurrir una erupción de tipo pliniana ($\text{IEV} \geq 3$) en el Misti, así mismo, los lahares no solo alcanzarían los caudales del río Chili, sino que superarían los 25 km de distancia desde su origen.

Nivel de Exposición de la población y obras de infraestructura: A lo largo de las quebradas San Lázaro, Venezuela y tributarias se observan viviendas construidas dentro del cauce de las quebradas y zonas aledañas. En las zonas altas o aguas arriba de las quebradas gran cantidad de desmonte es vertido dentro de las quebradas estrangulando sus cauces, y en las zonas bajas, puentes de poca altura se exponen al desborde de lahares.

Tomando como referencia el mapa de peligros por descenso de lahares en Miraflores, así como los datos de campo, se ha realizado el mapa de zonas expuestas ante peligros por descenso de lahares (Figura 11) identificando viviendas, complejos deportivos, puentes, badenes, así como tuberías expuestas. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

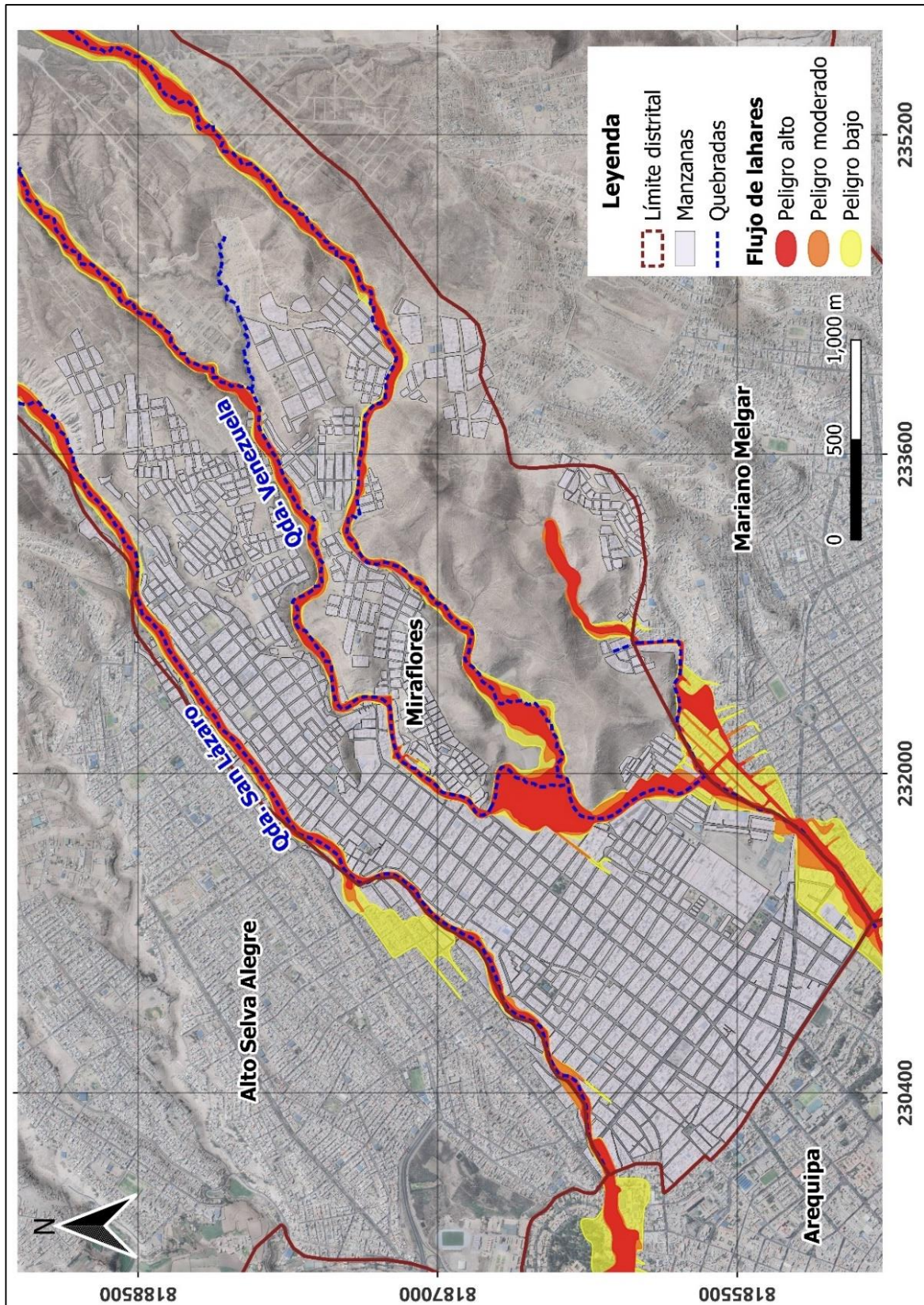


Figura 10. Mapa de peligro por descenso de lahares en el distrito de Miraflores.

Viviendas expuestas: Alrededor de 20 núcleos urbanos próximos a las quebradas San Lázaro, Venezuela y tributarias se encuentran expuestos al peligro por descenso de lahares (Tabla 8), así como 636 viviendas se encuentran expuestas al alto peligro alcanzando una población próxima a los 7,063 habitantes.

Tabla 8. Sectores expuestos ante ocurrencia de descenso de lahares asociados al alto, moderado y bajo peligro

N°	Sector	Quebrada	Habitantes expuestos	Viviendas	Pel. Alto	Viviendas	Pel. Medio	Viviendas	Pel. Bajo
1	AA. HH Héroes del Pacífico	Venezuela	20	13	X	13	X	13	X
2	AA. HH Terminal Calvario	San Lázaro	259	240	X	35	X	50	X
3	AA. HH Vista Alegre	Venezuela	50	3	X	5	X	29	X
4	AA. HH. Garcilaso de la Vega	Venezuela	90	15	X	15	X	23	X
5	AA.HH. Villa Goyeneche	Venezuela	259	39	X	52	X	52	X
6	Asoc. Carlos García Ronceros	Venezuela	478	16	X	17	X	27	X
7	Miraflores	San Lázaro y Venezuela	1, 906	205	X	278	X	428	X
8	P. J Buen Amanecer	Venezuela	202	19	X	27	X	31	X
9	P. J Peñón Alfonso Ugarte	San Lázaro	78	7	X	12	X	14	X
10	P. J Tahuantinsuyo	Venezuela	33	5	X	15	X	15	X
11	P. J Unión Edificadores Misti	San Lázaro	751	55	X	116	X	147	X
12	P. J Villa La Familia	Venezuela	39	8	X	8	X	8	X
13	P. J Villa la Pradera	Venezuela	35	7	X	10	X	16	X
14	Pblo. Miraflores	Venezuela	70	0	X	19	X	19	X
15	Sr. de los Milagros	Venezuela	61	5	X	5	X	5	X
16	UPIS La Galaxia	Venezuela	45	6	X	8	X	14	X
17	UPIS Solidaridad	San Lázaro	600	38	X	88	X	96	X
18	Urb. Alameda Salaverry	Venezuela	1, 340	85	X	142	X	206	X
19	Urb. Cooperativa 14	Venezuela	310	10	X	10	X	10	X
20	Urb. Juan Pablo XXIII	Venezuela	206	44	X	52	X	66	X
21	Urb. Las Palmeras	San Lázaro	131	25	X	31	X	31	X
22	Urb. Pedro Ruiz Gallo	Venezuela	100	7	X	16	X	18	X

En las partes bajas del distrito de Miraflores, las quebradas se encuentran reducidas en el ancho de su cauce, y las viviendas se encuentran asentadas en zonas de terraza o en la misma rívera alcanzando zonas de peligro alto como se muestra en la Figura 12. Un ejemplo evidente es el P.J. Alfonso

Ugarte donde se instalaron muros de contención que no superan los 2 m de altura, cada periodo de lluvias los muros son sobrepasados por los lahares inundando las viviendas ubicadas en la riera de la quebrada San Lázaro.



Figura 12. Viviendas construidas en el cauce de la quebrada San Lázaro (P. J. Alfonso Ugarte).

En la quebrada Venezuela se ha observado que en el sector próximo a la feria del Altiplano y la Av. Mcal. Castilla alcanza un ancho de escasos 4 m y una profundidad próxima a los 4 m, así mismo algunas viviendas están asentadas sobre la misma quebrada (Figura 13).



Figura 13. Viviendas construidas en el cauce de la quebrada San Lázaro (P. J. Alfonso Ugarte).

En zonas como el P. J. El Buen Amanecer y la Asoc. Carlos García el nivel del fondo del cauce de la quebrada en relación a las viviendas asentadas en los alrededores es mínimo, se ha observado hasta 50 cm de desnivel, los muros de contención no superan los 1.5 m como se observa en la Figura 14.



Figura 14. Desnivel observado entre cauce de quebrada y viviendas construidas. P. J. Buen Amanecer.

Puentes expuestos: A lo largo de las quebradas Venezuela y San Lázaro se han identificado siete puentes expuestos al descenso de lahares (Tabla 9), principalmente por su poca altura, estas infraestructuras comprenden desde los 1.2 m hasta los 4 m de altura. Se ha observado que próximos a los 300 m aguas arriba del puente Cahuide (quebrada San Lázaro) material lahárico reciente fuera de su cauce alcanzando viviendas aledañas. Cinco de los puentes restantes (Figuras 15 - 19) se ubican en la quebrada Venezuela como son el puente ubicado en el P. J. Juan XXIII, el puente del Pje. Tahuantinsuyo, el puente próximo a Villa Goyeneche y dos puentes ubicados en la Alameda Salaverry. Las características de estas estructuras se encuentran en la Tabla 10.

Sector/ Nombre	Este/Norte (m)	Cota (m)	Estructura	Quebrada	Dimensiones	Características
AA.HH Unión edificadores del Misti/ Pte. Cahuide	231492/ 8187286	2502	Concreto	San Lázaro	Altura: 4m Largo: 11m Ancho: 9m	Puente enmallado 3m de altura. Escombros y desperdicios próximos.
Miraflores/ Pte. Vilcanota	230587/ 8186445	2431	Concreto	San Lázaro	Altura: 3m Largo: 13m Ancho: 9m	Puente enmallado 3.5m de altura. Escombros y desperdicios próximos.
PJ AUIS Juan XXIII	232369/ 8187278	2521	Concreto	Venezuela	Altura: 4m Largo: 18m Ancho: 7m	Presenta barandas. Poco depósito antrópico en cercanías.
Pasaje Tahuantinsuyo	232208/ 8187225	2511	Metal	Venezuela	Altura: 1.2m Largo: 8m Ancho: 1.5m	Presenta barandas. Presenta muros de contención de poca altura (0.40 m) en cercanías. El descenso de lahares fácilmente puede desbordarse.
AA.HH Villa Goyeneche	232055/ 8187172	2509	Concreto	Venezuela	Altura: 3.9m Largo: 12m Ancho: 7.2m	Presenta barandas. Hay presencia de moderado depósito antrópico.
Urb. Alameda Salaverry	231907/ 8185959	2442	Concreto	Venezuela	Altura: 1.7m Largo: 15.4m Ancho: 16m	Presenta barandas. Presenta poco depósito antrópico.
Urb. Alameda Salaverry	231987/ 8185652	2429	Concreto	Venezuela	Altura: 3.2m Largo: 7.5m Ancho: 8m	Presenta barandas. Presenta poco depósito antrópico.

Tabla 9. Características de los puentes expuestos a descenso de lahares en el distrito de Miraflores.

	<p>Figura 15. Puente Cahuide</p>
	<p>Figura 16. Puente Vilcanota.</p>
	<p>Figura 17. Puente P.J. AUIS Juan XXIII ubicado en la quebrada Venezuela.</p>
	<p>Figura 18. Puente próximo al Pje. Tahuantinsuyo</p>

	<p>Figura 19. Puente Villa Goyeneche</p>
	<p>Figura 20. Pte Urb. Alameda Salaverry</p>
	<p>Figura 21 Puente de concreto ubicado en la Urb. Alameda Salaverry – quebrada Venezuela.</p>

Zonas de Baden: También se han identificado zonas de Baden que podrían ser afectadas de acuerdo al mapa de peligros por descenso de lahares, la mayoría de badenes a excepción de la Villa Goyeneche no están constituidos de concreto, simplemente se generaron por el paso de vehículos y/o máquinas niveladoras en las zonas de quebrada y se ubican principalmente en las zonas altas del distrito de Miraflores. Al momento de la activación de las quebradas simplemente quedaría limitado su paso y se generaría un cauce erosionado. Se ha realizado un listado de los badenes expuestos junto con sus características en la Tabla 10.

Tabla 10. Badenes expuestos y sus características.

Sector	Este/Norte (m)	Cota (m)	Dimensiones	Características
AA.HH Vista Alegre	234402/ 8187336	2739	Largo: 13m Ancho: 6m	Zona de Baden que no presenta algún refuerzo de concreto, Se observa erosionado.
Taller Granja los Girasoles	234007/ 8187230	2692	Largo: 20m Ancho: 3.5m	Zona de Baden que no presenta algún refuerzo de concreto, Fácilmente erosionable.
La Galaxia	233493/ 8187373	2640	Largo: 14m Ancho: 5m	Zona de Baden que no presenta algún refuerzo de concreto, Fácilmente erosionable, presencia de viviendas cercanas al Baden.
Pueblo Héroes del Pacífico	233797/ 8187894	2669	Largo: 35m Ancho: 3m	Zona de Baden que no presenta algún refuerzo de concreto, Fácilmente erosionable.
UPIS La Galaxia	233565/ 8187808	2651	Largo: 13m Ancho: 6m	Zona de Baden que no presenta algún refuerzo de concreto, Fácilmente erosionable. presencia de viviendas cercanas al Baden.
AA.HH. Villa Goyeneche	232108/ 8187207	2509	Largo: 8m Ancho: 10m	Zona de Baden reforzada con concreto. Presencia de viviendas muy cernas a Baden.

7.2 Descenso de Flujos piroclásticos

El volcán Misti podría generar una erupción explosiva con IEV igual a 2 (tipo vulcaniana) con la emisión de limitados flujos piroclásticos, pero en caso de generar una erupción explosiva con IEV mayor a 2, estos flujos piroclásticos serían de gran volumen logrando alcanzar zonas urbanas con un impacto significativo en el distrito de Miraflores. En tal sentido, en base al modelamiento numérico, datos geológicos de procesos eruptivos pasados, el estudio de depósitos, cartografiado e, imágenes satelitales se ha elaborado un mapa de peligros por descenso de flujos piroclásticos del distrito de Miraflores (Figura 22).

Dicho mapa muestra tres zonas de peligro:

Zona de peligro alto. - Corresponde al área de color rojo en el mapa de peligros. Los flujos piroclásticos pueden desplazarse a más de 4.2 km desde la cima del volcán 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 la población, ni viviendas por no tener un gran alcance.

Zona de peligro moderado. - Corresponde al área de color amarillo (Figura 22) en el mapa de peligros, que muestra que los flujos piroclásticos recorrerían, desde la cima del volcán hasta distancias de hasta 11.5 km en un tiempo de aproximadamente 6 minutos con una velocidad máxima de 50 m/s. La ocurrencia de flujos con estas características tiene menor probabilidad de ocurrencia ocupando un área de peligro de $\sim 1 \text{ km}^2$ del distrito. El alcance de los flujos no llegaría hasta el límite urbano actual.

Zona de peligro bajo. - Corresponde a la zona de color amarillo en el mapa de peligros, y muestra que los flujos piroclásticos se desplazarían, desde la cima del volcán hasta distancias de 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 (área en color amarillo) ocupa $\sim 3.4 \text{ km}^2$ alcanzando zonas urbanas del distrito; sin embargo, presenta una probabilidad de ocurrencia baja y está asociada a eventos con IEV superior a 3.

Nivel de exposición de la población y obras de infraestructura: En la actualidad, de ocurrir un proceso eruptivo de tipo vulcaniano (IEV 1-2) el alcance de los flujos piroclásticos sería limitado, y no llegarían hasta las zonas urbanas, sin embargo, si continua el crecimiento del distrito de Miraflores en dirección del volcán Misti, es probable que estos sean alcanzados por eventuales flujos piroclásticos (Figura 23).

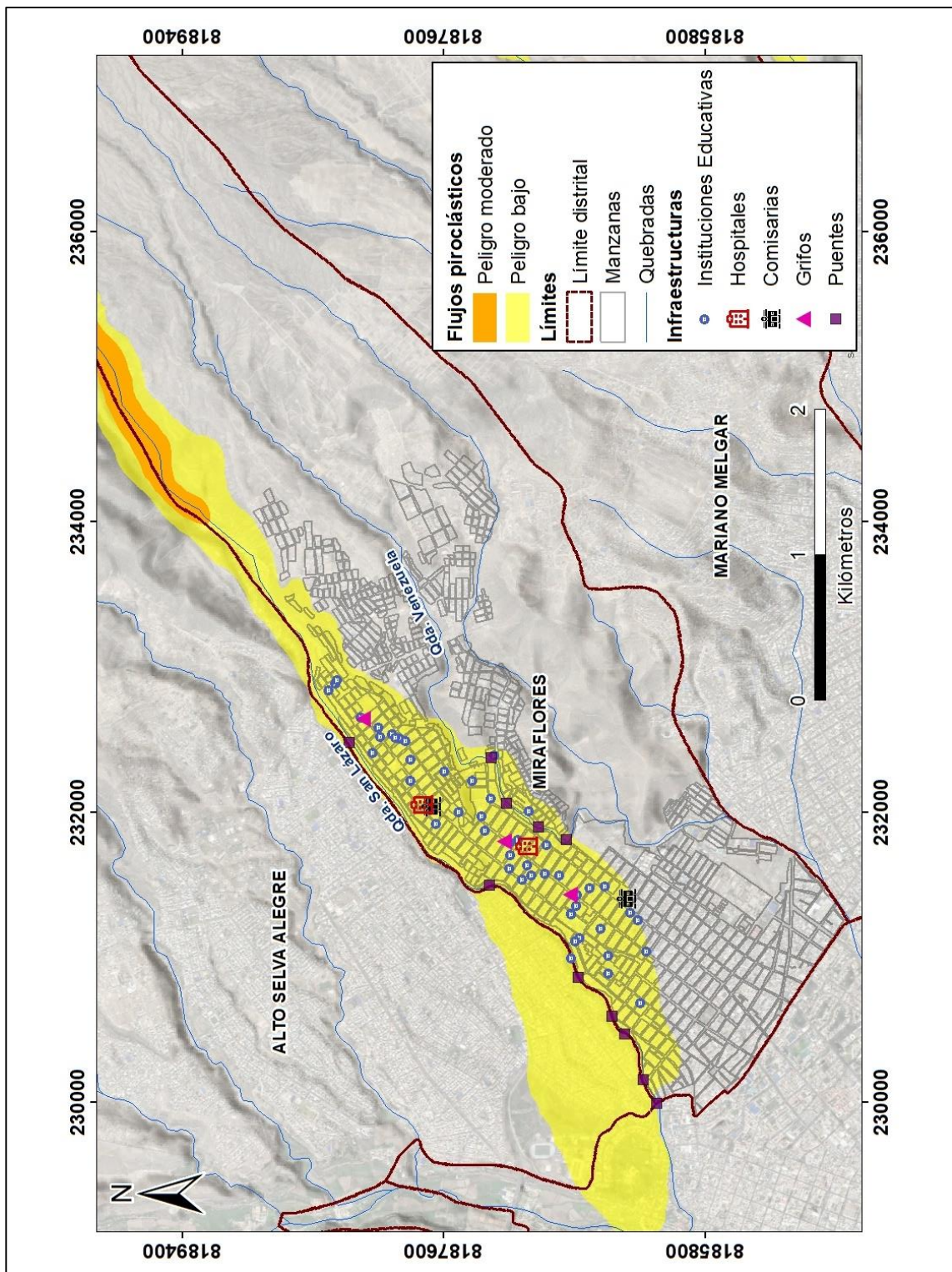


Figura 22. Mapa de peligro por descenso de flujos piroclásticos en el distrito de Miraflores.

Una erupción explosiva importante con un IEV 3 podría generar flujos piroclásticos que pueden sobrepasar el distrito de Miraflores, tal como se muestra en el mapa de peligros (peligro bajo). En efecto, en caso de generarse flujos piroclásticos, estos se desplazarían a lo largo de la quebrada San Lázaro alcanzando parte de una quebrada tributaria próxima al P. J. Buen Amanecer y la Asoc. Carlos García. Un total de 31 sectores serían expuestos con una población próxima a los 27803 habitantes (Tabla 11).

Tabla 11. Sectores expuestos al peligro de flujos piroclásticos (nivel de peligro bajo).

N°	Sector	Habitantes	Manzanas	Peligro Bajo
1	AA. HH El Porvenir	4,450	55	X
2	AA. HH Fuerte Arica	153	5	X
3	AA. HH Garcilaso de la Vega	85	2	X
4	AA. HH Los Claveles	89	1	X
5	AA. HH Los Sauces	28	2	X
6	AA. HH Mateo Pumacahua	756	10	X
7	AA. HH Peñón Alfonso Ugarte	587	8	X
8	AA. HH Señor de Coyllorite	346	11	X
9	AA. HH Tahuantinsuyo	621	16	X
10	AA. HH Terminal Calvario	259	1	X
11	AA. HH Villa Esperanza	356	5	X
12	AA. HH Villa Familia	39	1	X
13	AA. HH Villa Goyeneche	387	5	X
14	AA.HH Unión edificadores del Misti	7,613	64	X
15	Asoc. Señor de Los Milagros	61	1	X
16	Asoc. Ulrich Neisser	98	1	X
17	Miraflores	5214	40	X
18	P. J Buen Amanecer	229	3	X
19	P. J Los Olivos	94	2	X
20	P. J Tomasa Tito Condemayta	523	10	X
21	Parque Artesanal	250	4	X
22	Pueblo Miraflores	207	4	X
23	UPIS El Salvador	28	4	X
24	UPIS Francisco Mostajo	357	6	X
25	UPIS Luceros del Misti	165	6	X
26	UPIS Solidaridad	726	5	X
27	Urb. Carlos García Ronceros	731	4	X
28	Urb. Chapi Chico	704	5	X
29	Urb. Cooperativa 14	1,220	15	X
30	Urb. Juan Pablo XXIII	346	7	X
31	Urb. Las Palmeras	1081	11	X

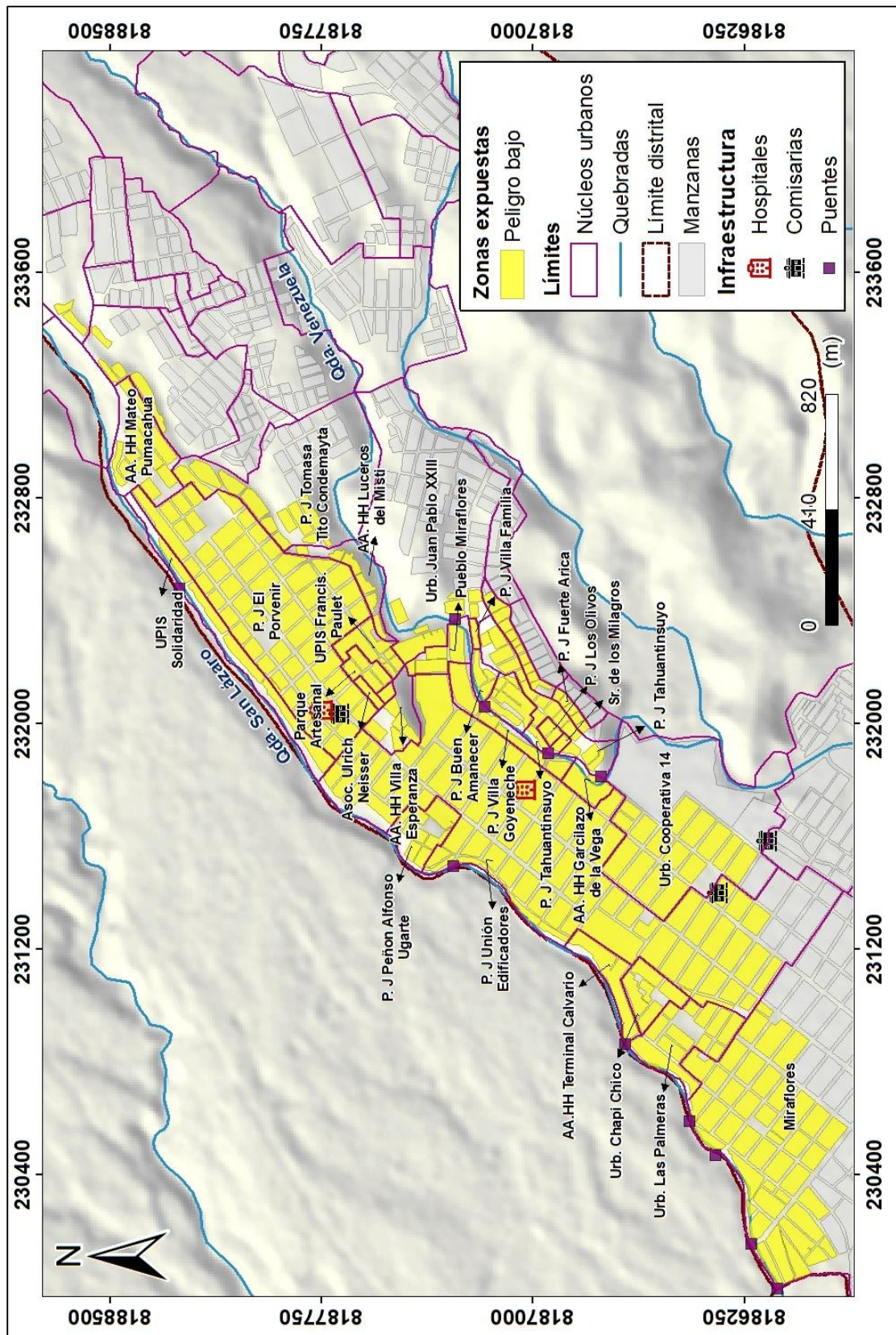


Figura 23. Mapa de zonas expuestas ante peligro por descenso de flujos piroclásticos en el distrito de Miraflores.

Además, estarían expuestas viviendas y obras de infraestructura, como vías vehiculares, puentes y pasos peatonales, tuberías de agua y desagüe, centros educativos, centros de salud, reservorios de agua, comisarías y grifos, entre otros como se muestra en la Tabla 12:

Tabla 12. Infraestructura expuesta por la ocurrencia de flujos piroclásticos (nivel de peligro bajo).

Lugar	Características
Vía vehicular y peatonal	Ubicados en las quebradas San Lázaro y tributarias de la quebrada Venezuela
Puente vehicular y peatonal	En total son 11 puentes, ubicados en las quebradas tributarias
Tubería de agua y desagüe	En total son 2 zonas de tuberías, ubicados en las quebradas tributarias
Centro educativo	Se identificaron 49 centros educativos: El Peñón, Los Ángeles, Angelitos de María, Karol Josef, Anna Dengel, Girasoles, San Martín de Porres, Mi Mundo Mágico B, Divino Niño Jesús, Guamán Poma, International Nikola Tesla, El Gran Amauta, Niño de Jesús, Francisco Paulet Mostajo, Los Canarios, Mis Pequeñas Travesuras, Burbujitas, Ángeles de la Guarda, Los Claveles, Cristo Obrero, San Francisco Bernardone de Asís, Santa María de La Merced, Castillo de Talentos, Fomento Anders Celsius, San Gabriel, Niños de Praga, Nuestra Señora del Carmen, María Puerta del Cielo, Corazón de Jesús, Gerardo Iquirá Pizarro, Lord Karmel, San Gabriel Arcángel, Francisco Javier de Luna Pizarro, Niños Praga A, Gaspere Mariotti, Enrico Fermi, Virgen de Las Mercedes, Santísimo Niño Jesús, Los Jazmines, José Abelardo Quiñones, Jorge Luis Borges, Ciencias Aplicadas Cedunsa San Agustín, Holy Rosary, Misti, Mere du Christ, Corpus Christi, Yahveh Nissi, Augusto Salazar Bondy y Learning. Están ubicados próximos a las quebradas San Lázaro y tributarias
Centro de salud	El Porvenir Miraflores y Edificadores Misti. Están ubicados próximos a las quebradas San Lázaro y tributarias
Reservorio de agua	Ubicado próximo a la quebrada tributaria
Comisaría	CPNP El Porvenir y CPNP Alto Misti
Grifo	El Porvenir, Servicentro Miraflores y Alto Misti

7.3 Avalancha de escombros

En caso de una eventual erupción explosiva violenta ($IEV > 3$) del Misti puede producirse el colapso o derrumbe de un sector del flanco sur o suroeste de dicho volcán, cuyos depósitos resultantes serían avalanchas de escombros que pueden alcanzar a más de 5 km de distancia de la cima.

En base a datos de campo y la simulación numérica se ha elaborado un mapa de peligros por avalancha de escombros (Figura 24), en donde se distingue tres zonas de peligro, ligado a tres volúmenes diferentes:

Zona de peligro alto. - Corresponde a un área representada en color rojo (no visualizado en el mapa). La avalancha se desplazaría, desde el 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.

Zona de peligro moderado. - Corresponde a un área representada en color naranja (Figura 24) en donde la avalancha de escombros se emplazaría, desde el 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.

Zona de peligro bajo. - Corresponde a un área representada en color amarillo (Figura 24), en donde la avalancha de escombros se emplazaría, 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 (ver Figura 24).

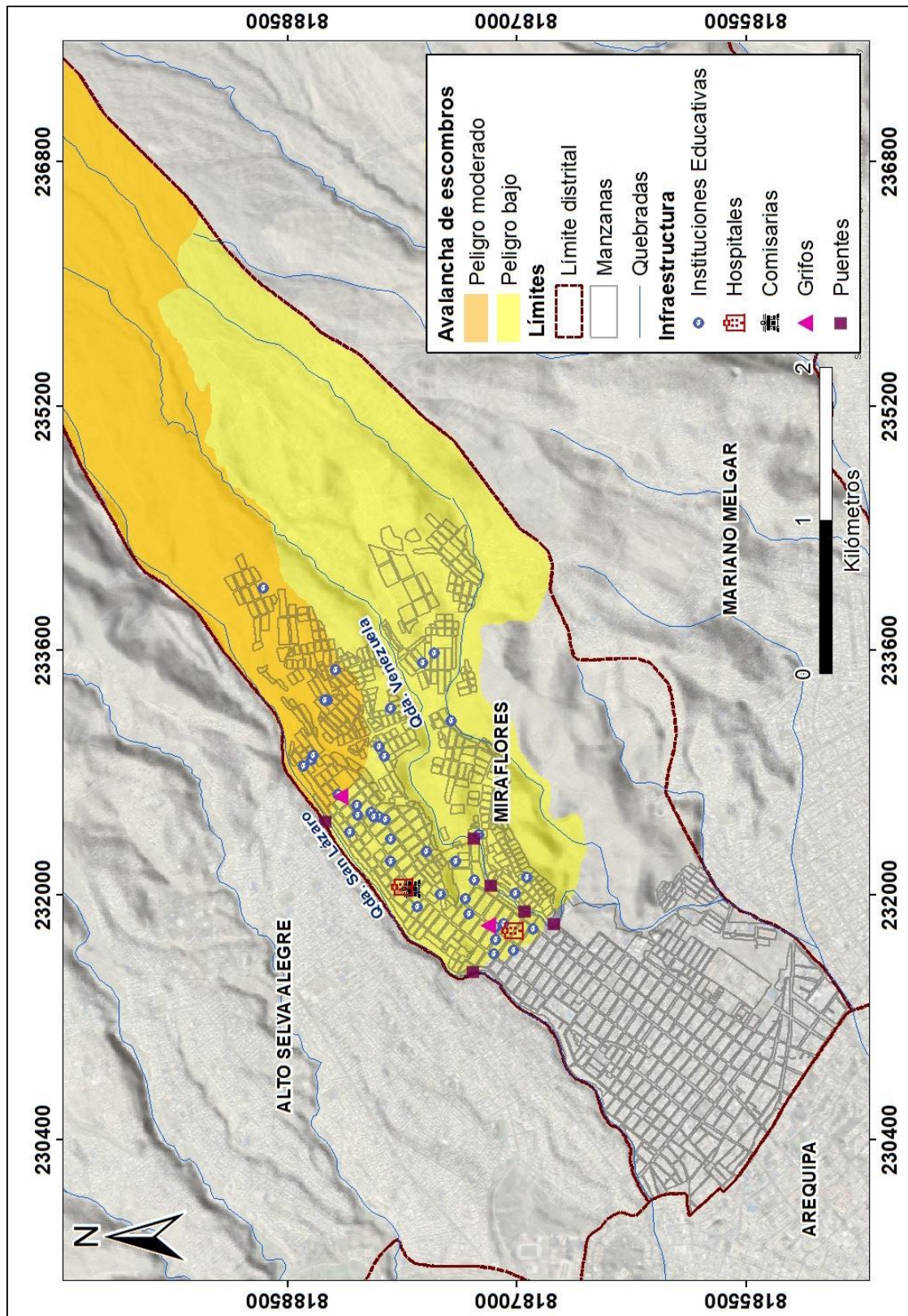


Figura 24. Mapa de peligro por avalancha de escombros para el distrito de Miraflores.

Nivel de exposición de la población y obras de infraestructura: En el mapa de peligros, en las zonas de moderado y bajo peligro se ha identificado infraestructura expuesta, como puentes vehiculares y peatonales, tuberías de agua o desagüe, centros educativos, centros de salud, reservorios, comisarías y grifos (Figura 25).

Zonas de peligro moderado (color naranja).- Comprende las partes altas de Miraflores próximas a la quebrada San Lázaro. La zona abarca una distancia de hasta 13 km del volcán (Figura 25). En esta zona, existe un total de 14 sectores, donde habitan aproximadamente 5,878 personas expuestas al emplazamiento de avalanchas de escombros. Los detalles se observan en la Tabla 13.

Tabla 13. Sectores expuestos al peligro de Avalancha de Escombros (nivel de peligro moderado)

N°	Sector	Habitantes	Manzanas	Peligro Moderado
1	AA. HH Estrellas del Misti	186	12	X
2	AA. HH Los Sauces	33	4	X
3	Granja Nuevo Amanecer	31	4	X
4	P. J Villa El Salvador	1135	11	X
5	AA. HH Señor de Los Milagros	258	14	X
6	P. J Corazón de Jesús	61	2	X
7	AA. HH Mirador	205	9	X
8	AA. HH Mateo Pumacahua	756	10	X
9	UPIS El Salvador	1187	27	X
10	UPIS Cristo Blanco	321	14	X
11	Pueblo Héroes del Pacífico	267	12	X
12	P. J Tomasa Tito Condemayta	362	6	X
13	AA. HH El Porvenir	994	11	X
14	UPIS Solidaridad	82	1	X

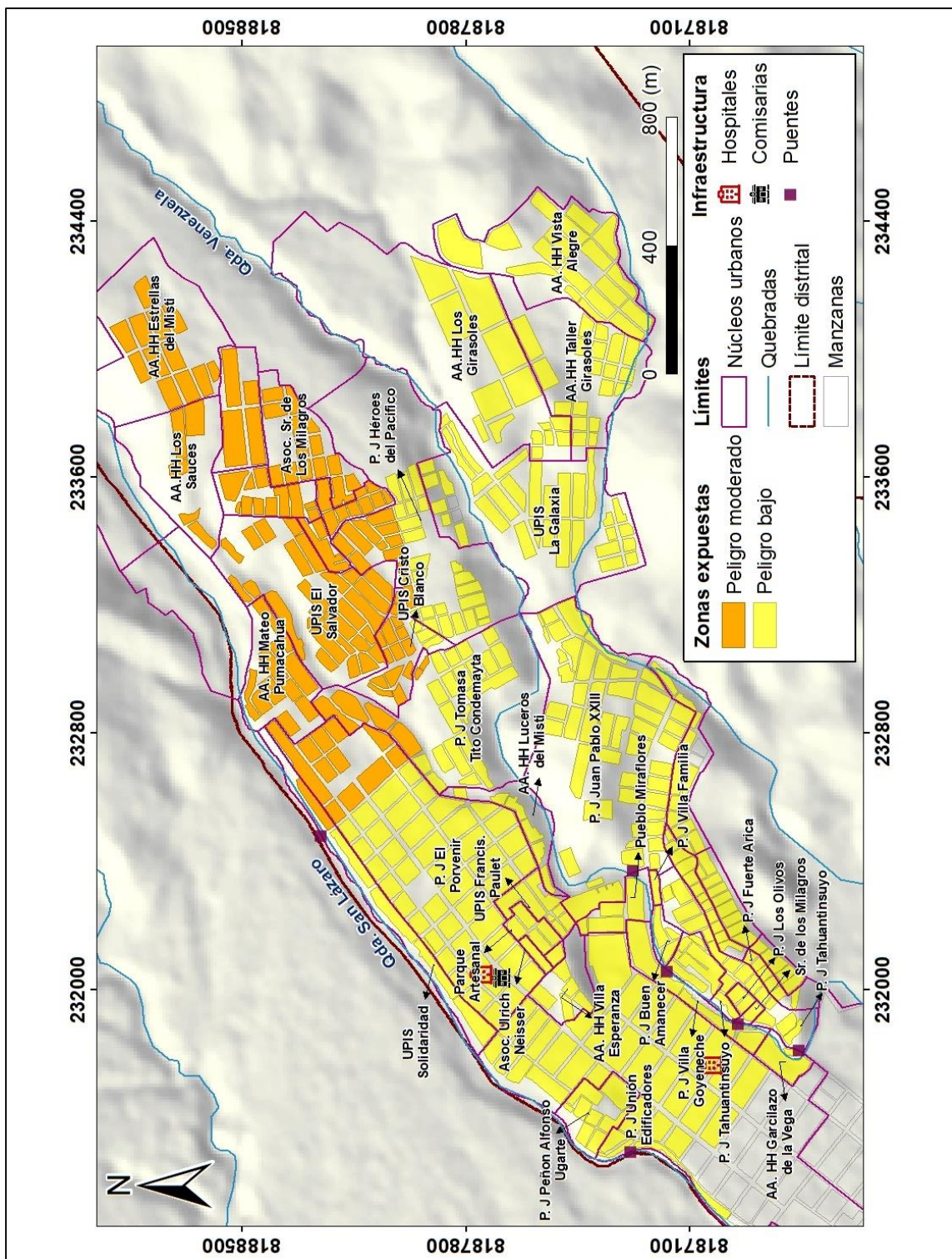


Figura 25. Mapa de zonas expuestas ante peligro por descenso de avalancha de escombros en el distrito de Miraflores.

Estarían también expuestos un puente, siete centros educativos y un reservorio de agua (Tabla 14).

Tabla 14. Infraestructura expuesta perteneciente al segundo escenario por descenso de avalancha de escombros en el distrito de Miraflores.

Infraestructura expuesta	Características
Puente vehicular y peatonal	Puente ubicado en la quebrada San Lázaro
Centro Educativo	Pensamientos, La Virgen y Jesús, Las Violetas, El Salvador, El Peñón, Los Ángeles y Angelitos de María. Están ubicados próximos a la quebrada San Lázaro
Reservorio de agua	Ubicado próximo a la quebrada Tributaria

Zonas de peligro bajo (color amarillo). - Comprende las partes bajas del volcán Misti hasta una distancia de 12 a 15 km del volcán, donde existe un total de 31 sectores donde habitan aproximadamente 20,085 personas que estarían expuestos al descenso de avalanchas de escombros (Tabla 15). También estarían expuestos 3 puentes, 4 tuberías, 41 Centros Educativos, 3 centros de salud, 3 reservorios de agua, 2 grifos y 1 comisaria (Tabla 16).

Tabla 15. Sectores expuestos al peligro de Avalancha de Escombros (Nivel de peligro bajo).

N°	Sector	Habitantes	Manzanas	Peligro Bajo
1	UPIS Cristo Blanco	53	3	X
2	Pueblo Héroes del Pacífico	760	24	X
3	P. J Tomasa Tito Condemayta	1083	19	X
4	AA. HH El Porvenir	4450	44	X
5	UPIS Solidaridad	644	4	X
6	AA. HH Los Girasoles	207	14	X
7	Taller Granja Los Girasoles	358	19	X
8	AA. HH Vista Alegre	267	18	X
9	UPIS La Galaxia	1060	34	X
10	Urb. Juan Pablo XXIII	1840	46	X
11	AA. HH Luceros del Misti	250	6	X
12	UPIS Francisco Mostajo	357	2	X
13	Parque Artesanal	250	4	X
14	AA. HH Los Claveles	89	1	X
15	Asoc. Ulrich Neisser	98	1	X
16	P. J Peñon Alfonso Ugarte	587	8	X

17	P. J Unión Edificadores del Misti	3760	32	X
18	Pueblo Miraflores	207	4	X
19	P. J Villa Familia	39	1	X
20	P. J Villa Pradera	561	11	X
21	AA. HH Villa Goyeneche	387	5	X
22	Buen Amanecer	229	3	X
23	Urb. Carlos García Ronceros	731	4	X
24	P. J Tahuantinsuyo	621	16	X
25	AA. HH Villa Coyllorite	304	9	X
26	AA. HH Señor de Coyllorite	364	12	X
27	AA. HH Villa Arica	152	5	X
28	AA. HH Fuerte Arica	182	6	X
29	Asoc. Señor de Los Milagros	61	1	X
30	P. J Los Olivos	94	2	X
31	AA. HH Garcilaso de la Vega	40	2	X
TOTAL		20,085	360	

Tabla 16. Infraestructura expuesta perteneciente al tercer escenario por descenso de avalancha de escombros en el distrito de Miraflores.

Infraestructura expuesta	Características
Puente vehicular y peatonal	5 puentes, ubicados próximos a las quebradas San Lázaro y tributarias
Tubería de agua y desagüe	4 tuberías expuestas, ubicados en las quebradas tributarias
Centros Educativos	En total son 41 CE Pensamientos, La Virgen y Jesús, Las Violetas, El Salvador, El Peñón, Los Ángeles, Angelitos de María, Mi Amiguito Jesús, Calas, Próceres de Miraflores, Padre Eloy Arribas Lázaro, Gotitas del Roció, Gotitas del Saber, Karol Josef, Anna Dengel, Girasoles, San Martín de Porres, Mi Mundo Mágico B, Divino Niño Jesús, Guamán Poma, International Nikola Tesla, El Gran Amauta, Niño de Jesús, Francisco Paulet Mostajo, Los Canarios, Mis Pequeñas Travesuras, Burbujitas, Ángeles de la Guarda, Los Claveles, Cristo Obrero, San Francisco Bernardone de Asís, Santa María de La Merced, Nuestra Señora del Carmen, Fomento Anders Celsius, Castillo de Talentos, San Gabriel, Niños de Praga, Tahuantinsuyo, María Puerta del Cielo y Gerardo Iquira Pizarro. Están ubicados próximos a las quebradas San Lázaro y tributarias
Centro de salud	El Porvenir Miraflores y Edificadores Misti. Están ubicados próximos a las quebradas San Lázaro y tributarias

Reservorio de agua	En total son 3 reservorios ubicados próximos a la quebrada Tributaria
Comisaría	CPNP El Porvenir
Grifo	Grifos El Porvenir y Alto Misti

7.4 Flujos de lava

En base a datos de campo y la simulación numérica se ha elaborado un mapa de peligros por descenso de flujos de lava (Figura 26), en donde se distingue tres zonas de peligro, ligado a tres volúmenes diferentes. Se comprueba que el distrito de interés no sería afectado por este peligro a comparación de otros distritos como Mariano Melgar, Paucarpata, entre otros. Por lo tanto, no se observan zonas expuestas por afectación de flujos de lava del Misti para el distrito de Miraflores.

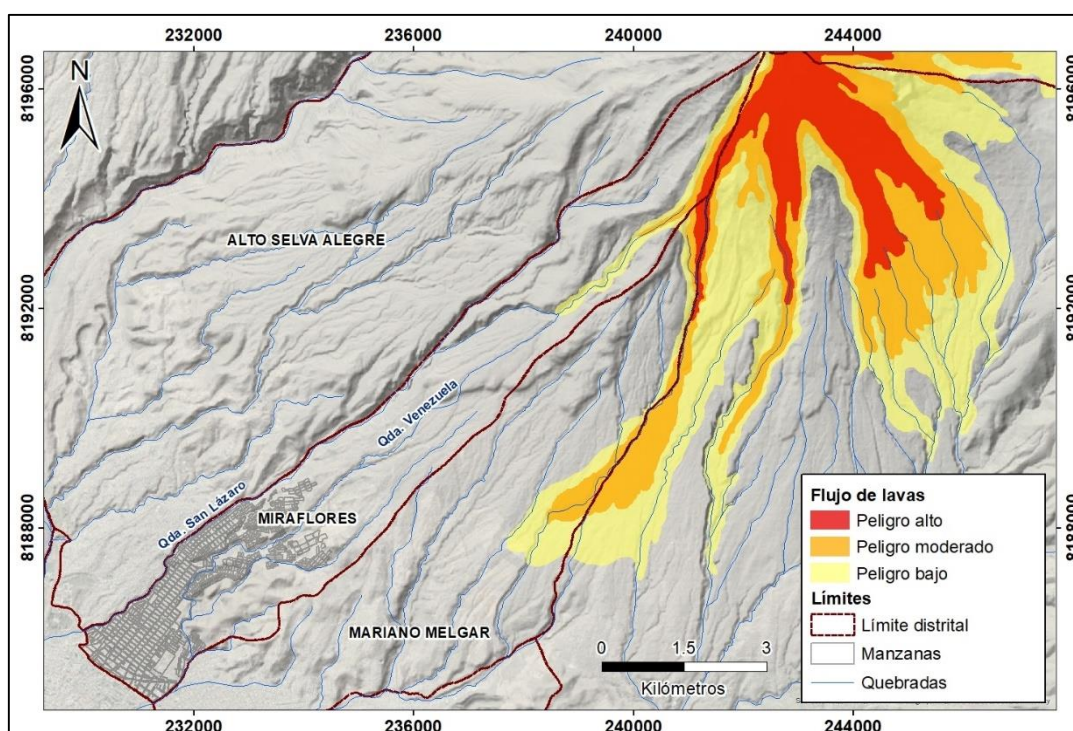


Figura 26. Mapa de peligros por flujos de lava para el distrito de Miraflores. Los flujos no presentan alcance a las zonas urbanas del distrito.

7.5 Caída de ceniza

Dado que el Misti puede reactivarse en el futuro y presentar erupciones explosivas, se hace un análisis de dos escenarios eruptivos, uno vulcaniano con IEV1-2, y el otro para un escenario de erupción subpliniana a pliniana.

Erupción vulcaniana con un IEV 1-2.- Se ha elaborado un mapa de peligros por caída de ceniza (Figura 27) basado en las simulaciones numéricas, estudios geológicos e imágenes. El mapa muestra tres zonas de peligro:

Peligro Alto. - Comprende un área proximal con un radio de más de 10 km alrededor del volcán Misti que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas con espesores menores a 5 cm. Estos valores son coherentes con los correspondientes a la erupción presentada por el volcán Misti entre los años 1440-1470 con un IEV-2 (Thouret et al., 2001). La dispersión de ceniza tiene un alcance que sobrepasa el área del distrito de Miraflores.

Peligro Moderado: Comprende un área con un radio de más de 30 km alrededor del volcán Misti que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas con espesores de algunos centímetros a milímetros. Estos valores son coherentes con los correspondientes a la erupción del volcán Ubinas en los años 2006-2009 con IEV 2. Esta erupción dejó depósitos de ceniza con espesores de 1 mm en un radio de 30 km del cráter del volcán Ubinas (Rivera et al., 2014).

Peligro Bajo: Comprende un área distal con radio menor o igual a 60 km desde el volcán Misti que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa con espesores menores a 1 mm. Estos valores son coherentes con los datos de la última erupción del volcán Ubinas del año 2019, pues se identificaron capas de ceniza con espesores de 1 mm a más de 90 km (Aguilar et al., 2021).

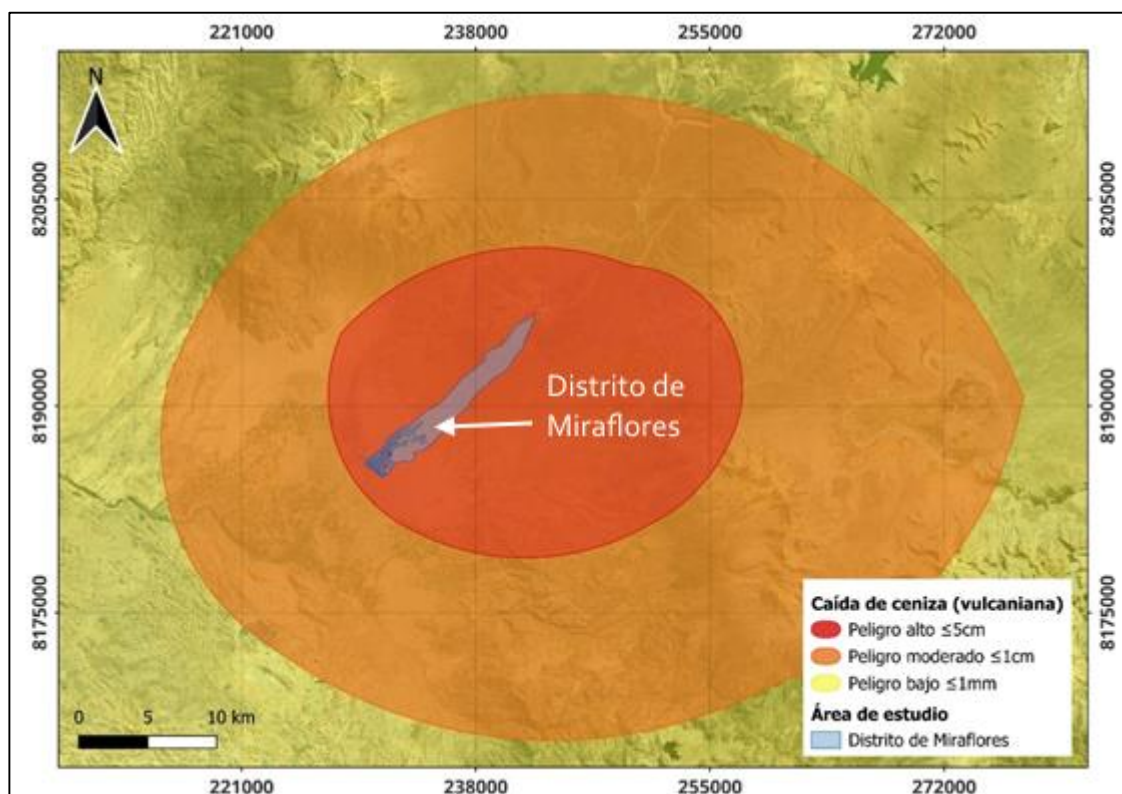


Figura 27. Mapa de peligro por caída de ceniza para un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1-2).

Erupción Sub Pliniana a Pliniana (IEV >2). - Ante un escenario de este tipo también se considera tres zonas de peligro: alto, moderado y bajo. Solo en la primera zona (peligro alto) que tiene un alcance superior a los 10 km desde el cráter del Misti puede caer ceniza y pomez formando capas con espesores mayores de 40 cm. Estos resultados son coherentes con los depósitos de ceniza correspondientes a la erupción subpliniana del volcán Yucamane (Tacna) ocurrida hace 3085 años AP. Pues, después de esta erupción se observó la presencia de depósitos de cenizas de similar espesor en áreas aledañas a dicho volcán (Rivera et al., 2020). Es preciso señalar que estos depósitos alcanzan en su integridad al distrito de Miraflores.

En caso de una erupción pliniana la zona del distrito de Miraflores puede ser cubierto por una capa de pómez de más de 50 cm de espesor. Basado en los espesores del depósito de pómez dejado por la erupción de hace 2050 años del Misti (Harpel et al., 2011).

Nivel de exposición de la población y obras de infraestructura: Para un proceso eruptivo vulcaniano con un IEV 1-2 las zonas expuestas a las caídas de ceniza, involucran todo el distrito de Miraflores, es decir, todas las viviendas, los centros educativos, centros de salud, vías o puentes vehiculares y peatonales, reservorios, grifos, comisarías, es decir toda el área del distrito de Miraflores. La caída de cenizas no solo afectaría al distrito de Miraflores sino también a todos aquellos distritos próximos al volcán Misti. En este sentido la población estaría expuesta a problemas en su salud por respirar cenizas, las aguas presentarían contaminación y los cultivos serían afectados en las zonas próximas al Misti entre otras dificultades.

Para una erupción tipo pliniana no solo se presentaría caída de ceniza si no también pómez o fragmentos de roca de tamaños entre 2 y 64 mm en todo el distrito de Miraflores y distritos vecinos. La caída de cenizas de espesores entre 40 a 100 cm generaría daños severos a la salud de los pobladores, un alto grado de contaminación de las aguas, una producción agrícola paralizada, viviendas e infraestructura afectadas y tránsito obstaculizado. El distrito de Miraflores y distritos circundantes al Misti presentarían circunstancias muy poco favorables para continuar habitándose.

8. APORTES A UN PLAN DE CONTINGENCIA

El conjunto de planes de acción a seguir ante la ocurrencia de un proceso eruptivo en el distrito de Miraflores está poco desarrollado por lo tanto conocer cómo responderá la población de generarse un peligro volcánico actualmente es incierto. Sin embargo, este estudio propone aportes respecto a las medidas a tomar o acciones a realizar ante la ocurrencia de procesos eruptivos excepcionales del Misti mediante el diseño de etapas de evacuación, puntos de concentración, vías de evacuación y la propuesta de una zona de albergue, complementando y fortaleciendo los planes de contingencia en este distrito.

8.1 Evacuación por peligros volcánicos

La evacuación de un distrito en la ciudad de Arequipa por algún proceso volcánico implica una gran logística y distintas variables condicionadas a la intensidad y tipo de peligro volcánico, en este sentido la orden de evacuación no está circunscrita necesariamente a un tipo de peligro volcánico o intensidad volcánica. Se ha observado que la actividad del volcán Ubinas en 2014 y 2019 ameritó la evacuación de centros poblados cercanos al volcán, considerando que el volcán Ubinas en los últimos años no alcanzó un IEV superior a 2. La evacuación en el distrito de Miraflores podría ser generada a consecuencia del incremento sostenido de la actividad del Volcán Misti, es decir la ocurrencia de sismicidad importante próxima al Misti, deformación del macizo volcánico, explosiones importantes, incremento de anomalías térmicas, entre otros parámetros que sugieran un IEV superior a 2. En esa instancia la entidad técnico científica es decir el Instituto Geofísico del Sur luego de emitir informes oportunos sobre la actividad del Misti proporcionará perspectivas y recomendaciones sobre el alcance del proceso eruptivo y sus peligros volcánicos. Esta información será remitida a las autoridades como el INDECI y realizará la evaluación sobre si es necesaria la evacuación, de aprobarse la evacuación las autoridades de Miraflores en coordinación con las organizaciones competentes de primera respuesta pondrán en acción los

planes de contingencia por la ocurrencia de peligros volcánicos por actividad del Misti.

La Tabla 17 sugiere la evacuación parcial o total de la población del distrito de Miraflores de acuerdo al IEV y tipo de peligro volcánico basado en las zonas de peligro identificadas en los mapas de peligros volcánicos realizados:

Tabla 17. Evacuación y exposición por peligro volcánico.

Indice de Explosividad Volcánica (IEV)	Peligro	Zona de peligro	Evacuación	Exposición	Descripción
1-2 Vulcaniana	Lahares	Alto	NO	SI	Viviendas expuestas en zonas próximas a las quebradas de Miraflores. No requiere evacuación. Requiere acciones de prevención.
		Moderado	NO	SI	Viviendas expuestas en zonas próximas a las quebradas de Miraflores. No requiere evacuación. Requiere acciones de prevención.
	Flujos piroclásticos	Alto	NO	NO	No hay presencia de viviendas expuestas, los flujos no tienen alcance de la zona urbana.
	Flujos de lava	Alto	NO	NO	No hay presencia de viviendas expuestas, los flujos no tienen alcance de la zona urbana.
	Caída de ceniza	Alto	NO	SI	La caída de Ceniza tiene alcance a todo el distrito de Miraflores y distritos vecinos.
		Moderado	NO	SI	La caída de Ceniza tiene alcance a todo el distrito de Miraflores y distritos vecinos.
		Bajo	NO	SI	La caída de Ceniza tiene alcance a todo el distrito de Miraflores y distritos vecinos.
≥3 Sub pliniana a pliniana	Lahares	Bajo	SI	SI	Viviendas expuestas en zonas próximas a las quebradas de Miraflores. Si requiere evacuación. Requiere acciones de prevención.
	Flujos piroclásticos	Moderado	NO	NO	No hay presencia de viviendas expuestas, los flujos no tienen alcance a la población.
		Bajo	SI	SI	Viviendas expuestas, más del 25 % de la población de Miraflores expuesta. Si requiere evacuación.
	Flujos de lava	Moderado	NO	NO	No hay presencia de viviendas expuestas, los flujos no tienen alcance de la zona urbana.
		Bajo	NO	NO	No hay presencia de viviendas expuestas, los flujos no tienen alcance de la zona urbana.
	Caída de ceniza	Alto	SI	SI	Todo el distrito de Miraflores se encuentra expuesto a caídas de ceniza que alcanzarían espesores desde 40 a 100 cm.
		Moderado	NO	SI	Todo el distrito de Miraflores se encuentra expuesto a caídas de ceniza, los espesores decrecen con la distancia. No se requiere evacuación.
		Bajo	NO	SI	Todo el distrito de Miraflores se encuentra expuesto a caídas de ceniza, los espesores decrecen con la distancia. No se requiere evacuación.
	Avalancha de escombros	Alto	NO	NO	No hay presencia de viviendas expuestas, los flujos no tienen alcance a la población.
Moderado		SI	SI	Viviendas expuestas, Pueblos jóvenes más cercanos al Misti. Si requiere evacuación.	
Bajo		SI	SI	Viviendas expuestas, más del 40 % de la población de Miraflores expuesta. Si requiere evacuación.	

Ante un proceso eruptivo del Misti con un IEV ≥ 3 este estudio propone un orden de evacuación agrupando sectores de la población en núcleos urbanos los cuales dada la orden de evacuación deberán reunirse en puntos de concentración seguros donde aguardarán por unidades de transporte para ser evacuados. Se plantea también rutas de evacuación basadas en inspecciones a vías del distrito de Miraflores y consultas con las autoridades del municipio distrital. El destino de las unidades de transporte es una zona de albergue fuera de la ciudad de Arequipa.

El modelo planteado puede ser utilizado en su totalidad o parcialmente de acuerdo a las circunstancias reales de generarse un episodio que amerite la evacuación, también toma en consideración los mapas de peligros volcánicos.

8.2 Etapas de evacuación

La evacuación parcial o total de las zonas afectadas inicia luego de ser emitida la orden, ante esta disposición es que rigen los planes de contingencia previamente desarrollados, este estudio propone etapas de evacuación ante una erupción subpliniana a pliniana (IEV ≥ 3).

Las etapas de evacuación están conformadas por núcleos urbanos que están agrupados de acuerdo a la cantidad de habitantes; también toma en cuenta las características geomorfológicas respetando los límites de urbanizaciones, asociaciones y/o asentamientos humanos a fin de que los afectados logren evacuar ordenadamente (Figura 28). El orden de evacuación considera que la fuente del peligro se encuentra a escasos 10 km al NE de los asentamientos humanos recientemente instalados en las zonas altas de Miraflores y que por su cercanía serían los primeros en ser afectados; también considera la accesibilidad. Se ha observado en muchas ocasiones que hay un solo acceso a los asentamientos humanos de las zonas altas y que es accidentado.

Por estos sectores hay una sola vía por donde pueden circular vehículos que puedan trasladar habitantes. El orden de evacuación inicia con la etapa N° 1 y concluye con la etapa N° 9, el tiempo de evacuación dependerá básicamente del número de unidades y capacidad de pasajeros disponibles.

Se han establecido 9 sectores para el distrito de Miraflores (Tabla 18).

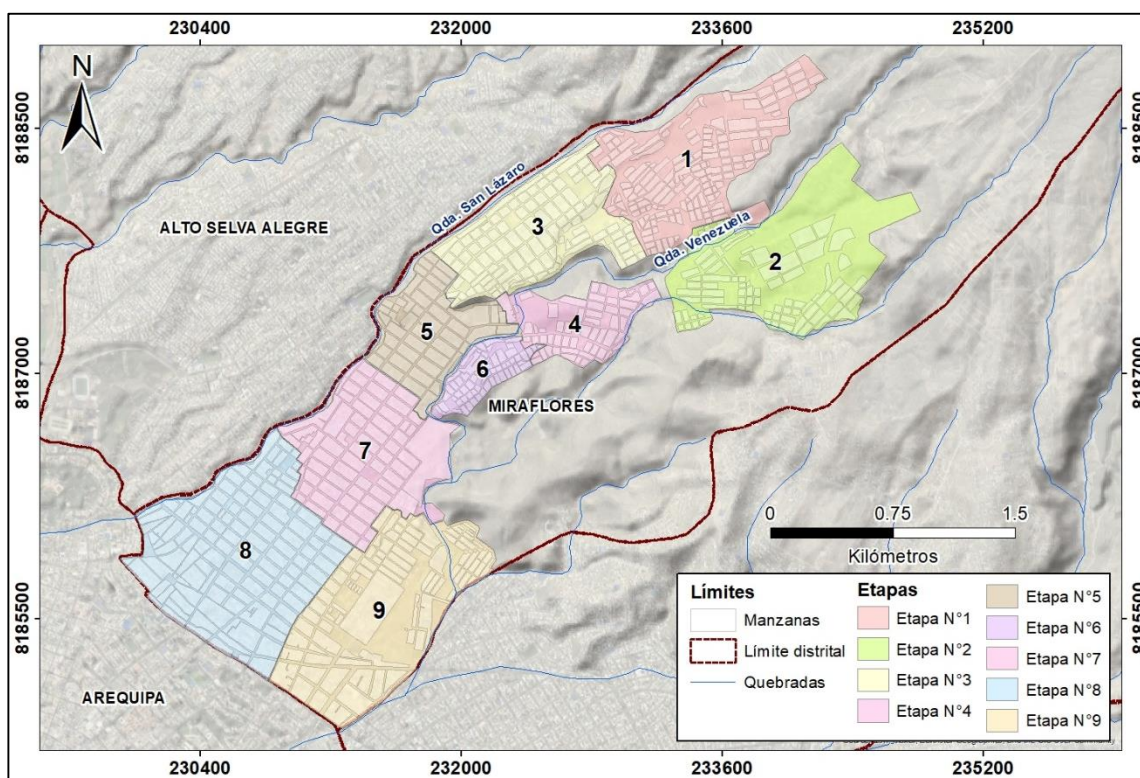


Figura 28. Mapa de etapas de evacuación.

Tabla 18. Sectores que conforman las etapas de evacuación.

Etapa N°	Núcleos Urbanos	Nro. Habitantes
1	AA. HH Estrellas del Misti	186
	AA. HH Los Sauces	33
	Granja Nuevo Amanecer	31
	AA. HH Sr. Los Milagros	276
	P. J Villa El Salvador	246
	P. J Corazón de Jesús	61
	UPIS El Salvador	1, 187
	AA. HH Mateo Pumacahua	756

	AA. HH El Mirador	155
	UPIS Héroes del Pacífico	971
	UPIS Cristo Blanco	374
	TOTAL	4, 276
2	AA. HH Los Girasoles	207
	AA. HH Vista Alegre	267
	Taller granja Los Girasoles	358
	UPIS La Galaxia	1, 137
	TOTAL	1, 969
3	P. J Tomasa Tito Condemayta	1, 445
	Pueblo UPIS Solidaridad	600
	P. J El Porvenir	4, 450
	UPIS Francisco Mostajo	357
	Parque Artesanal	259
	Asoc. Ulrich Neysser	98
	AA. HH Los Claveles	89
	P. J Villa Esperanza	356
	TOTAL	7, 654
4	AUIS Juan Pablo XXIII	1, 840
	P. J Villa Pradera	561
	TOTAL	2, 401
5	P. J Unión Edificadores Misti	4, 643
	Pueblo Miraflores	203
	AA. HH Villa Goyeneche	387
	AA. HH Garcilaso de la Vega	172
	P. J Peñón Alfonso Ugarte	587
	TOTAL	5, 992
6	P. J Villa La Familia	39
	P. J Buen Amanecer	229
	AA. HH Villa Coyllorite	304
	AA. HH Señor de Coyllorite	364
	P. J Tahuantinsuyo	654
	Asoc. Carlos García Ronceros	731
	P. J Los Olivos	94
	Asoc. Sr. de los Milagros	61
	P. J Fuerte Arica	182
	AA. HH Villa Arica	152
	TOTAL	2, 810
7	P. J Unión Edificadores Misti	4, 722
	Urb. Cooperativa 14	2, 936
	Urb. Chapi Chico	704
	AA. HH Terminal Calvario	259
	TOTAL	8, 621

8	Urb. Las Palmeras	1, 081
	Miraflores	16, 258
	TOTAL	17, 339
9	Urb. Alameda Salaverry	5, 418
	Urb. Pedro Ruiz Gallo	950
	Villa Militar	363
	Miraflores	3, 710
	TOTAL	10, 441

8.3 Puntos de concentración (PC)

Son lugares abiertos identificados y clasificados como seguros para las personas en proceso de evacuación por emergencia o desastre para luego ser trasladados a una zona de albergue. Se han identificado 9 puntos de concentración (Tabla 19 y Figura 29) de acuerdo a los 9 sectores seleccionados para las etapas de evacuación. Los puntos de concentración se distribuyen por lugares estratégicos en la zona urbana del distrito de Miraflores. Dado que el peligro tendrá una procedencia de las partes altas en el sector noreste del distrito, se tomó también en consideración la topografía del distrito.

El área total de los puntos alcanza 34,018 m², logrando reunir como máximo a 68,036 habitantes; es decir la capacidad de aforo es más que suficiente para que los habitantes expuestos al peligro puedan permanecer seguros antes de ser trasladados al refugio temporal. Los puntos involucran plazas, estadios, parques y losas deportivas que están ubicados en los núcleos urbanos (Tabla 19).

La implementación de un punto de concentración requiere al menos señalética visible en el punto, bocinas para el llamado a la concentración, la organización de los núcleos urbanos y capacitación a la población y autoridades.

Tabla 19. Puntos de concentración ante una erupción subpliniana a pliniana con IEV 3-4 del Misti, correspondiente al distrito de Miraflores.

Nº	Coordenadas		Altitud msnm	Núcleo urbano	Lugar	Nombre del lugar	Área (m ²)	Aforo capacidad máx. de personas
	Este (m)	Norte (m)						
1	233609	8188069	2711	UPIS Héroes del Pacífico	Área libre y Losa deportiva	Cementerio de Miraflores	2,250	4,500
2	232742	8188139	2607	P. J El Porvenir	Estadio	El Porvenir	7,350	14,700
3	233601	8187539	2653	AA.HH Los Girasoles	Losa deportiva	Los Girasoles	1,250	2,500
4	232126	8187361	2611	AA. HH Unión Edificadores Misti	Estadio	Edificadores Misti	7,300	14,600
5	232764	8187256	2562	AUIS Juan Pablo XXIII, Zona B	Complej o deportivo	Munakuyki	3,000	6,000
6	232114	8186961	2527	AA.HH Señor de Coyllorite	Losa deportiva	Señor de Coyllorite	1,600	3,200
7	231443	8186387	2445	Urb. Cooperativa 14	Parque	Parque del Niño	4,150	8,300
8	230600	8185781	2409	Miraflores	Plaza Principal	Mayta Cápac	9,750	19,500
9	231259	8185383	2409	Urb. Pedro Ruiz Gallo	Plaza de la Infantería	Andrés Avelino Cáceres	6,500	13000

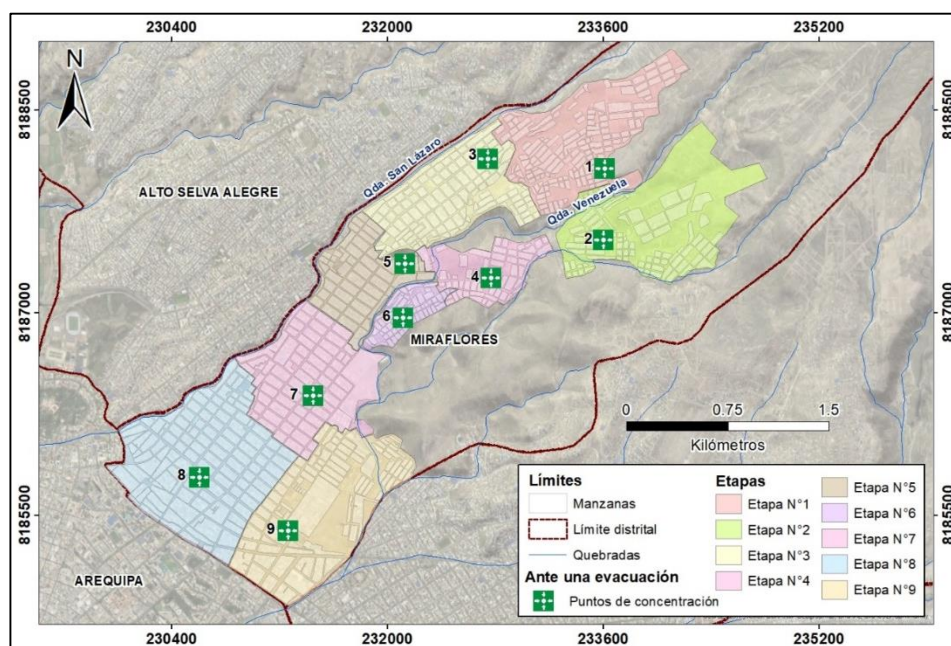


Figura 29. Ubicación de los puntos de concentración.

8.4 Vías de evacuación

Son aquellas rutas o vías que fueron identificadas como seguras a fin de trasladar durante el menor tiempo posible a los habitantes que conforman las 9 etapas de evacuación, siendo el punto de concentración el origen y la zona de albergue, el destino. Para la elección de las vías, se consideró avenidas y calles de rápido recorrido (Figura 30). En la Tabla 20, se resume las 9 rutas identificadas con sus respectivas características (pendiente, recorrido y tiempo de evacuación).

Tabla 20. Rutas de evacuación ante una erupción subpliniana a pliniana con IEV 3-5 del Misti, para el distrito de Miraflores.

PC.	Ruta	Recorrido (km)	Tiempo recorrido (min)
1	El Salvador => Calle Salvador Allende => Calle Caravelí => Calle Ica => Av. San Martín => Calle Tacna y Arica => Av. Tarapacá => Calle Manuel Gonzáles Prada => Calle Calvario => Calle Los Diamantes => Av. Roosevelt => Puente Chilina	5.3	18
2	Prolongación calle Júpiter => Calle Marte => Av. Orión => Av. Juan XXIII => Av. Goyeneche => Calle Tacna y Arica => Av. Tarapacá => Calle Manuel Gonzáles Prada => Calle Calvario => Calle Los Diamantes => Av. Roosevelt => Puente Chilina	4.7	18
3	Av. San Martín => Calle Tacna y Arica => Av. Tarapacá => Calle Manuel Gonzáles Prada => Calle Calvario => Calle Los Diamantes => Av. Roosevelt => Puente Chilina	3	12
4	Av. Juan XXIII => Av. Goyeneche => Calle Tacna y Arica => Av. Tarapacá => Calle Manuel Gonzáles Prada => Calle Calvario => Calle Los Diamantes => Av. Roosevelt => Puente Chilina	4	17
5	Calle Tacna y Arica => Av. Tarapacá => Calle Manuel Gonzáles Prada => Calle Calvario => Calle Los Diamantes => Av. Roosevelt => Puente Chilina	3.3	13
6	Calle La Marina => Jr. Manco Cápac => Calle Alto Perú => Av. Tarapacá => Calle Manuel Gonzáles Prada => Calle Calvario => Calle Los Diamantes => Av. Roosevelt => Puente Chilina	3.0	15

7	Calle Gonzáles Prada => Calle Calvario => Calle Los Diamantes => Av. Roosevelt => Puente Chilina	2.2	5
8	Av. Progreso => Av. Arequipa => Av. 1ero de Mayo => Av. Gutemberg => Av. Roosevelt => Puente Chilina	2.3	8
9	Av. Progreso => Av. Arequipa => Av. 1ero de Mayo => Av. Gutemberg => Av. Roosevelt => Puente Chilina	1.5	9

8.5 Zona de albergue

Corresponde a aquel lugar que está destinado a prestar resguardo a los habitantes del distrito de Miraflores ante la orden de evacuación por la ocurrencia de un evento extraordinario de Misti, como las erupciones de tipo pliniano. El albergue debe ser temporal y cumplir funciones como proporcionar techo, alimentación, abrigo y seguridad los pobladores evacuados (INDECI, 2017) mientras dure la fase crítica de la emergencia.

Se propone una zona de albergue considerando aspectos como la ubicación, es decir, que el lugar no se encuentre expuesto a ningún peligro volcánico y otros de origen natural. También debe tener la capacidad de aforo suficiente para resguardar a todas las familias que evacuen desde el distrito de Miraflores y debe contar con abastecimiento de agua. El albergue sugerido (Figuras 31 y 32) está ubicado en la base aérea de La Joya a 75 km desde el cráter del Misti y aproximadamente a 60 km del distrito de Miraflores. La zona cumple con la capacidad suficiente para resguardar a los 60,589 habitantes del distrito de Miraflores y tiene las siguientes coordenadas geográficas:

- **Latitud:** 193114.00 m E
- **Longitud:** 8141519.00 m S

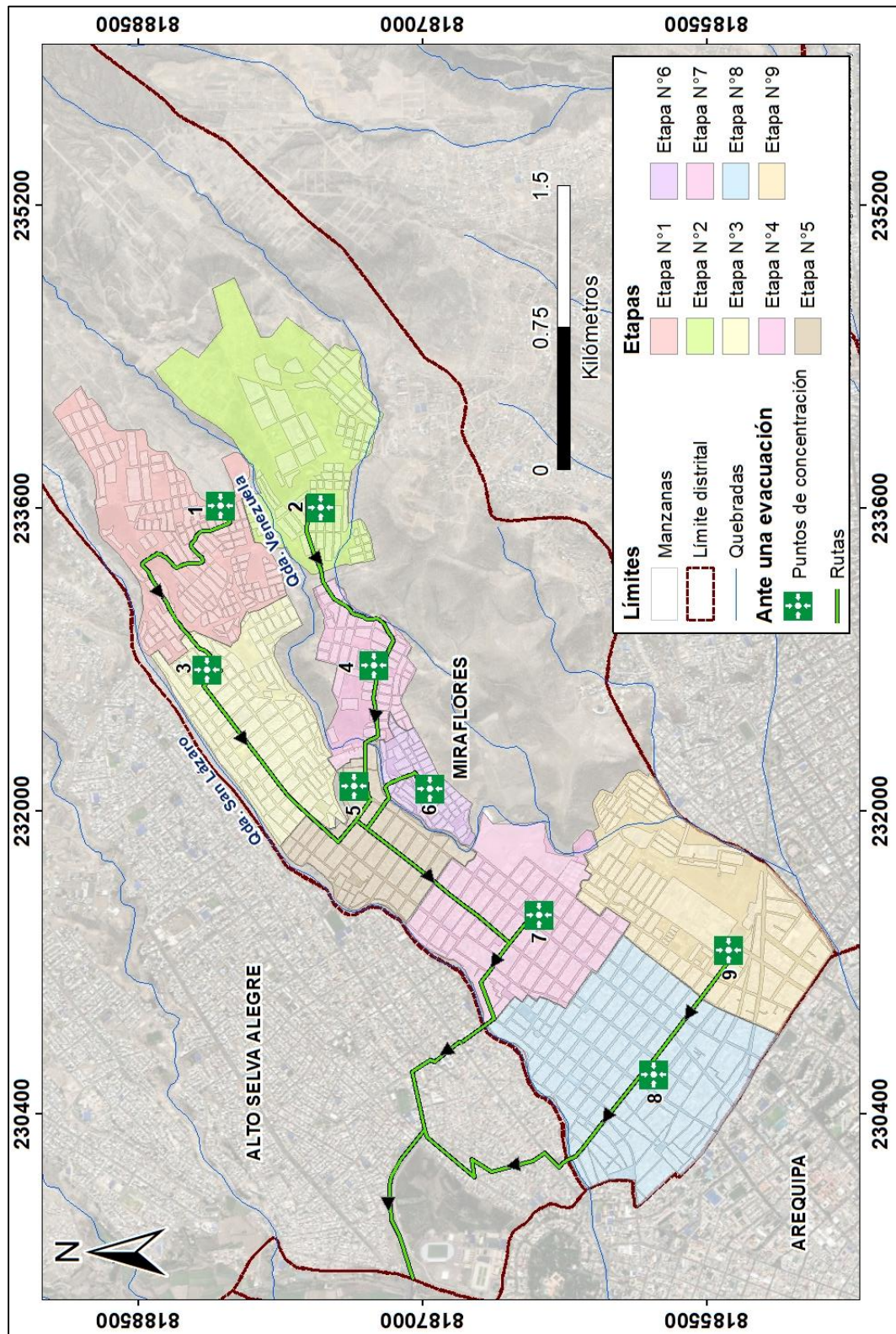


Figura 30. Propuesta de Mapa de puntos de concentración, etapas y vías de evacuación para el distrito de Miraflores Arequipa.



Figura 31. Zona de albergue propuesta para los habitantes del distrito de Miraflores ante una erupción subpliniana a pliniana con IEV 3-4 del Misti.

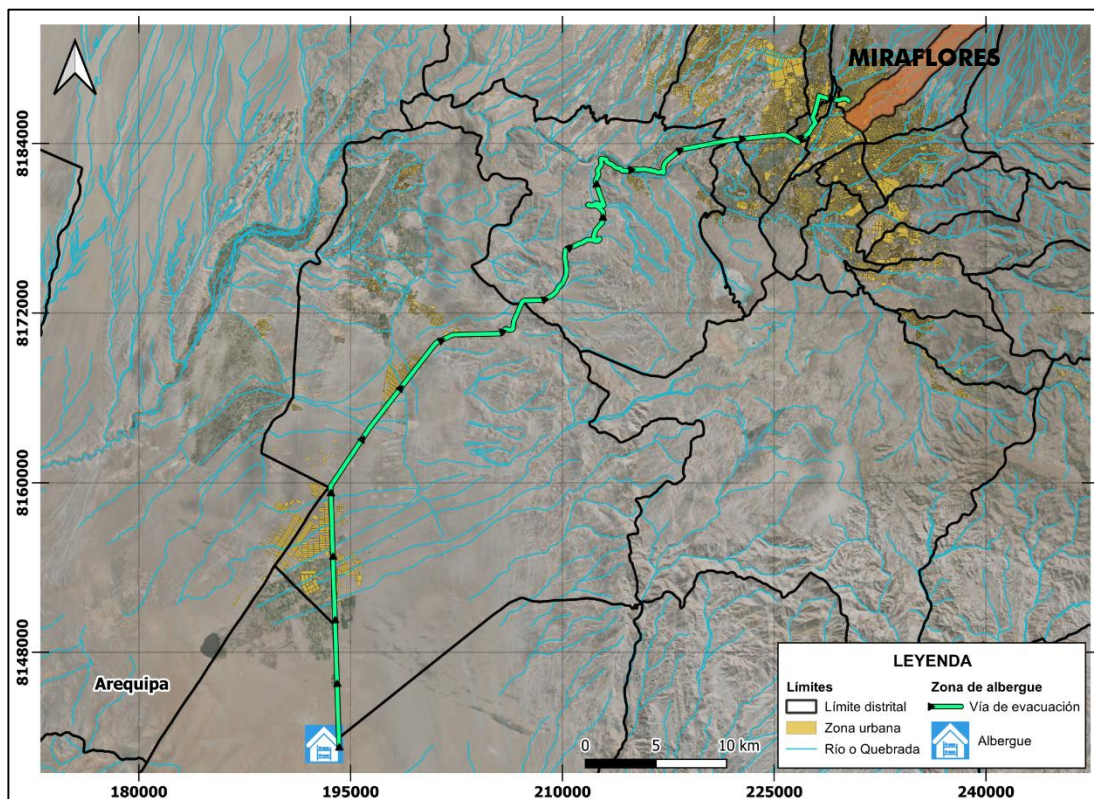


Figura 32.- Ubicación de la zona de albergue.

CONCLUSIONES

- Se han elaborado mapas de peligro volcánico para el distrito de Miraflores considerando escenarios eruptivos de tipo vulcaniano y supliniano a pliniano y emplazamiento de avalanchas de escombros, durante los cuales pueden generarse: flujos piroclásticos, lahares, flujos de lava, caídas de ceniza y avalancha de escombros. Los mapas fueron realizados en base a simulaciones numéricas de datos recolectados en campo, imágenes satelitales, así como estudios de procesos eruptivos anteriores del volcán Misti.
- En el caso de descenso de lahares del Misti en las zonas de peligro alto se han identificado 636 viviendas expuestas y un total de 7,063 habitantes expuestos ante peligro bajo. Ante el descenso de flujos piroclásticos se han identificado 31 sectores expuestos a la zona de peligro bajo con un total de 27083 habitantes expuestos; respecto a las zonas de peligro moderado el flujo no tiene alcance a las zonas urbanas.
- En caso del descenso de avalancha de escombros, en la zona de peligro moderado un total de 14 sectores serían expuestos donde habitan aproximadamente 5,878 personas, y en peligro bajo se identificaron 31 sectores donde habitan aproximadamente 20,085 personas. En referencia a las caídas de ceniza ante la ocurrencia de un proceso eruptivo vulcaniano y de tipo pliniano todo el distrito de Miraflores se encuentra expuesto, así como los distritos próximos al V. Misti. Por otro lado, los flujos de lava no tienen alcance a las zonas urbanas del distrito de Miraflores.
- Ante un escenario de proceso eruptivo de tipo subpliniano a pliniano se ha propuesto un plan de evacuación que consiste en el diseño de 9 sectores que conforman 9 etapas de evacuación, la identificaron

de 9 puntos de concentración como lugares de espera transitoria para el traslado de la población, la identificación de vías de rápido recorrido para la evacuación y la sugerencia de una zona de albergue alejada de la ciudad de Arequipa.

- Considerar que la población de distrito de Miraflores se encuentra expuesta ante la ocurrencia de peligros volcánicos por consiguiente es necesario dar a conocer el presente informe a las autoridades y población en general, así como realizar ensayos sobre las medidas a tomar en un probable proceso eruptivo del Misti; solo así se obtendrán mejoras en la gestión del riesgo volcánico.

- La expansión urbana del distrito de Miraflores esta direccionada hacia el volcán Misti incrementando así su exposición ante peligros volcánicos; es necesario realizar gestiones sobre ordenanzas municipales que impidan esta expansión, así como la edificación de viviendas próximas a las quebradas San Lázaro, Venezuela y tributarias.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, R., Ortega, M., Manrique, N., Apaza, F., Rivera, M., Harpel, C., (2011). Characteristics of beginning of the 2019 eruptive crisis at Ubinas volcano ESSOAr <http://doi.org/10.1002/essoar.10501253.1>
- 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.
- 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.
- Fisher, R. V. (1961). Proposed classification of volcanoclastic sediments and rock, *Geol. Soc. Amer. Bull* 72, 1409-1414.
- Francis, P.W. (1993) – *Volcanoes: a planetary perspective*. New York: Oxford University Press, 443 p.
- 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.
- Glicken, H. (1996) - Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano. U.S. Geological Survey, Open-File Report 96-677, 90 p.
- Harpel, C.J., Cuno, J.J., Cueva, K., Japura, S., Cabrera, M., Soncco, Y., Rivera, M., (2011). Tefroestratigrafía preliminar de erupciones explosivas del volcán Misti (Arequipa, Perú) desde la Autopista y sus implicaciones para los peligros volcánicos. *Foro Internacional: Los Volcanes y su Impacto*, Arequipa, Perú.

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

Hoblitt, R.P.; Walder, J.S.; Driedger, C.L.; Scott, K.M.; Pringle, P.T. & Vallance, J.W. (1995) - Volcano hazards from Mount Rainier, Washington. U.S. Geological Survey, Open File Report 95-273, 10 p.

INDECI. (2017). Instalación y gestión de albergues temporales

INEI. (2018). Resultados Definitivos de los Censos Nacionales. II 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. (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.

Kelfoun, K., Samaniego, P., Palacios, P., and Barba, D. (2009). Testing the Suitability of Frictional Behaviour for Pyroclastic Flow Simulation by Comparison with a Well-Constrained Eruption at Tungurahua Volcano (Ecuador). *Bull. Volcanol.* 71 (9), 1057–1075. doi:10.1007/s00445-009-0286-6.

Zerpa, L., Macedo Franco, L. D., Vargas Alva, K. A., & Cruz Igme, J. E. (2021). Evaluación del peligro por caída de cenizas del volcán Misti y afectación al distrito de Mariano Melgar-Arequipa.

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.

Mastin, L.G., Guffanti, Marianne, Ewert, J.E., and Spiegel, J. (2009), Preliminary spreadsheet of eruption source parameters for volcanoes of the world: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1133, v. 1.2, 25 p. [<https://pubs.usgs.gov/of/2009/1133/>].

Murase T. & McBirney AR (1973) Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures. *Bull Geol Soc Am* 84:3563-3592.

Municipalidad Distrital de Miraflores - Arequipa. (2021). Plan de prevención y reducción del riesgo de desastres 2021.

<https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/14422#:~:text=El%20Plan%20tiene%20como%20objetivo,gesti%C3%B3n%20del%20riesgo%20de%20desastres.>

Patra et al., 2005. A.K. Patra, A.C. Bauer, C.C. Nichita, E.B. Pitman, M.F. Sheridan, M. Bursik, B. Rupp, A. Webber, A.J. Stinton, L.M. Namikawa, C.S. Renschler Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain.

Pitman et al., 2003. E.B. Pitman, C.C. Nichita, A. Patra, A. Bauer, M. Sheridan, M. Bursik Computing granular avalanches and landslides *Phys. Fluids*, 15 (2003), pp. 3638-3646.

Rivera M., Samaniego P., Vela J., Le Pennec J., Guillou H., Paquette JL., Liorzou (2020). The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (southern Peru). <https://doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106787>

Rivera M., Thouret Jean., Samaniego P., Le Pennec J. (2014). The 2006- 2009 activity of the Ubinas volcano (Perú): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores2013.11.010>

Rivera Porras, M. A., Thouret, J. C., & Mariño Salazar, J. (2010). El volcán Misti: actividad eruptiva pasada y evaluación del peligro volcánico.

Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C. & Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407, 107095. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095>

Sheridan et al., 2005. M.F. Sheridan, A.J. Stinton, A. Patra, E.B. Pitman, A. Bauer, C.C. Nichita Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 little tahoma peak avalanches, Mount rainier, Washington

Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J. (2000) - *Encyclopedia of Volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, 1417 p.

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.

- Tavera, H. R. (2014). Zonificación sísmica-geotécnica de la ciudad de Arequipa-Cercado: Provincia de Arequipa-Departamento de Arequipa (comportamiento dinámico del suelo).
- 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.
- 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.
- Thouret, J. C., Arapa, E., Charbonnier, S., Guerrero, A., Kelfoun, K., Cordoba, G., ... & Santoni, O. (2022). Modeling tephra fall and sediment-water flows to assess their impacts on a vulnerable building stock in the city of Arequipa, Peru. *Frontiers in Earth Science*, 10, 865989.
- 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.
- 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.
- Thouret, J. C., Enjolras, G., Martelli, K., Santoni, O., Luque, J. A., Nagata, M., ... & Macedo, L. (2013). Combining criteria for delineating lahar-and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(2), 339-360.
- Thouret, J.C.; Rivera, M.; Worner, G.; Gerbe, M.; Finizola, A.; Fornari, M.; Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 67; 557-589.
- Tilling, R., & Beate, B. (1993). Los peligros volcánicos. Apuntes breves sobre un curso breve. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 2-3.
- Tilling, R.I. (1989). Introduction and Overview. In *Volcanic Hazards*, R.I. Tilling (Ed.). <https://doi.org/10.1029/SC001p0001>.
- Vargas Alva, K. A., Macedo Franco, L. D., Zerpa, L., & Cruz Igme, J. E. (2021). Análisis de los escenarios de peligros volcánicos con origen en el volcán Misti: aplicación al distrito de Mariano Melgar (región Arequipa).

Zerpa, L., Macedo Franco, L. D., Vargas Alva, K. A., & Cruz Igme, J. E. (2021).
Evaluación del peligro por caída de cenizas del volcán Misti y afectación
al distrito de Mariano Melgar-Arequipa.

