



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



Instituto
Geofísico
del Perú

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS CRÍTICOS POR DESCENSO DE LAHARES EN VOLCANES PERUANOS

Informe Técnico N°003-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Febrero, 2021

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Análisis y evaluación de escenarios críticos por descenso de lahares en volcanes peruanos

Autores

Marco Rivera Porras
José Del Carpio Calienes
Hernando Tavera
John Cruz Igme
Katherine Vargas Alva
José Torres Aguilar
Jorge Concha Calle

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

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS CRÍTICOS POR
DESCENSO DE LAHARES CON ORIGEN
EN VOLCANES PERUANOS**

Lima – Perú
Febrero, 2021

RESUMEN

Se analiza las características de los lahares (o flujos de lodo volcánico), con origen en los volcanes Coropuna, Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas y Huaynaputina, ocurridos durante los periodos de lluvia de los años 2017 al 2020, siendo los lahares de los dos últimos años reportados por el CENVUL (IGP) al SINAGERD, autoridades regionales, locales y público en general.

Los lahares han sido recurrentes en el volcán Ubinas, ellos descendieron por la quebrada Volcanmayo causando daños en tramos de la carretera Arequipa-Ubinas-Huarina y erosionando ambos márgenes del río Ubinas. En el volcán Sabancaya de manera periódica se generaron lahares que descendieron por sus flancos sureste (límite del distrito de Lluta) y noroeste, quebradas Huayuray y Hualca Hualca, próximas a las localidades de Pinchollo y Cabanaconde. En el volcán Misti se ha producido el descenso de lahares con dirección a la ciudad de Arequipa, encausados por las quebradas de San Lázaro, Huarangal, río Chili, entre otras. Los lahares recientes ocasionaron daños en viviendas, avenidas y calles de los distritos de Paucarpata y Sabandía. En el caso del volcán Chachani, los lahares han sido recurrentes en la torrentera Chullo, ocasionando daños y destrucción de algunas viviendas construidas en su curso y márgenes (distrito de Yanahuara). En el sector sur del volcán Huaynaputina, el lahar ocurrido en enero de 2020, fue de volumen moderado debido a que arrastró maquinaria pesada que laboraba en la quebrada El Volcán (distrito de Quinistaquillas). En la cima del volcán nevado Coropuna existe un voluminoso casquete glaciar que al desprenderse podría generar lahares y ocasionar daños importante en algunas bocatomas ubicadas en su curso.

Mapas de escenarios críticos por descenso de lahares fueron elaborados para los volcanes Misti, Chachani, Sabancaya, Huaynaputina y Ubinas considerando lahares que presenten volúmenes extremos que podrían afectar a la población y obras de ingeniería. La información obtenida debe ser utilizada para el control de la expansión urbana y construcción de obras de infraestructura y viviendas en zonas donde la ocurrencia de lahares es recurrente.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

2.- LOS LAHARES

2.1.- Tipos de lahares

2.1.1.- Lahares primarios

2.1.2.- Lahares secundarios

2.2.- Lahares y efectos asociados

2.3.- Registro de lahares

3.- LAHARES HISTÓRICOS (2017 – 2020)

3.1.- Lahares en el volcán Coropuna

3.1.1.- Aspectos socioeconómicos

3.1.2.- Lahares históricos

3.1.3.- Escenarios críticos pos lahares

3.2.- Lahares en el volcán Chachani

3.2.1.- Aspectos socioeconómicos

3.2.2.- Lahares históricos

3.2.3.- Escenarios críticos pos lahares

3.3.- Lahares en el volcán Misti

3.3.1.- Aspectos socioeconómicos

3.3.2.- Lahares históricos

3.3.3.- Escenarios críticos pos lahares

3.4.- Lahares en el volcán Sabancaya

3.1.1.- Aspectos socioeconómicos

3.1.2.- Lahares históricos

3.1.3.- Escenarios críticos pos lahares

3.5.- Lahares en el volcán Ubinas

3.1.1.- Aspectos socioeconómicos

3.1.2.- Lahares históricos

3.1.3.- Escenarios críticos pos lahares

3.6.- Lahares en el volcán Huaynaputina

3.1.1.- Aspectos socioeconómicos

3.1.2.- Lahares históricos

3.1.3.- Escenarios críticos pos lahares

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

1.- INTRODUCCIÓN

En la zona andina del sur del Perú, la temporada de lluvias considera los meses de diciembre a marzo, periodo en el cual se desarrollan procesos hidrometeorológicos (inundaciones, desbordes de ríos, etc.) y de remoción de masas (huaicos, lahares, deslizamientos, derrumbes, etc.). De estos procesos, los lahares (o flujos de lodo volcánico) se originan en el entorno de la estructura de los volcanes activos y potencialmente activos como el Coropuna, Sabancaya, Misti y Ubinas. Estos flujos, compuestos por sedimentos volcánicos y agua, se constituyen como uno de los fenómenos de mayor peligro para áreas urbanas, vías de comunicación, canales de agua, terrenos de cultivo, puentes entre otros ubicados en las inmediaciones de los volcanes y en ambas márgenes de las quebradas y valles que se han formado en las faldas de estos colosos.

Estudios recientes estiman que la población que podría verse afectada por lahares que se originan en los volcanes Misti, Ubinas, Huaynaputina, Coropuna, Chachani y Sabancaya, sería del orden de 50 mil personas que habitan en las regiones de Arequipa y Moquegua (ANA, 2017). Por lo tanto, el monitoreo permanente del comportamiento dinámico y efectos asociados de estos volcanes es de gran importancia para dar alertas que permitan reducir el riesgo al cual se encuentra expuesta la población y su infraestructura. En ese sentido, el monitoreo que realiza el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), servicio oficial del Estado peruano implementado y administrado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), es clave para suministrar información oportuna para la gestión del riesgo de desastres por la ocurrencia de lahares.

El CENVUL analiza permanentemente los datos provenientes en tiempo real de la red geofísica de monitoreo volcánico (estaciones sísmicas, geodésicas, geoquímicas y cámaras de video) que integra a 12 volcanes

activos y potencialmente activos del sur peruano: Sara Sara, Cerro Auqui huato, Coropuna, Sabancaya, Misti, Chachani, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane y Casiri. La información que se genera, permite conocer el comportamiento dinámico de estos volcanes, así como registrar el descenso de lahares que se producen en las inmediaciones del Misti, Ubinas, Sabancaya, Coropuna y Huaynaputina. La detección temprana de estos lahares ha permitido al CENVUL emitir alertas oportunas a las instituciones y autoridades del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD) con el fin de poner en salvaguarda a las poblaciones expuestas a este peligro y efectos asociados.

En el presente informe se detallan las características de los lahares ocurridos entre los años 2017 a 2020 con origen en los volcanes Coropuna, Sabancaya, Chachani, Ubinas, Misti y Huaynaputina (Figura 1), con el objetivo de poner en conocimiento de las autoridades el peligro que representan estos fenómenos y así, desarrollar actividades que permitan reducir el riesgo al cual se encuentran expuestas la población y las infraestructuras.

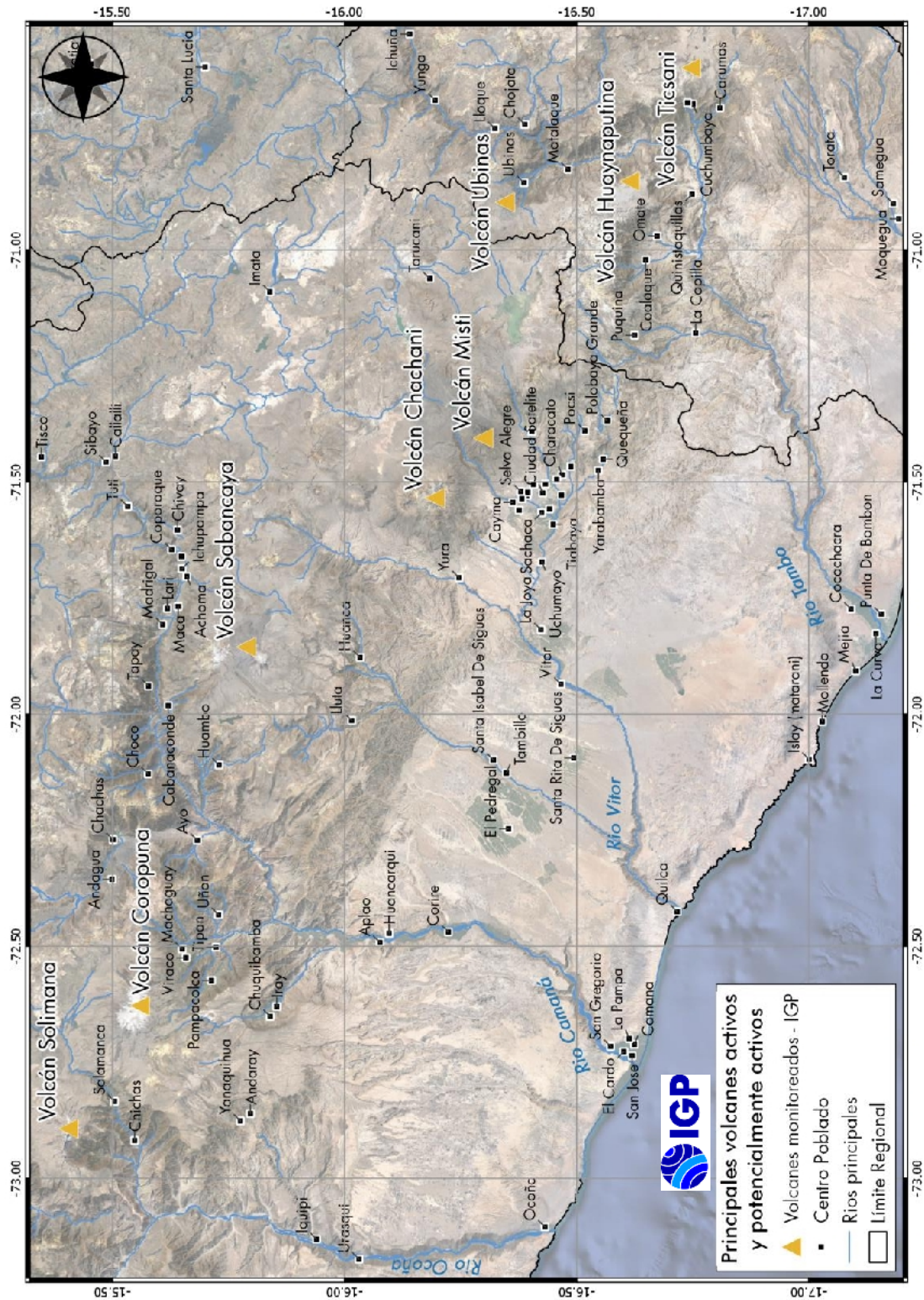


Figura 1.- Mapa de ubicación de los volcanes Coropuna, Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas y Huaynaputina.

2.- LOS LAHARES

Los lahares o flujos de lodo son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizadas por agua a velocidades de 20 a 60 km/h por valles y quebradas que drenan de los volcanes. Se generan en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica (Tilling, 1989) y en este caso, debido a la ocurrencia de fuertes lluvias, fusión de hielo o nieve, ríos o lagunas cratéricas. En general, la distancia de recorrido de los lahares dependerá de la pendiente del terreno, la cantidad de agua involucrada y el volumen de material disponible a ser erosionado o removible.

La mayoría de volcanes activos de los Andes peruanos dan origen a este tipo de peligro, ya que en los meses diciembre a marzo ocurren lluvias en sus inmediaciones que remueven el material volcánico depositado, después de erupciones pasadas, generando lahares o flujos de lodo volcánico. Asimismo, algunos de estos volcanes presentan cumbres con casquetes glaciares como el volcán Coropuna en Arequipa, que en el caso de una erupción efusiva y/o explosiva, los productos volcánicos calientes pueden interactuar con la nieve o hielo y generar lahares.

2.1. Tipos de lahares

Los lahares, basados en su origen y si están directa o indirectamente relacionados con una erupción volcánica, pueden ser clasificados como primarios y secundarios.

2.1.1. Lahares primarios

Los lahares primarios se producen cuando los flujos piroclásticos ($T > 60^{\circ}\text{C}$) generados durante erupciones explosivas irrumpen el cauce de las quebradas o ríos que drenan de un volcán. Estos flujos remueven los

productos eruptivos acumulados en los flancos del volcán para dar origen a los lahares que descienden por las pendientes del cono volcánico y arrastran todo a su paso. Los lahares primarios tienden a ser muy voluminosos (10^7 a 10^9 m³) y debido a que se desplazan a velocidades >20 m/s (Mothes y Vallance, 2015), tienen la capacidad de alcanzar grandes distancias desde el volcán.

2.1.2.- Lahares secundarios

Estos lahares se producen después de días, meses o años de terminado el proceso eruptivo de un volcán. Son parte de este grupo, los lahares generados por precipitaciones pluviales, como los que ocurren en temporadas de lluvia y que remueven con facilidad los materiales volcánicos no consolidados y depositados durante erupciones previas.

Estos lahares pueden crecer en magnitud y ser recurrentes, lo que hace que sean difíciles de anticipar (Vallance y Iverson, 2015). Su volumen y descarga está limitada por la intensidad y duración de la precipitación pluvial, así como de la cantidad del material disponible a ser incorporado. Su volumen está en el rango de 10^4 a 10^6 m³ y su descarga en el orden de 10^2 a 10^3 m³/s y cuando ocurren alcanzan distancias menores de 10 km (Mothes y Vallance, 2015).

2.2.- Lahares y efectos asociados

Los lahares se desplazan por quebradas y ríos y, eventualmente, pueden salir de sus cauces destruyendo todo a su paso, incluso generar inundaciones (Tilling, 1989). En general, el área afectada dependerá del volumen de agua y de materiales sueltos disponibles, así como de la pendiente y topografía de los valles o quebradas.

Según la información histórica, los lahares ocurridos en todo el mundo entre los años 1720 y 2001, han ocasionado la muerte de aproximadamente 37,000 personas (Kelvin, 2000). El mayor desastre ocasionado por un lahar ocurrió el 13 de noviembre de 1985 en Armero (Colombia). En aquel entonces, luego de producirse una erupción explosiva moderada del volcán Nevado del Ruiz (Figura 2), se generó un flujo piroclástico que produjo un lahar que sepultó a la ciudad de Armero, causando la muerte de más de 23 mil personas (Naranjo et al., 1986; Thouret, 1990).



Figura 2.- Lahar del Nevado del Ruiz que sepultó la ciudad de Armero, Colombia, en noviembre de 1985 (Foto de R. Janda y N. Banks).

Según Thouret et al (2019), los lahares producen pérdidas directas que involucran a los efectos físicos sobre los individuos (muerte o lesiones) o infraestructura (reducción de la funcionalidad, remoción, etc.) y pérdidas indirectas que considera a los efectos sobre la funcionalidad de la sociedad por daños a los servicios públicos o negocios locales, pérdida de ingresos y empleos, aumento de los costos de vida, etc. En la Tabla 1 se detalla los lahares más importantes ocurridos en el mundo.

Tabla 1. Principales lahares ocurridos en el mundo (Kelvin, 2000).

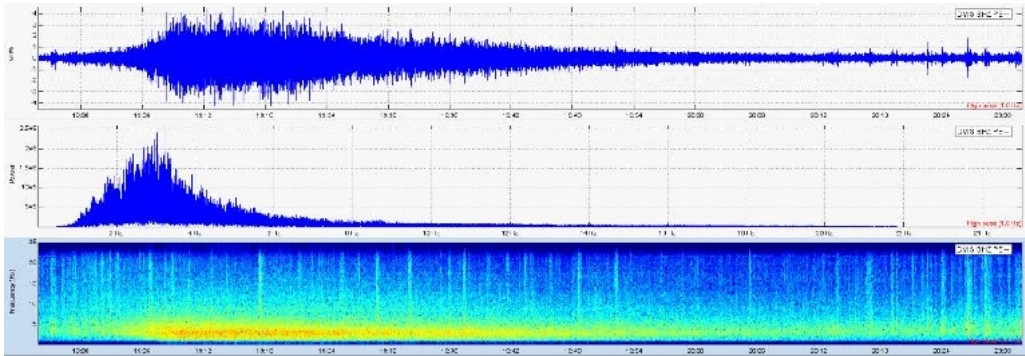
VOLCÁN	PAÍS	AÑO	N° DE VÍCTIMAS
Asama	Japan	1783	550
Galunggung	Indonesia	1822	3600
Awu	Indonesia	1892	1530
Cotopaxi	Ecuador	1877	1000
Kelut	Indonesia	1919	5110
Nevado Ruiz	Colombia	1945	1000
Ruapehu	New Zealand	1953	151
Agung	Indonesia	1963	200
Nevado Ruiz	Colombia	1985	23 000
Parker	Filipinas	1995	500

2.3.- Registro de lahares

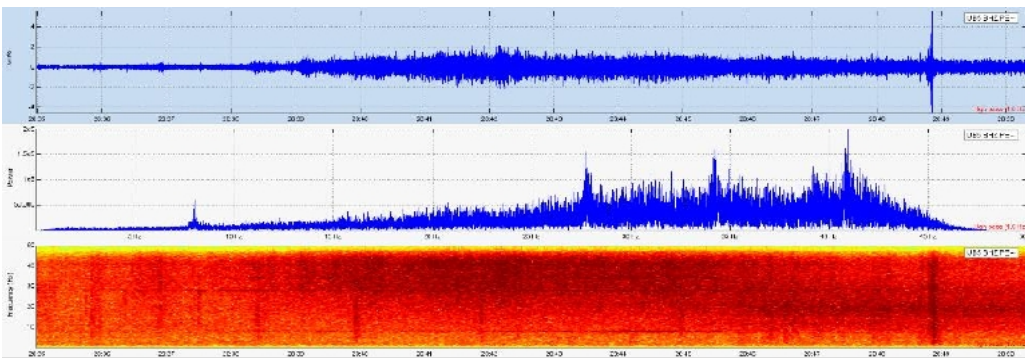
Según el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) a cargo del Instituto Geofísico del Perú (IGP), a la ocurrencia de un lahar, primario o secundario, se producen vibraciones continuas del suelo que son registradas por sensores sísmicos por varios minutos, presentando el registro la típica señal que caracteriza a los tremores, pero con frecuencias mayores a 5 Hz (Figura 3) durante el registro de sus picos máximos (Del Carpio et al., 2017). Esta característica permite discriminar el registro de señales asociados a lahares a fin de generar las alertas a ser enviadas al SINAGERD, así como a las autoridades locales, regionales para la toma de decisiones orientadas a reducir el riesgo a la cual se encuentra expuesta la población.

La red de monitoreo geofísico en volcanes del IGP incluye, sensores sísmicos ubicados muy próximos a las quebradas principales que descienden de los volcanes hacia los centros poblados o ciudades: Coropuna, Sabancaya, Misti, Ubinas y Huaynaputina. Los datos obtenidos de estos sensores han permitido monitorear la ocurrencia de lahares y emitir alertas oportunas a las autoridades locales, regionales y nacionales, además de la población.

Volcán Misti, lahar registrado el 27 de enero de 2019 a 18:47 HL



Volcán Ubinas, lahar registrado el 10 de febrero de 2019 a 15:35 HL



Volcán Ubinas, lahar registrado el 12 de febrero de 2019 a 15:04 HL

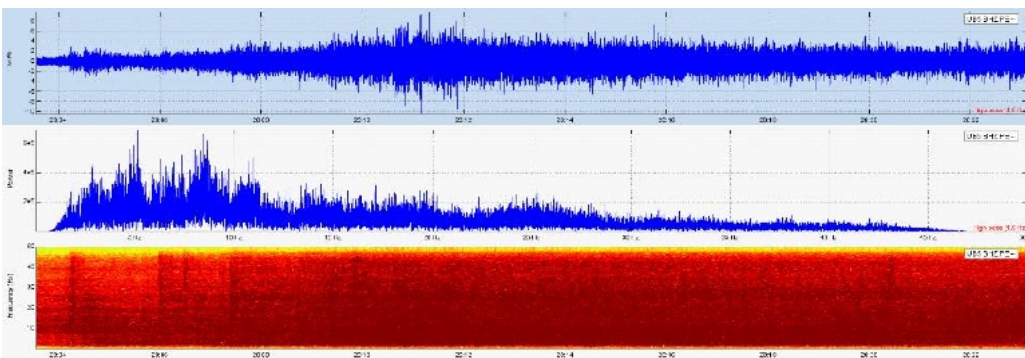


Figura 3.- Señales sísmicas, espectros de frecuencias y espectrogramas de lahares registrados por la red geofísica de monitoreo volcánico (CENVUL) durante el verano del año 2019: volcanes Misti y Ubinas.

3.- LAHARES HISTÓRICOS (2017 – 2020)

A continuación se realiza la descripción de las principales características que presentaron los lahares ocurridos en los volcanes Coropuna, Chachani, Misti, Sabancaya, Ubinas y Huaynaputina durante el periodo 2017 y 2020, con énfasis en aquellos para los cuales se cuenta con información proveniente de la red geofísica de volcanes a cargo del Instituto Geofísico del Perú (CENVUL).

3.1.- Lahares en el volcán Coropuna

El volcán nevado Coropuna ($15^{\circ}31'S$, $72^{\circ}39'O$, 6377 m s. n. m.) se encuentra a ~ 152 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, cerca al extremo septentrional de la Zonal Volcánica Central (ZVC) de los Andes. Es el volcán más alto con presencia de una gran cobertura glaciar, la más importante de todos los volcanes de la región sur del país y probablemente, en toda la región tropical del mundo (Figura 4).



Figura 4.- Volcán Coropuna, ubicado entre las provincias de Castilla y Condesuyos, región Arequipa

El Coropuna es uno de los 16 volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú. En su cima alberga un casquete glaciar de 44.1 km² (Kochtitzky et al., 2018) que representa la mayor reserva de agua en este sector de los Andes y que beneficia a más de 90 mil personas que habitan en las zonas de influencia del volcán (INEI, 2018).

3.1.1.- Aspectos socioeconómicos

En el area del volcán Coropuna, específicamente dentro de un radio de 30 km del complejo volcánico, habitan alrededor de 6047 personas asentadas en los distritos de Andahua, Chichas, Chuquibamba, Machaguay, Pampacolca, Salamanca, Tipán, Uñon y Viraco (INEI, 2018), los que pertenecen políticamente a las provincias de Castilla y Condesuyos en la región Arequipa. Esta población se dedica principalmente a la actividad agrícola y ganadera.

En áreas aledañas al nevado Coropuna existen obras de infraestructura que podrían ser afectadas por los flujos de lahares, como por ejemplo:

- La represa río Blanco (principal fuente de agua y energía para la localidad de Pampacolca).
- Empresa Minera Yanaquigua
- La carretera asfaltada Arequipa – Aplao - Chuquibamaba
- La carretera afirmada Arequipa - Aplao – Pampacolca - Cotahuasi
- La carretera afirmada Arequipa – Aplao – Viraco – Andagua - Orcopampa

Asimismo, podrían ser afectados 64 instituciones educativas y 13 establecimientos de salud.

3.1.2.- Lahares históricos

Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el 22 de diciembre de 2016 ocurrió un lahar de volumen importante en el sector sur del volcán Coropuna, afectando la zona conocida como “Nevados” (Figura 5) y según los datos tomados de la estación Huatiapa, en el río Majes se habría incrementado el caudal hasta un volumen de 18 m³/s.



Figura 5.- Vista de la zona de “Nevados” afectada por los lahares. Fotografía: ANA.

Estudios posteriores, mostraron que los desprendimientos de hielo ocurrieron en el flanco suroeste del complejo volcánico, en la cabecera de la quebrada Antaura (Figura 6), que nace en el límite entre los edificios volcánicos Coropuna y Paiche. De acuerdo a los datos cartográficos (mapa geológico y geomorfológico), en la zona se identifica la presencia de flujos de lava erosionados por la actividad glacial y voluminosos depósitos morrénicos, no consolidados, los cuales se constituyen como materiales disponibles para ser arrastrados por las corrientes de agua.

El lahar del 22 de diciembre, ocasionó daños en bocatomas y canales de agua de las localidades de Tipán, Pampacolca y Viraco, además de

pérdida de zonas de pastoreo por afectación del bofedal “Los Nevados” (Figura 6) (<https://andina.pe/agencia/noticia-deshielos-del-nevado-coropuna-causan-huaico-afecto-canales-riego-646222.aspx>).



Figura 6.- Vista de la quebrada Antaura afectada por los lahares (Fotografía: ANA).

3.1.3.- Escenarios críticos por lahares

Del análisis bibliográfico y datos de campo, se ha identificado la existencia de hasta 28 quebradas que podrían activarse en caso se generen lahares en el volcán Coropuna; por lo tanto, es de importancia generar escenarios teóricos que permitan evaluar el peligro que estos representan. Para el volcán Coropuna se ha elaborado el mapa de escenarios críticos por el descenso de lahares utilizando el programa LAHARZ (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). Este algoritmo permite correlacionar el volumen de un evento lahárico y el área planimétrica en una sección transversal inundada por un lahar. Los volúmenes de lahares o flujos de barro considerados para la construcción numérica de los escenarios críticos son de 2 Mm^3 , 10 Mm^3 y 20 Mm^3 , y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.

- **Escenario 1** (sobre las quebradas, áreas de color rojo). En este escenario se considera la generación de lahares o flujos de barro con volúmenes menores de 2 Mm³ con origen en la desglaciación del volcán Coropuna o por precipitaciones pluviales intensas. El lahar tendría un alcance aproximado de 22 km y discurriría por las quebradas que descienden por la zona de Tipan y Jollpa. En su recorrido, los poblados de Palljaruta, Rituy, Yato, Cotcota y Paracolca podrían ser afectados. Asimismo, algunos tramos de las carreteras afirmadas Capiza-Pampacolca, Capiza-Viraco, Chuquibamba-Salamanca, Chuquibamba-Cotahuasi y la carretera Pampacolca-Maucallacta-Andahua. Igualmente, están en esta zona varios canales de regadío ubicados a lo largo del valle de Pampacolca y Tipan.
- **Escenario 2** (sobre las quebradas, áreas de color naranja). En este escenario se considera la generación lahares con volúmenes moderados del orden de 10 Mm³ y que afectarían a áreas urbanas como Sullunja, Sora Kcasa, Iray, Salamanca, Tipan, Maucallacta, Yachanguillo, Santa Catalina, Andamayo, Ongoro y Quicay. Además, de algunos tramos de las carreteras Andamayo-Tipan, Acoy-Iray-Chuquibamba y Chuquibamba-Andaray-Yanaquihua
- **Escenario 3** (sobre las quebradas, áreas de color amarillo). En este escenario se considera la generación de lahares de gran volumen (20 Mm³) y de presentarse, alcanzarían distancias mayores o iguales a 50 km desde el volcán pudiendo represar el río Majes y generar lahares secundarios que afectarían los valles de Majes (Aplao, Corire) y Ocoña, así como las instalaciones de la minera Yanaquihua. También podrían afectar los poblados de Chichas, Arhuin, Viraco, San Antonio, Huami y Acoy. En general, la posibilidad de ocurrencia de estos lahares es muy baja, ya que se producirían por el derrumbe de una parte del casquete glaciario o por la erupción del volcán Coropuna.

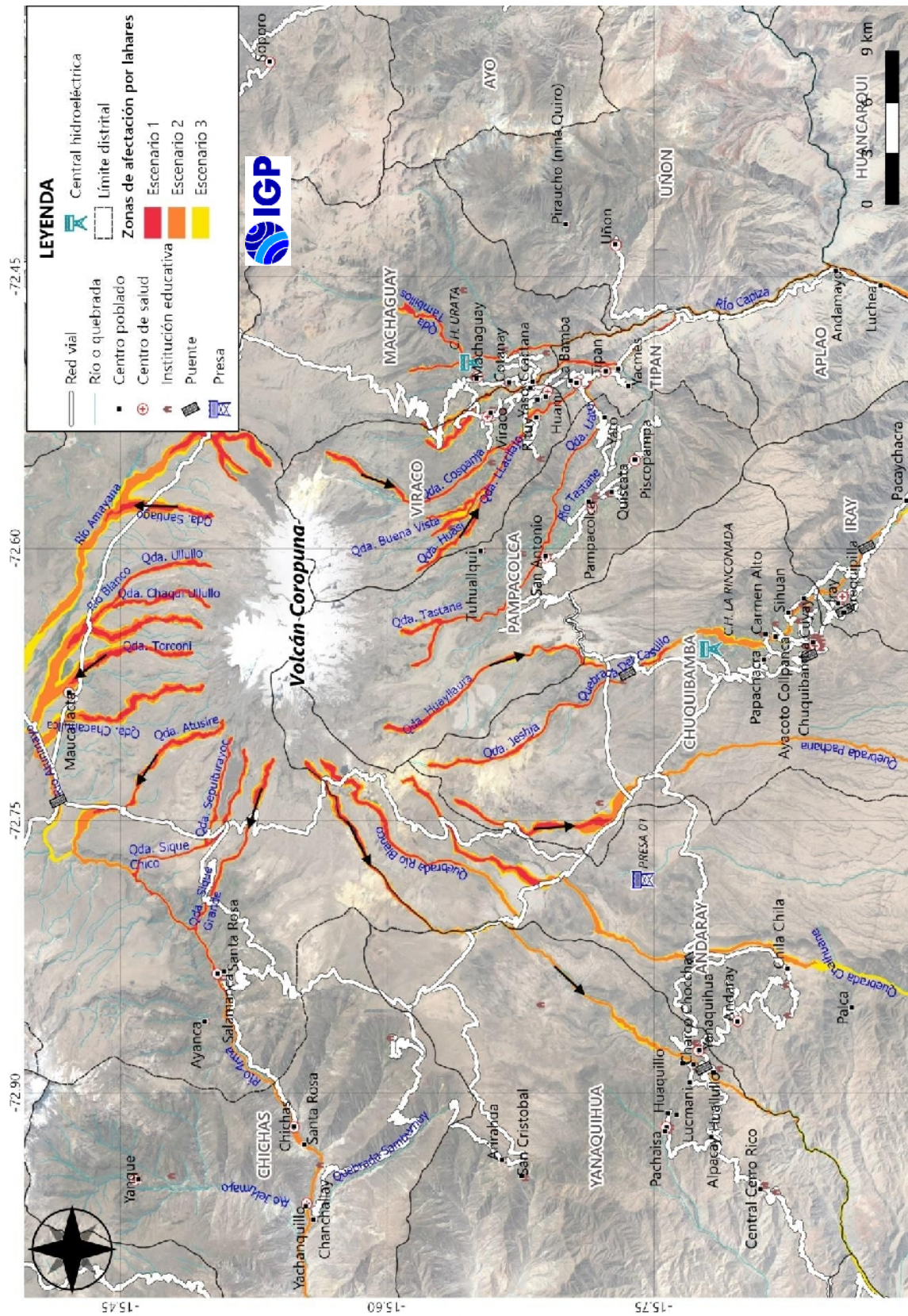


Figura 7.- Mapa de zonificación de escenarios críticos por descenso de lahares en el volcán Coropuna.

3.2.- Lahares en el volcán Chachani

El volcán Chachani se encuentra ubicado a 22 km al noroeste del centro histórico de la ciudad de Arequipa (Figura 8) y es considerado como un volcán potencialmente activo debido a que presentó actividad eruptiva anterior al Holoceno (>11,000 años) y el Pleistoceno. El Chachani fue construido sobre secuencias ignimbríticas denominadas "Río Chili", "La Joya", "Aeropuerto de Arequipa" y "Tufo Yura", las cuales se emplazaron entre el Mioceno y el Pleistoceno (13.19 a 1.02 millones de años) (Paquereau-Lebti et al., 2006).



Figura 8.- Volcán Chachani, provincia y región Arequipa

En la última década, debido a la migración de las zonas rurales o zonas alto andinas, se ha incrementado el número de asentamientos humanos en las cercanías y en las quebradas que descienden del volcán Chachani. Este volcán, actualmente "dormido", tiene aún el potencial de generar un proceso eruptivo que afectaría a las áreas pobladas distribuidas en su entorno. En el pasado, el volcán Chachani ha generado voluminosos depósitos de tefras y flujos piroclásticos, así como la ocurrencia de lahares que evidencian la elevada magnitud de sus procesos eruptivos, algunos más violentos que los asociados al volcán Misti. Depósitos de lahares recientes y

pasados son visibles en las quebradas existentes al pie del flanco sur del volcán Chachani.

3.2.1- Aspectos socioeconómicos

En un radio de 30 km desde el cráter del volcán Chachani, se encuentran los distritos de Alto Selva Alegre, Arequipa, Cayma, Cerro Colorado, Mariano Melgar, Yanahuara, Sachaca, Tiabaya, Uchumayo y Yura, todos dentro de la provincia y región Arequipa. Estos distritos albergan en total una población aproximada de 995,115 personas dedicadas al comercio, la industria, energía y agricultura.

Asimismo, dentro de esta área se ha identificado la existencia de 2032 instituciones educativas y 88 establecimientos de salud. Además, a 16 km al sur del Chachani se encuentra el aeropuerto internacional Alfredo Rodríguez Ballón y vías de comunicación como la ruta PE-34A (repartición del km 48-Juliaca) y la ruta PE-34C (desvío Chiguata-Santa Lucia).

3.2.2.- Lahares históricos

Lahares ocurridos en 2018: El 15 de febrero las fuertes lluvias ocurridas en las laderas del volcán Chachani generaron un flujo de lodo que descendió por la Quebrada de Añashuayco, ubicada en el distrito de Cerro Colorado (Figura 9). Flujos secundarios descendieron por algunas torrenteras de este distrito inundando la Avenida Vía-54 y la Villa Magisterial, situación que ocasionó el desborde de la torrentera El Nazareno en el mismo distrito. Igualmente, varias quebradas en la parte alta de Cayma también se activaron. Asimismo, se produjo el ingreso de flujos de lodo en los distritos de Sachaca y Yanahuara (Figura 10), donde la torrentera Chullo aumentó su caudal y originó preocupación entre los residentes que habitan próximo a su cauce. En el distrito de Sachaca, la avenida Fernandini quedó bloqueada por el desborde de la torrentera Chullo.



Figura 9.- Quebrada en Cerro Colorado afectada por lahares provenientes del volcán Chachani en febrero de 2018.

Lahares ocurridos en 2020: El 13 de marzo nuevamente se activó la quebrada Añashuayco debido a las intensas lluvias registradas en inmediaciones del volcán Chachani (Figura 11), transportando flujos acompañados de fragmentos de roca que arrasó con todo lo que encontró a su paso; por ejemplo, materiales de la cantera de sillar y herramientas de los trabajadores que laboran en la denominada “Ruta del Sillar”. La quebrada Añashuayco es conocida debido a que sus paredes constituyen las canteras de sillar, material de origen volcánico usado en la arquitectura de Arequipa.



Figura 10.- Quebrada en Yanahuara afectada por flujos de lodo en febrero de 2018.



Figura 11.- Imágenes del flujo de lodo que se desplaza sobre por la quebrada Añashuayco.

3.2.3.- Escenarios críticos por lahares

Del análisis bibliográfico y datos de campo, se ha identificado las principales quebradas por las cuales podrían discurrir flujos de lodo provenientes del volcán Chachani (sector sur): quebradas Los Andenes, Estanquillo-Añashuayco, Azufral, Pastoraiz y la torrentera Chullo. Por su extremo noroeste, las quebradas drenan los flujos hacia el río Yura constituyéndose como un peligro importante que pone en riesgo a mayor cantidad de población.

Para el volcán Chachani se ha elaborado el mapa de escenarios críticos por descenso de lahares utilizando el programa LAHARZ_py (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998), el mismo que permite correlacionar el volumen de un evento lahárico y el área planimétrica en sección transversal inundada por un lahar. Para este objetivo se ha considerado flujos con volúmenes de 2 Mm³, 5 Mm³ y 9 Mm³ de acuerdo a lo indicado por Alavi (2020) los resultados obtenidos se muestran en la Figura 12:

- **Escenario 1** (sobre las quebradas, áreas de color rojo). En este escenario se considera la generación de flujos de lodo con volúmenes

de 2 Mm³ que discurren por las quebradas que drenan por el flanco sur del volcán, siendo su probabilidad de ocurrencia alta sobre todo durante periodos de lluvias intensas. Estos lahares tendrían un alcance aproximado de 13 km y podrían afectar viviendas de algunos asentamientos humanos y urbanizaciones ubicados en los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura y Yanahuara: Alto Cayma, Nazareno, Montoneros, San Miguel, Zamácola, La Tomilla, Acequia Alto Chilina, Carmen Alto, Santa Luisa, Galendulas, Umacollo, La Victoria, Las Flores, Las Canteras, Virgen de Chapi, Granjeros Unidos, Ciudad Municipal, Río Seco, Los Camineros, Apipa, Cuesta Blanca, San Jancinto, Tambillo, La Rinconada, Piedra Grande, Los Milagros y Las Laderas.

- **Escenario 2** (sobre las quebradas, áreas de color naranja). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 5 Mm³ que discurren por las quebradas que drenan por el flanco sur del volcán, causados por las precipitaciones pluviales intensas y/o por una posible erupción del volcán Chachani. Estos lahares podrían tener un alcance aproximado de 20 km y afectarían viviendas y avenidas de diferentes asentamientos humanos y urbanizaciones ubicados en los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura, Yanahuara y Sachaca: Alto Cayma, Nazareno, Montoneros, San Miguel, Zamácola, La Tomilla, Acequia Alto Chilina, Carmen Alto, Santa Luisa, La Victoria, Las Flores, Las Canteras, Virgen de Chapi, Granjeros Unidos, Ciudad Municipal, Río Seco, Los Camineros, Apipa, Cuesta Blanca, San Jancinto, Tambillo, Uchumayo, La Rinconada, Piedra Grande, Los Milagros, Las Laderas, Umacollo, Montevello, Vallecito y Socosani..

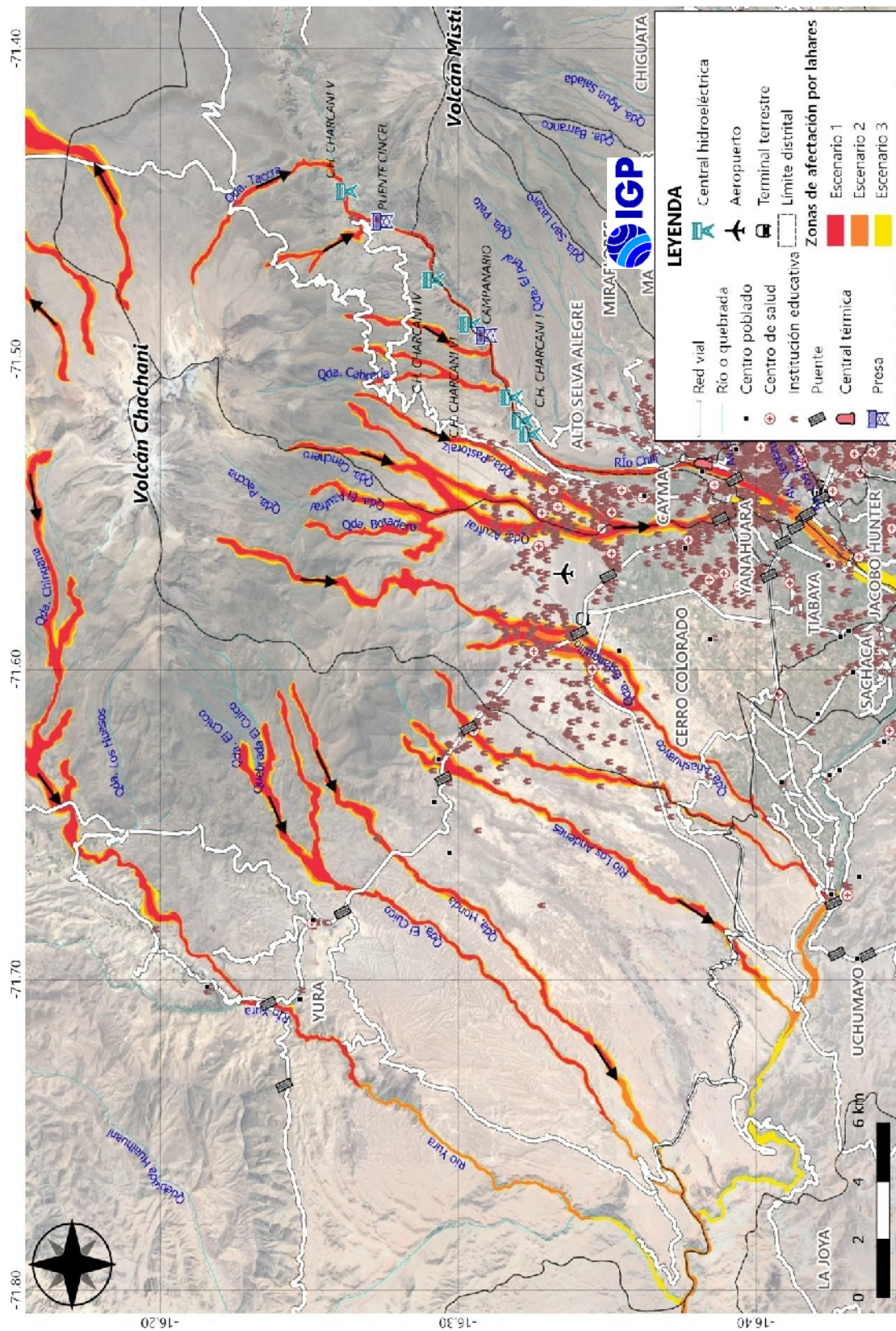


Figura 12.- Mapa de zonificación de escenarios críticos por descenso de lahares en el volcán Chachani.

- **Escenario 3** (sobre las quebradas, áreas de color amarillo). Considera la ocurrencia de lahares de gran volumen (9 Mm^3) que discurren por las quebradas y valles hasta alcanzar distancias mayor o igual a 40 km. Este escenario es poco probable de presentarse, pero si lo hace afectaría a los asentamientos humanos y urbanizaciones de los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura, Yanahuara, Sachaca, Tiabaya y Uchumayo: Alto Cayma, Nazareno, Montoneros, San Miguel, Zamácola, La Tomilla, Acequia Alta Chilina, Carmen Alto, Santa Luisa, Galendulas, La Victoria, Las Flores, Las Canteras, Virgen de Chapi, Granjeros Unidos, Ciudad Municipal, Río Seco, Los Camineros, Apipa, Cuesta Blanca, San Jancinto, Tambillo, Uchumayo, La Rinconada, Piedra Grande, Los Milagros, Las Laderas, Umacollo, Montevello, Vallecito, Mollebaya Chico, Mollebaya Grande y Socosani, La Aparecida, Alata, Tingo Grande y Alto Cerro Verde.

3.3.- Lahares en el volcán Misti

El volcán Misti es potencialmente activo y su cráter se encuentra a una distancia de 17 km del centro de la ciudad de Arequipa (Figura 13). Es un estratovolcán que se emplazó hace menos de 833,000 años AP (Thouret et al., 2001) y durante los últimos 50 mil años, ha generado un gran número de explosiones de diferente grado para dejar visible en superficie cerca de 10 depósitos de flujos piroclásticos y 20 de caídas de pómez y ceniza. La última erupción de gran magnitud, de tipo pliniana, ocurrió hace aproximadamente 2050 años y tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 5, en una escala que va del 0 al 8. Durante la era cristiana, el Misti ha presentado por lo menos tres erupciones: en 1784 d. C., 1787 d. C. y a mediados del siglo XV, esta última tuvo un IEV 2.



Figura 13.- Vista del flanco oeste del volcán Misti, provincia y región Arequipa.

En las quebradas que nacen del volcán Misti se ha identificado la presencia de muchos depósitos de lahares que llegan hasta los ríos Chili y Andamayo, así como en las quebradas y torrenteras que descienden hacia la ciudad de Arequipa. Entre los depósitos se encuentran los producidos por la erupción del volcán Misti hace 2050 años, muy visibles en el cercado de Arequipa; mientras que, en las cercanías del volcán, nuevos lahares con espesores de 0.5 a 3 metros sobreyacen a los depósitos de la erupción antes indicada. En la quebrada San Lázaro, los lahares se distribuyen a lo largo de 9 km con un ancho de 100 metros y espesores de al menos 4 metros ocupando un volumen del orden de 3.6 Mm^3 (Delaite et al., 2005).

Asimismo, en la zona media de la cuenca del río Chili, entre Chilina y el centro histórico de Arequipa (suroeste del volcán Misti), existen 3 a 4 terrazas conformadas de depósitos de lahares y aluviales que se emplazaron entre el Holoceno superior y los últimos 500 años, siendo sus edades de 1035 ± 45 años AP, 520 ± 25 años AP, 340 ± 40 años AP, y 330 ± 60 años AP (Delaite et al., 2005).

Desde el punto de vista del riesgo, en los últimos años, la mayoría de las quebradas que descienden por el sector sureste y sur del volcán Misti en los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Paucarpata, han sido invadidas por pobladores que han “extrangulado” los cauces naturales, lo que impide el flujo normal de las torrenteras originando daños en las viviendas precarias. Por otro lado, en la quebrada Matagente (cañón del río Chili), la presencia de flujos evidencian su continua recurrencia que afectan principalmente a obras de infraestructura como la planta de tratamiento de agua potable de la Tomilla II de la Empresa de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Arequipa (SEDAPAR), tal como ocurrió en febrero de 2017, el lahar daño la línea de conducción de agua cruda (Figura 14), produciendo la falta de agua potable por varios días en algunos sectores de la ciudad de Arequipa.

3.3.1.- Aspectos socioeconómicos

En un radio de 30 km alrededor del volcán Misti, se encuentran los distritos de Alto Selva Alegre, Arequipa, Cayma, Cerro Colorado, Characato, Chiguata, Jacobo Hunter, José Luis Bustamante y Rivero, Paucarpata, Miraflores, Mariano Melgar, Mollebaya, Pocsi, Polobaya, Quequeña, San Juan de Tarucani, Sabandía, Sachaca, Socabaya, Tiabaya, Uchumayo, Yanahuara y Yura, todos de la provincia de Arequipa, región Arequipa. La actividad económica de su población se relaciona con la industria, comercio, energía, turismo y agricultura. Asimismo, se ha contabilizado alrededor de 2113 instituciones educativas y 95 establecimientos de salud.

Asimismo, está presente el Aeropuerto Internacional Alfredo Rodríguez Ballón, seis hidroeléctricas (Charcani I al VI), incluyendo la zona de captación y planta de tratamiento de agua potable del río Chili y 07 represas de agua (Aguada Blanca, El Pañe, El Frayle, Pillones, Los Españoles, Chalhuanca, Bamputañe). Por otro lado, se debe considerar las vías de comunicación PE-

34A (repartición del km 48-Juliaca) y PE-34C (desvío Chiguata-Santa Lucia (empalme PE-34a)).



Figura 14.- Vista de la planta de captación de agua potable de la Tomilla II de SEDAPAR afectada por un lahar en febrero de 2017 (Foto: Diario Correo)

3.3.2.- Lahares históricos

En los últimos años, los lahares originados en las laderas del volcán Misti han presentado volúmenes moderados debido al bajo volumen de precipitaciones pluviales ocurridas y registradas por la estación meteorológica de la represa Aguada Blanca (Figura 15). A continuación, se describen las características de los lahares ocurridos en el volcán Misti entre los años 2019 y 2020.

Lahares ocurridos en 2019: El 14 de febrero del 2019, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), emitió una alerta por descenso de un lahar por el flanco noroeste del volcán, en dirección del cañón del río Chili (Figura 16a). Esta alerta permitió a la empresa SEDAPAR tomar las medidas necesarias a fin de evitar daños en la zona de captación de agua. Considerando que el volumen del lahar fue moderado, no se produjeron daños mayores.

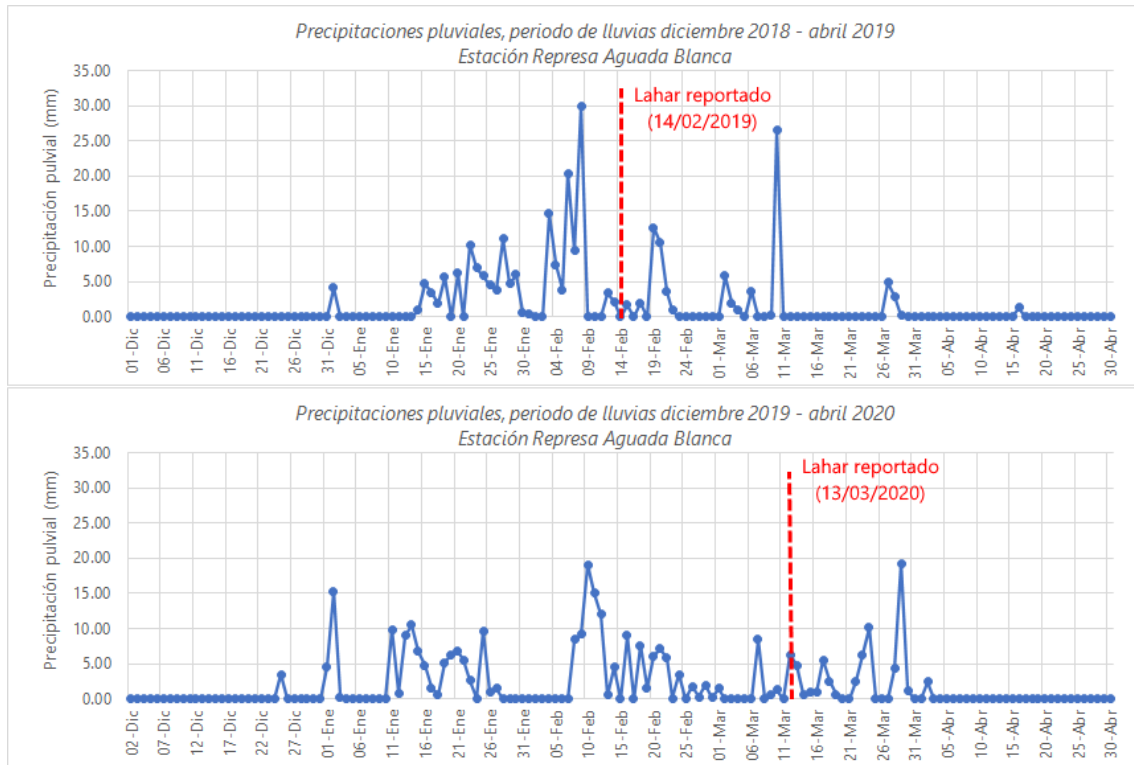


Figura 15.- Gráfico estadístico de precipitaciones pluviales registradas en las temporadas de lluvias 2019 y 2020 por la estación meteorológica de AUTODEMA, ubicada en el puesto de control de la represa de Aguada Blanca (Fuente: AUTODEMA).

Alerta de Lahar

a)

Volcán Misti

Tipo de evento: Lahar (huaico volcánico)
 Fecha: 14/02/2019
 Hora Local: 15:00 / Hora UTC:20:00
 Simulacro: no
 Observaciones:

Se registra una señal sísmica asociada al descenso de un lahar (huaico volcánico) por el flanco noroeste del volcán Misti, el cual ha sido registrado por la red de vigilancia del IGP sobre este volcán. Se recomienda tomar las medidas de prevención necesarias para evitar daños ante el descenso de estos flujos.

VER MAPA

COMPARTIR

Alerta de Lahar

b)

Volcán Misti

Tipo de evento: lahar (flujo de lodo volcánico)
 Fecha: 13/03/2020
 Hora Local: 16:30 / Hora UTC:21:30
 Simulacro: no
 Observaciones:

El sistema de alerta temprana de lahares en el volcán Misti viene registrando el descenso de un lahar (flujo volcánico) de bajo a moderado volumen por el flanco sureste del macizo volcánico, por las quebradas que discurren por este sector. Las autoridades deben recomendar a la población mantenerse alejada y evitar circular por las quebradas y torrenteras.

VER MAPA

COMPARTIR

Figura 16.- Alertas de lahar emitidas por el CENVUL a través del aplicativo móvil "Volcanes Perú". a) Lahar del 14 de febrero de 2019 y b) lahar del 13 de marzo de 2020.

Lahares ocurridos en 2020: El 13 de marzo de 2020, el CENVUL emitió una alerta de lahar con origen en el volcán Misti (Figura 16b) que descendió por el flanco sureste del volcán, en dirección del río Andamayo (distritos de Chiguata y Paucarpata). Este lahar no presentó gran volumen y no causó mayores daños a lo largo de su recorrido. Este mismo año, ocurrieron otros lahares de menor volumen que no produjeron daños importantes.

3.3.3.- Escenarios críticos por lahares

En las últimas décadas, se han realizado varios estudios sobre el impacto que tendría en la ciudad de Arequipa la erupción del volcán Misti, así como sus peligros asociados (descenso de flujos piroclásticos, emisión y caída de tefras, colapso sectorial del edificio volcánico y descenso de lahares): Thouret et al. (2001); Delaite et al. (2005); Harpel et al. (2011); Constantinescu et al. (2011); Sandri et al. (2014) y Charbonnier et al. (2020).

Para el volcán Misti se ha elaborado el mapa de escenarios críticos por descenso de lahares utilizando el programa LAHARZ_py (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). Este programa correlaciona el volumen de un evento lahárico y el área planimétrica en sección transversal inundada por un lahar. Históricamente, los volúmenes máximos de lahares registrados están en el orden de $1,5 \text{ Mm}^3$ a 4 Mm^3 para periodos entre 300 a 1000 años, asociados a veces a erupciones explosivas moderadas (IEV 1-2). Los lahares con volúmenes del orden de 9 Mm^3 a 10 Mm^3 son menos frecuentes y ocurren cada 1,000 a 5,000 años asociados a erupciones explosivas grandes (IEV ≥ 3 ; Delaite et al., 2005; Vargas et al., 2010). En tal sentido, para este objetivo se ha considerado volúmenes de flujos de 1.5 Mm^3 , 3 Mm^3 y 9 Mm^3 en base a tres escenarios críticos que podrían presentarse y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 17:

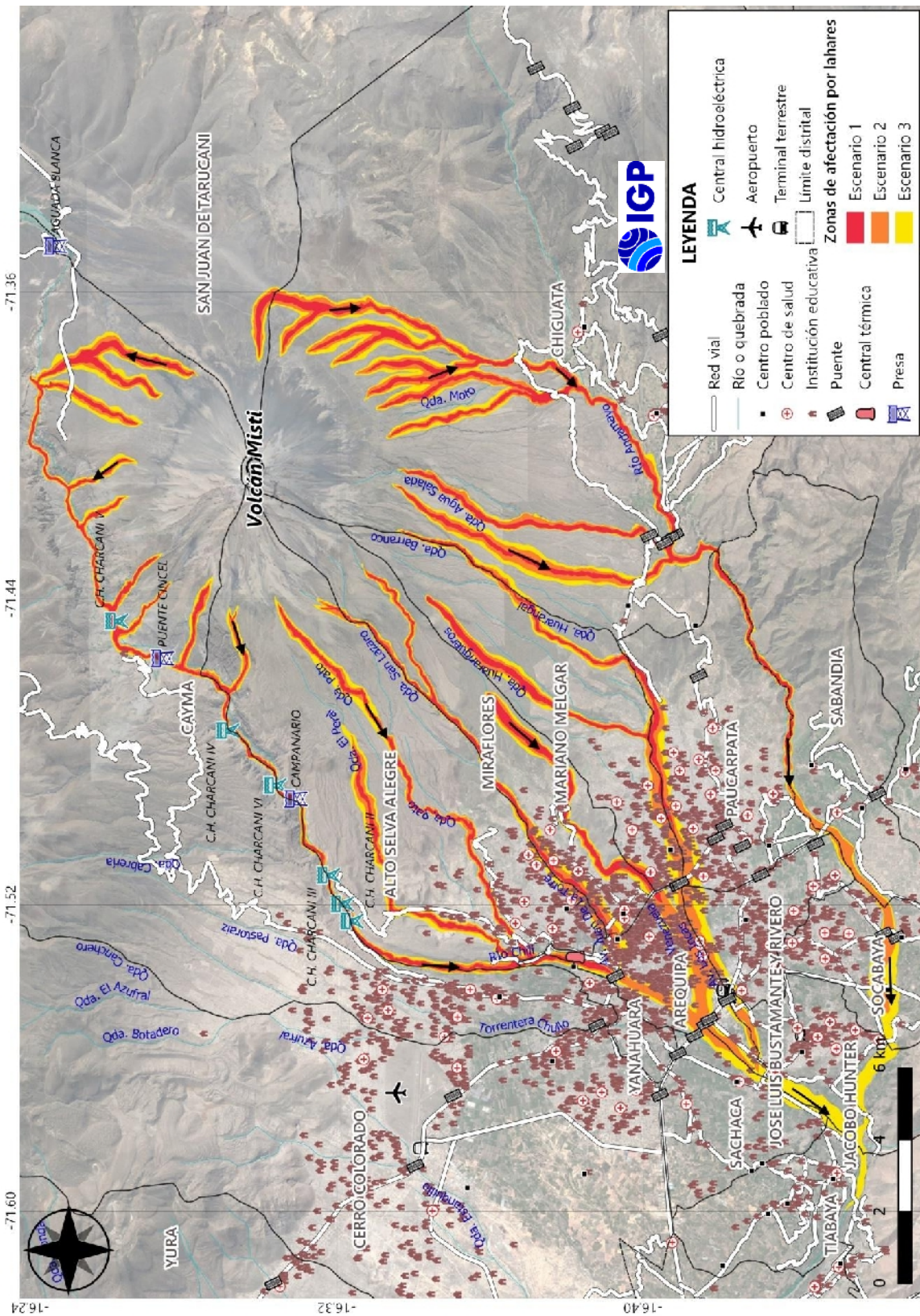


Figura 17.- Mapa de zonificación de escenarios críticos por descenso de lahares en el volcán Misti

- **Escenario 1** (sobre las quebradas, áreas de color rojo). En este escenario se considera la generación de lahares con volúmenes de 1.5 Mm³ que discurren por las quebradas que drenan por el flanco sur del volcán como Peral, Pato, San Lázaro y Barranco-Huarangal, siendo su probabilidad de ocurrencia alta sobre todo en periodos de lluvia. Si estos lahares se producen pueden afectar los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata, Cercado Arequipa, José Luis Bustamante y Rivero, y Sachaca. Además, de descender lahares por las quebradas ubicadas al sureste del Misti, como Agua Salada y Honda, estas afectarían los distritos de Chiguata, Sabandía y Socabaya.
- **Escenario 2** (sobre las quebradas áreas de color naranja). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 3 Mm³ que discurren por las quebradas del flanco sur, sureste, oeste y noroeste el flanco sur del volcán como Peral, Pato, San Lázaro, Huarangueros y Barranco-Huarangal, hasta distancias de 20 km desde el cráter del volcán. Si estos lahares se producen pueden afectar los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata, Cercado Arequipa, José Luis Bustamante y Rivero, Yanahuara, Sachaca y Jacobo Hunter. De descender lahares por las quebradas ubicadas al sureste del Misti, como Agua Salada, Honda con dirección al río Andamayo-Socabaya, estas afectarían los distritos de Chiguata, Sabandía y Socabaya y Jacobo Hunter hasta alcanzar el río Chili.
- **Escenario 3** (sobre las quebradas, áreas de color rojo). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 9 Mm³ que discurren por las quebradas que drenan por el flanco sur, sureste, oeste y noroeste del volcán Misti hasta distancias de más de 27 km desde el cráter del volcán. Si estos lahares se producen afectarían severamente los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata,

Cercado Arequipa, José Luis Bustamante y Rivero, Yanahuara, Sachaca, Jacobo Hunter, Tiabaya, Chiguata, Sabandía y Socabaya. La probabilidad de ocurrencia es baja, la cual puede estar ligada a una eventual erupción del Misti o lluvias muy intensas.

3.4.- Lahares en el volcán Sabancaya

El volcán Sabancaya se encuentra ubicado a 18 km al sur del valle del río Colca y a 75 km al noroeste de la ciudad de Arequipa ($15^{\circ}49.3'S$, $71^{\circ}52.7'O$; 5960 m s. n. m.) (Figura 18). El Sabancaya se formó hace menos de 10,000 años ligado al emplazamiento de flujos de lava (Gerbe & Thouret, 2004; Samaniego et al., 2016); mientras que, en los últimos 500 años el Sabancaya produjo dos importantes procesos eruptivos: el primero reportado en las crónicas españolas del siglo XVIII y el segundo ocurrido entre 1990 y 1998 generando explosiones volcánicas con intensas emisiones de ceniza y fragmentos balísticos de composición andesítica y dacítica (Gerbe & Thouret, 2004). Este último proceso eruptivo alcanzó un IEV de 2 a 3.



Figura 18.- Volcán Sabancaya, provincia de Caylloma, región Arequipa.

3.4.1.- Aspectos socioeconómicos

En la zona del volcán Sabancaya, específicamente dentro de un radio de 30 km se encuentran los distritos de Achoma, Cabanaconde, Chivay, Huambo, Huanca, Ichupampa, Lari, Lluta, Maca, Madrigal, Tapay y Yanque, pertenecientes a la provincia de Caylloma, región Arequipa. En estos distritos, las principales actividades económicas están relacionadas con la agricultura, ganadería, minería, así como el turismo al valle del Colca con un promedio de 190,000 personas por año. En estos distritos se ha identificado la presencia de 63 instituciones educativas y 14 establecimientos de salud.

Asimismo, en la zona existen importantes vías de comunicación, como la ruta AR-109 (desvío Huambo-vía Panamericana) y la ruta AR-704 (empalme AR-109 y AR-109) y el canal de agua que abastece al proyecto especial Majes-Sihuas.

3.4.2.- Lahares históricos

En los últimos años, los lahares con origen en el volcán Sabancaya han descendido principalmente por la quebrada Huayuray (Pinchollo), ubicada al norte del volcán y por el río Sallalli, en el extremo sureste del volcán. Las características de estos lahares son:

- **Lahares ocurridos en 2017:** En diciembre de 2017, se reportó el descenso de lahares que discurrieron por el flanco sureste del Sabancaya, por la zona de Sallalli (límite del distrito de Lluta) y al noroeste del cráter por la quebrada Mayuca, próxima a Pinchollo. Estos lahares no representaron peligro alguno.
- **Lahares ocurridos en 2018:** Los días 13 y 28 de marzo de 2018, el IGP (CENVUL) reportó el descenso de dos lahares con flujos

moderados que discurrieron en dirección del río Sallalli, al sureste del Sabancaya. Estos lahares no representaron peligro alguno.

- **Lahares ocurridos en 2020:** El 6 de enero de 2020, aproximadamente a las 14:30 horas, a consecuencia de la acumulación de ceniza emitida en el volcán Sabancaya y a las intensas precipitaciones pluviales, se produjo un lahar de poco volumen que descendió por la quebrada Huayuray, ubicada en el distrito de Cabanaconde, provincia de Caylloma.

Durante el mes de febrero, el IGP (CENVUL) emitió 4 alertas por descenso de lahares en el volcán Sabancaya que discurrieron por la quebrada Huayuray hacia el río Colca, sin representar peligro alguno. Estos eventos ocurrieron los días 24, 26, 27 y 28 de febrero (Figura 19).

3.4.3.- Escenarios críticos por lahares

Para el complejo volcánico Ampato-Sabancaya se ha elaborado el mapa de escenarios críticos por descenso de lahares utilizando el programa LAHARZ (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998), el mismo que permite correlacionar el volumen de un evento lahático, el área planimétrica y la sección transversal inundada por un lahar. Para este objetivo se ha considerado volúmenes de flujos de $1,5 \text{ Mm}^3$, 10 Mm^3 y 20 Mm^3 , en base a tres escenarios críticos que podrían presentarse, similares a los propuestos por Rivera et al. (2016). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 20:

- **Escenario 1** (sobre las quebradas, áreas de color rojo). En este escenario se considera la generación de lahares o flujos de barro con volúmenes de 1.5 Mm^3 que discurren por las quebradas que drenan del volcán Sabancaya (Mollebaya, Colihuiri, Sallalli y Sahuancaya-

Pujro Huayjo), volcán Ampato (Jaruma-Cabana-Pujjo, Colquemarca-Baylillas, Collo-Chacramayo, Vizcachane, Cabadillayoc, Chullune, Condori-Huaraya, Hualaycucho y Quellocancha), y volcán Hualca Hualca (Pungo-Hualca Hualca, Japo, Huayuray, Molebaya-Sepina y Huancané).

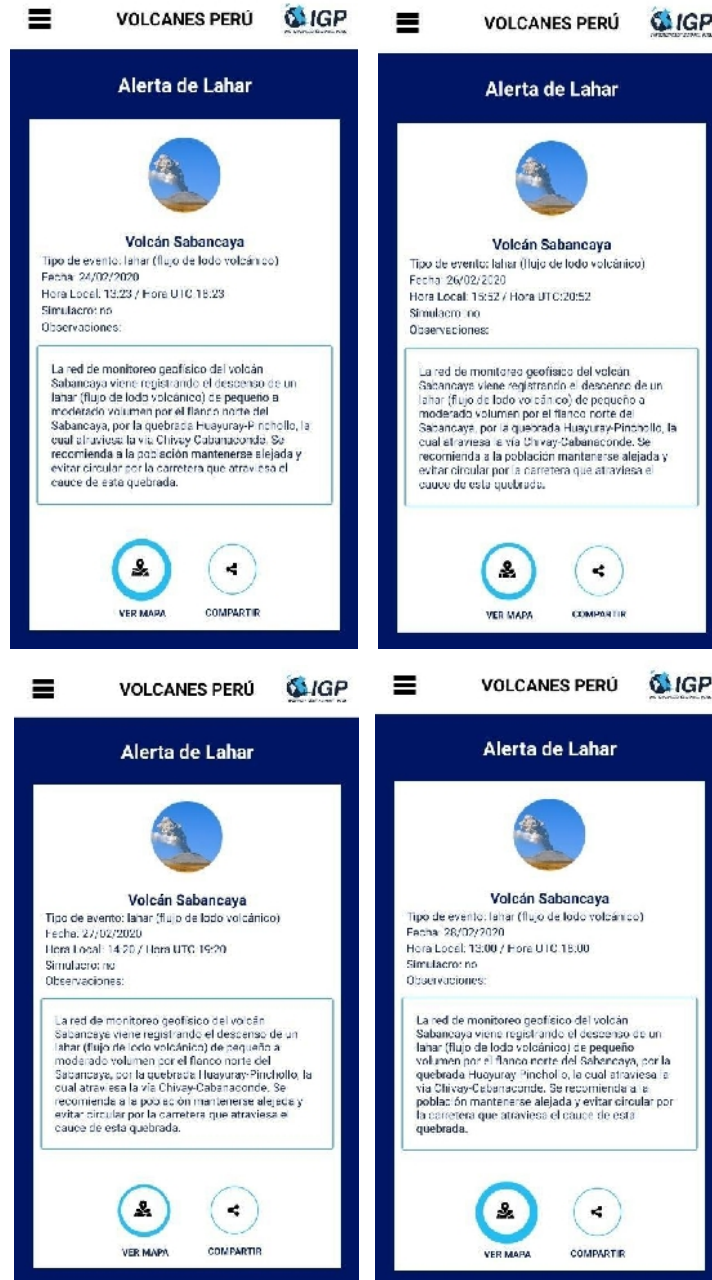


Figura 19.- Alertas de lahar emitidas por el CENVUL a través del aplicativo móvil "Volcanes Perú". Para el mes de febrero, 2020

La probabilidad de ocurrencia de estos flujos es alta sobre todo en periodos de lluvia y por la disponibilidad de la ceniza acumulada del volcán Sabancaya. Si estos lahares se producen, podrían afectar terrenos de cultivos, terrenos de pastizales, bofedales, y tramos de la carretera Taya-Sallalli-Chivay, Chivay-Cabanaconde.

- **Escenario 2** (sobre las quebradas áreas de color naranja). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 10 Mm^3 que discurren por las quebradas y valles al pie de los volcanes Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca, hasta distancias de 20 km desde dichos volcanes. Si estos lahares se producen, podrían afectar poblados como Cabanaconde, Achoma, terrenos de cultivos, terrenos de pastizales, bofedales, canales de agua, y tramos de la carretera Taya-Sallalli-Chivay, Chivay-Cabanaconde.
- **Escenario 3** (sobre las quebradas áreas de color rojo). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 20 Mm^3 que discurren por las quebradas y valles al pie de los volcanes Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca, hasta distancias mayores de 25 km desde dichos volcanes. Si estos lahares se producen afectarían poblados como Cabanaconde, Maca, Achoma, terrenos de cultivos, canales de agua, terrenos de pastizales, bofedales, y tramos de la carretera Huanca-Taya-Sallalli-Chivay, Chivay-Cabanaconde-Huambo. Los lahares voluminosos (20 Mm^3) podrían generarse debido a erupciones de gran magnitud ($\text{IEV} \geq 3$), aunque su posibilidad de ocurrencia es baja o muy baja.

3.5. Lahares en el volcán Ubinas

El volcán Ubinas se encuentra ubicado a 90 km al norte de la ciudad de Moquegua y a 65 km al este de la ciudad de Arequipa (16°22' S, 70°54' O; 5672 m s. n. m.). Este volcán tiene forma cónica (Figura 21) con una altura de 1400 m y abarca un área de 65 km², con un volumen de 54 km³ (Rivera et al., 2011). El Ubinas es considerado el volcán más activo del Perú debido a que solo en el presente siglo ha desarrollado tres nuevos procesos eruptivos (años 2006 a 2009, 2013 a 2017 y 2019) con niveles IEV igual a 2. Asimismo, se ha encontrado evidencias de 27 procesos eruptivos con niveles IEV de 1 a 3 ocurridos después del año 1550 (Thouret et al., 2005; Rivera, et al., 2010).



Figura 21.- Volcán Ubinas, provincia General Sánchez Cerro, región Moquegua

En el valle de Ubinas y en otras oportunidades en el valle del río Para, el descenso de lahares o flujos de lodo volcánico son comunes, ya sea por lluvias intensas y/o por los reiterativos procesos eruptivos del volcán. Por ejemplo, los lahares más importantes se desarrollaron en el río Ubinas los días 11 (12:00 a 13:00 horas) y 22 de febrero de 2016 (16:00 a 16:30

horas) (Figura 22), y en el río Para, el lahar más grande ocurrió el día 12 de febrero, considerado el más destructivo de todos los lahares ocurridos en este mes (Figura 22).



Figura 22.- Lahares en los ríos Para y Ubinas ocurridos los días 11, 12 y 22 de febrero, 2016. Vista del sector de San Miguel, en la zona de confluencia de ambos ríos (Mariño et al., 2017).

El lahar del día 12 de febrero 2016, descendió generando daños en el valle de Ubinas hasta llegar a la confluencia con el río Tambo (Figuras 23, 24 y 25). Por su considerable volumen causó el represamiento del río Tambo, y formó un dique natural de 1.5 km de largo y 50 m de ancho aproximadamente. El día 23 de febrero del 2016 se rompió el dique destruyendo áreas de cultivo en ambas márgenes aguas abajo del río Tambo. Además, afectó puentes peatonales y ocasionó la pérdida de ganado en la localidad de Huarina. Este evento generó daños en algunas obras de infraestructura:

- Destrucción del pozo séptico y la piscigranja de Huatagua.
- Destrucción del puente peatonal *Ánima* en el sector de Huarina (Fig. 23A).

- Destrucción de canales y bocatomas de agua, en los sectores de San Miguel, Huatagua y Huarina (Fig. 23b).



Figura 23.- a) Destrucción del puente peatonal “Ánima” (Huarina), originado por el lahar del día 12 de febrero 2016 en el río Para; b) Destrucción de canales de agua en el sector de Huatagua



Figura 24.- a) Dique natural formado en la confluencia del río Ubinas y Tambo, originado por el lahar del 12 de febrero de 2016 en el río Para; b) Laguna formada río arriba del río Tambo (fotos, J. Mariño)



Figura 25.- a) Puente peatonal de ~50 m de largo destruido durante el desembalse de la laguna formada en el río Tambo el día 13 de febrero de 2016; b) Terrenos de cultivo destruidos por el lahar del 12 de febrero en el sector de Huarina, cerca de la confluencia de los ríos Ubinas y Anascapa.

Asimismo, Mariño et al. (2017) estimó que el área de los terrenos de cultivos afectados o destruidos por este lahar, desde Tonohaya hasta la confluencia con el río Para, fue de 9,000 m².

3.5.1.- Aspectos socioeconómicos

En la zona del volcán Ubinas, específicamente dentro de un radio de 30 km del centro volcánico, se encuentran los distritos de San Juan de Tarucani, Chojata, Lloque, Matalaque, Omate, Ubinas y Yunga que pertenecen a las provincias de Arequipa y General Sánchez Cerro en las regiones Arequipa y Moquegua, respectivamente. Las actividades económicas de sus pobladores están relacionadas a la agricultura y ganadería y, en menor medida, al comercio.

Dentro del área indicada, se ha identificado 87 instituciones educativas y 12 establecimientos de salud. Por otro lado, existen importantes vías de comunicación como la ruta MO-104 empalme MO-103 (Yalagua) hasta el empalme MO-101 (desvío Lojen), ruta MO-101 (empalme MO-100 [Matalaque] hasta el empalme MO-100) y la ruta MO-531 (empalme MO-101 hasta MO-104).

3.5.2.- Lahares históricos

Los recientes lahares con origen en el volcán Ubinas descendieron principalmente por la quebrada Volcanmayo - río Ubinas, en dirección de la confluencia con el río Tambo. Esta quebrada se ubica al pie del flanco sur del Ubinas. En este sector, se han depositado volúmenes importantes de las cenizas emitidas durante los procesos volcánicos recientes del Ubinas; además, ambas márgenes están constituidas de material detrítico suelto.

- **Lahares ocurridos en 2017:** En marzo de 2017, se produjeron lahares debido a la ocurrencia de precipitaciones pluviales intensas de

corta duración. Los lahares descendieron por los flancos oeste, suroeste y sur del volcán para luego converger en las quebradas Sacohaya, Volcanmayo y Ubinas hasta llegar al río Tambo. Por otro lado, los flujos que descendieron de los flancos norte y noreste convergieron en el río Para y luego continuaron con dirección al río Tambo. Estos lahares fueron bastante diluidos, ricos en material fino que socavaron el fondo del río y las terrazas de ambos márgenes del río Tambo (Figura 26).



Figura 26.- Vista de depósitos de lahares en el cauce del río Tambo en inmediaciones de la localidad de Huarina (foto de Vela y Cuno (2017)).

En la confluencia de los ríos Ubinas y Tambo yace un depósito de lahar que posee un espesor variable desde 1 a 4 m (Figura 27). El depósito es masivo, ligeramente compactado y presenta una superficie lisa. Está conformado por 60 a 70 % de material fino y 30 a 40 % de bloques con diámetros entre 20 y 50 cm. Los bloques más grandes tienen diámetros de 4 a 5 m y representan menos del 20 %. Los bloques poseen litología heterogénea, conformados por bloques de lava, fragmentos de pómez, fragmentos hidrotermalizados y, en menor porcentaje, se encuentran fragmentos de rocas del sustrato sedimentario, principalmente cuarcita y arenisca. El depósito presenta una matriz fina areno-limosa.



Figura 27.- Vista del depósito del lahar en la confluencia del río Tambo y Ubinas.

Utilizando imágenes satelitales Google Earth de los años 2010 y 2017, Vela y Cuno (2017) realizaron una evaluación de daños ocasionados por la crecida del río Ubinas y Tambo en las localidades de Huarina y Huatagua. La correlación de las imágenes (Figura 28), permitió observar que el área de terrenos de cultivos afectados fue de 22.8 hectáreas, en un tramo de 2.4 km de largo entre el sector de Huatagua y Huarina.

Asimismo, la trocha carrozable Ubinas-Matalaque, única vía directa que conduce hacia los valles de Ubinas y Tambo, y la vía Ubinas-Matalaque, ubicada por la margen derecha del río Ubinas, fueron afectadas por los lahares hasta en tramos de 3.5 km. Por otro lado, en la margen derecha del río Ubinas-Para se produjo erosión fluvial, lo que ocasionó la desestabilización de la terraza, sobre la cual discurre la vía; en la superficie del terreno se aprecian fisuras. De continuar este proceso, la inestabilidad puede provocar el colapso de la terraza. Los lahares, al desplazarse agua abajo, también afectaron canales y bocatomas de agua en Huatagua y Huarina, además de puentes peatonales en el sector de Huarina.

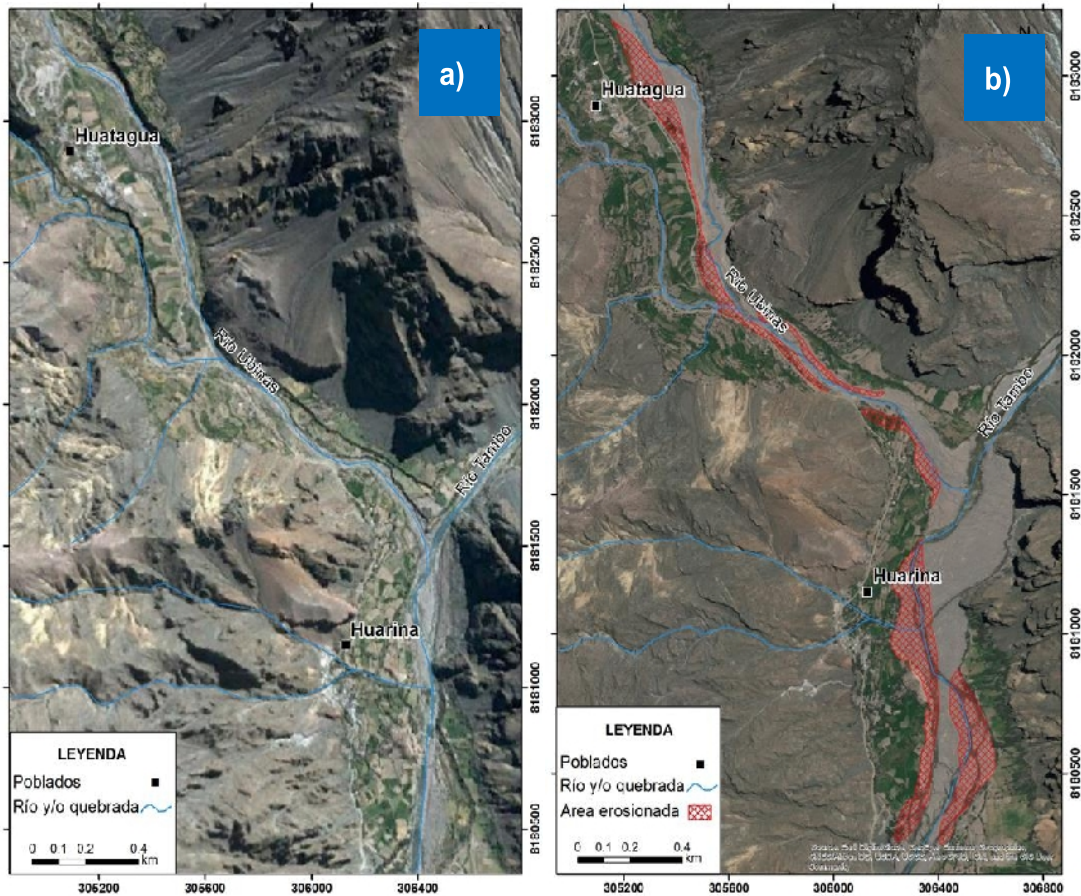


Figura 28.- a) Imagen Google Earth del año 2010 que muestra las áreas de cultivo anterior a la ocurrencia de los lahares. B) Imagen satelital del año 2017 que muestra las áreas de cultivo que han sido afectadas por los lahares (tomado de Vela y Cuno, 2017).

- **Lahares ocurridos en 2019:** Durante el año 2019, el CENVUL (IGP) emitió hasta siete (7) reportes por descenso de lahares de moderado volumen (Tabla 2), a una velocidad promedio de 2.5 m/s, que se encausaron por las quebradas Volcanmayo y Chiflón sin causar daños personales. Los daños mayores se han presentado en el tramo de la carretera carrozable Arequipa-Ubinas, acceso principal a dicha localidad (Figura 29). La información sobre estos lahares fue enviada a las autoridades de la localidad de Ubinas, COER Moquegua con la recomendación que la población evite acercarse al cauce de estas quebradas. Asimismo, la información fue difundida por medio del APP Volcanes_Perú (Figura 30).

Tabla 2.- Relación de alertas emitidas por descenso de lahares en el volcán Ubinas durante el 2019.

n.º	Fecha	Hora Local	Volcán
1	09/02/2019	17:18	Ubinas
2	10/02/2019	15:35	Ubinas
3	11/02/2019	15:18	Ubinas
4	12/02/2019	15:04	Ubinas
5	12/02/2019	16:27	Ubinas
6	02/03/2019	18:04	Ubinas
7	03/03/2019	18:48	Ubinas



Figura 29.- Lahares originados en el volcán Ubinas que interrumpieron las vías de acceso a la localidad de Ubinas

Lahares ocurridos en 2020: Durante el año 2020, el CENVUL (IGP) emitió hasta nueve (9) alertas por descenso de lahares de moderado volumen, principalmente por la quebrada Volcanmayo en dirección del río Ubinas (Tabla 3). La información sobre estos lahares fue enviada a las autoridades de la localidad de Ubinas, COER Moquegua con la recomendación que la población evite acercarse al cauce de estas quebradas. Asimismo, la información fue difundida por medio del APP Volcanes_Perú (Figura 31).

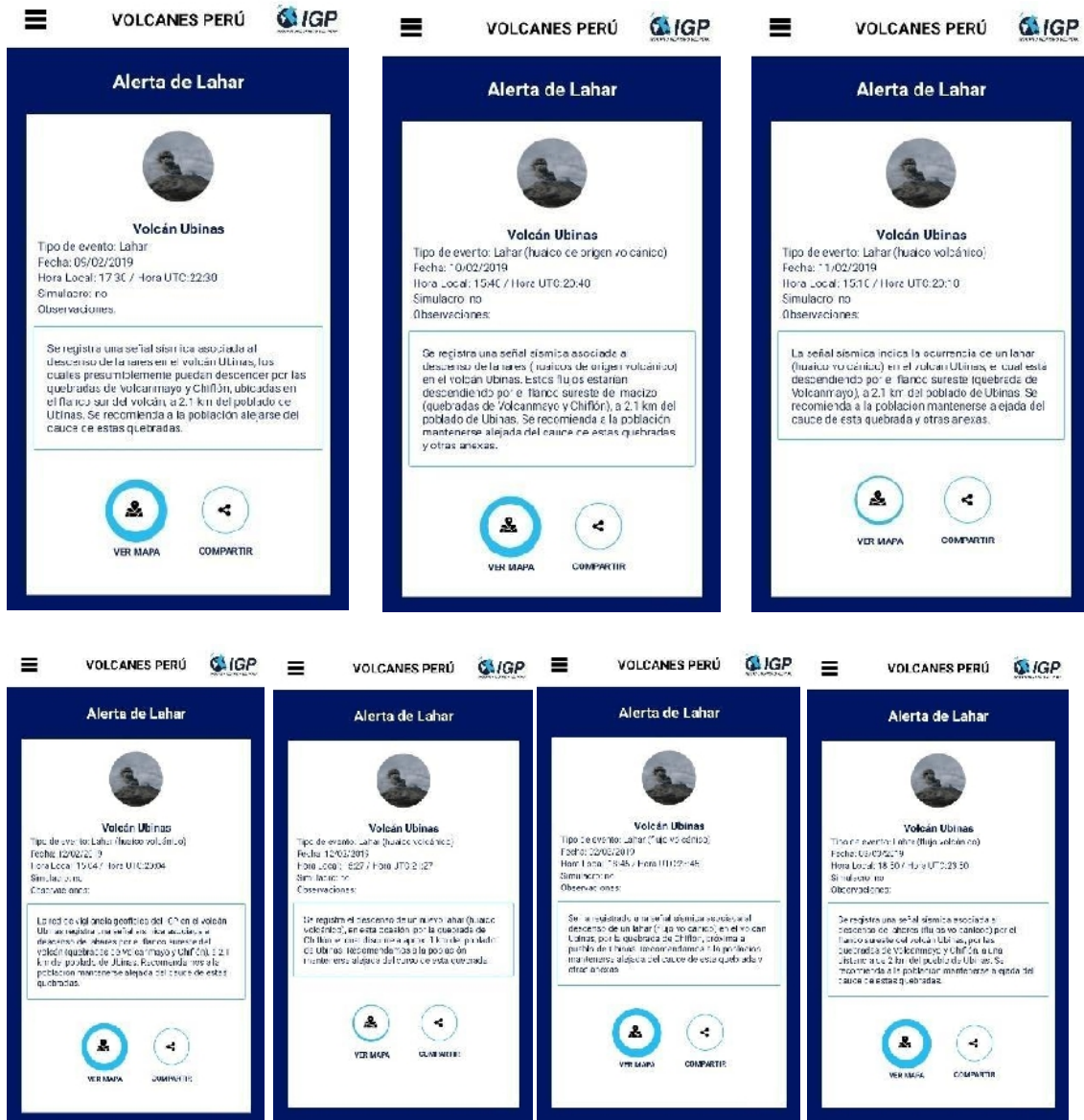


Figura 30.- Las alertas por descenso de lahares en el volcán Ubinas fueron emitidas a través del aplicativo móvil “Volcanes Perú”.

Tabla 3.- Relación de alertas emitidas por descenso de lahares en el volcán Ubinas durante el 2020.

n.º	Fecha	Hora Local	Volcán
1	04/01/2020	16:20	Ubinas
2	10/01/2020	14:22	Ubinas
3	11/02/2020	16:50	Ubinas
4	12/02/2020	15:52	Ubinas
5	24/02/2020	15:51	Ubinas
6	29/02/2020	15:25	Ubinas
7	29/02/2020	17:00	Ubinas
8	01/03/2020	16:01	Ubinas
9	18/03/2020	16:20	Ubinas

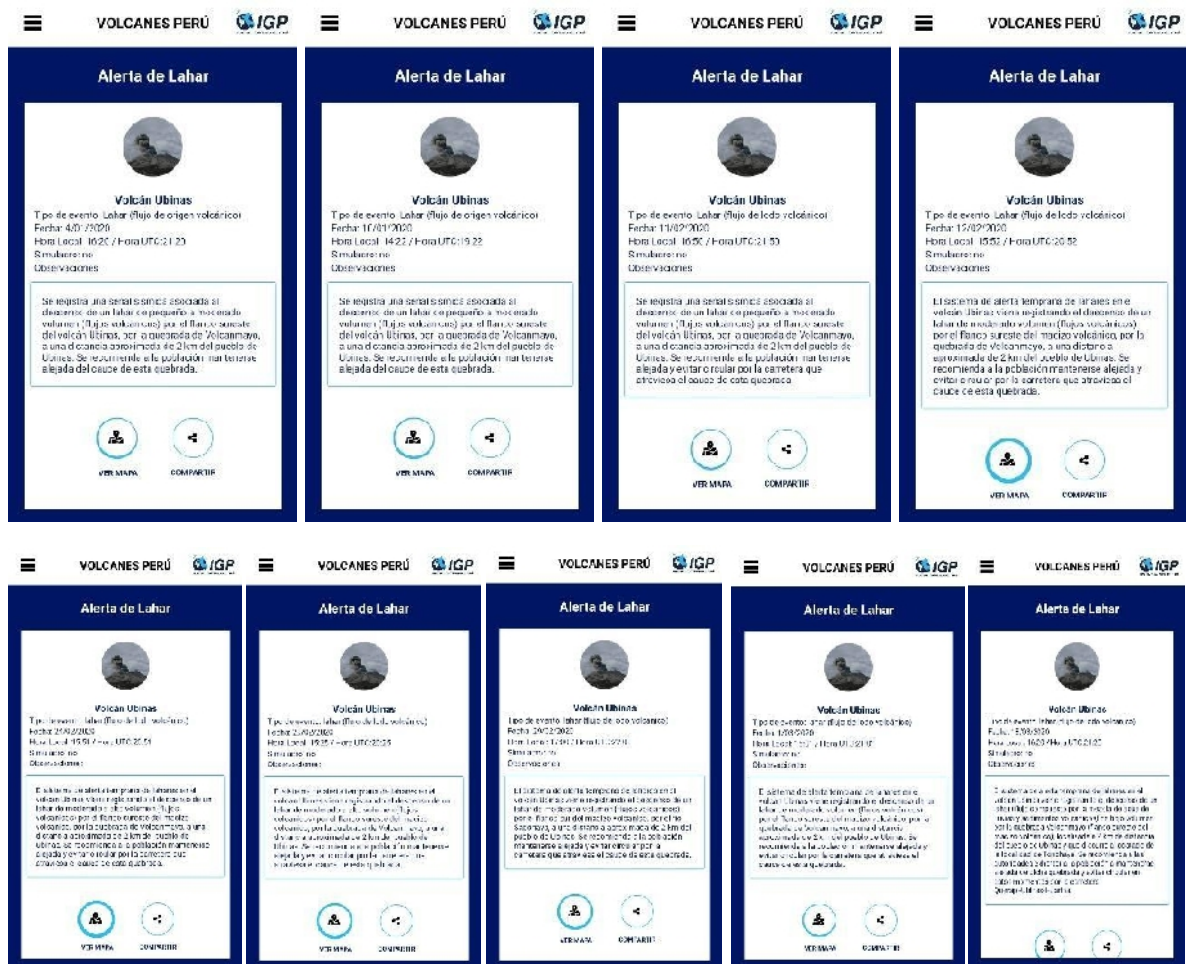


Figura 31.- Las alertas por descenso de lahares en el volcán Ubinas fueron emitidas a través del aplicativo móvil "Volcanes Perú".

A continuación, se describen las características de los seis principales lahares ocurridos durante el año 2020 con origen en el volcán Ubinas y para los cuales el CENVUL (IGP) emitió las alertas respectivas:

- ✓ 04 de enero de 2020, a las 16:20 hora local: Se origina un lahar de volumen moderado que desciende por la quebrada Volcanmayo, al pie del flanco sureste del volcán Ubinas, sin generar daño alguno.
- ✓ 10 de enero de 2020, a las 14:22 hora local: Se origina un lahar de volumen moderado que desciende por el flanco sureste del volcán Ubinas, específicamente por las quebradas Volcanmayo y Chiflón. En su trayecto el lahar afectó terrenos de cultivo de las localidades de Tonohaya, San Miguel y Huarina, y algunos tramos de la carretera Huarina-Ubinas.
- ✓ 12 de febrero de 2020, a las 15:52 hora local: Se origina un lahar de moderado volumen que desciende por la quebrada Volcanmayo sin causar daño alguno.
- ✓ 13 de febrero de 2020, ocurre un lahar de volumen pequeño que descendió por las quebradas Volcanmayo, Chiflón y río Ubinas.
- ✓ 29 de febrero de 2020, a las 15:25 y 17:00 hora local: Se origina dos lahares de volumen moderado que descienden por la quebrada Volcanmayo y el río Sacohaya, sin generar daño alguno.
- ✓ 10 de marzo de 2020, a las 13:28 hora local: Se origina un lahar de volumen moderado que desciende por la quebrada Volcanmayo sin generar daño alguno.

3.5.3.- Escenarios críticos por lahares

Para el volcán Ubinas se ha elaborado el mapa de escenarios críticos por descenso de lahares utilizando el programa LAHARZ (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) y volúmenes de flujos de 0.3 Mm³, 5 Mm³ y 10 Mm³, de acuerdo a los sugerido por Rivera et al. (2011). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 32.

- **Escenario 1** (sobre las quebradas, áreas de color rojo).). En este escenario se considera la generación de lahares o flujos de barro con volúmenes de 0.3 Mm³ que discurren por las quebradas que drenan del volcán, entre ellas Volcanmayo, Tambillo, río Para y otras, siendo su probabilidad de ocurrencia alta, sobre todo en periodos de lluvia. Si estos lahares se producen, podrían afectar un tramo de la carretera Arequipa-Ubinas-Huarina, terrenos de cultivos, canales de agua, etc.
- **Escenario 2** (sobre las quebradas, áreas de color naranja). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 5 Mm³ que discurren por las quebradas y valles al pie del volcán hasta distancias de 16 km desde el cráter del volcán. Si estos lahares se producen, podrían afectar tramos de la carretera Arequipa-Ubinas-Huarina, terrenos de cultivos, canales de agua, poblado de Tonohaya, puentes peatonales, etc.
- **Escenario 3** (sobre las quebradas, áreas de color amarillo). Considera la ocurrencia de lahraes con volúmenes mayores a 10 Mm³ que discurren por las quebradas y valles hasta alcanzar distancias mayores de 20 km desde el volcán. Si estos lahares se producen afectarían varios tramos de la carretera Arequipa-Ubinas-Huarina, terrenos de cultivos, poblados de Tonohaya, San Miguel y Huatagua, puentes peatonales, canales de agua, etc. La posibilidad de ocurrencia de lahares de alto volumen es baja a muy baja.

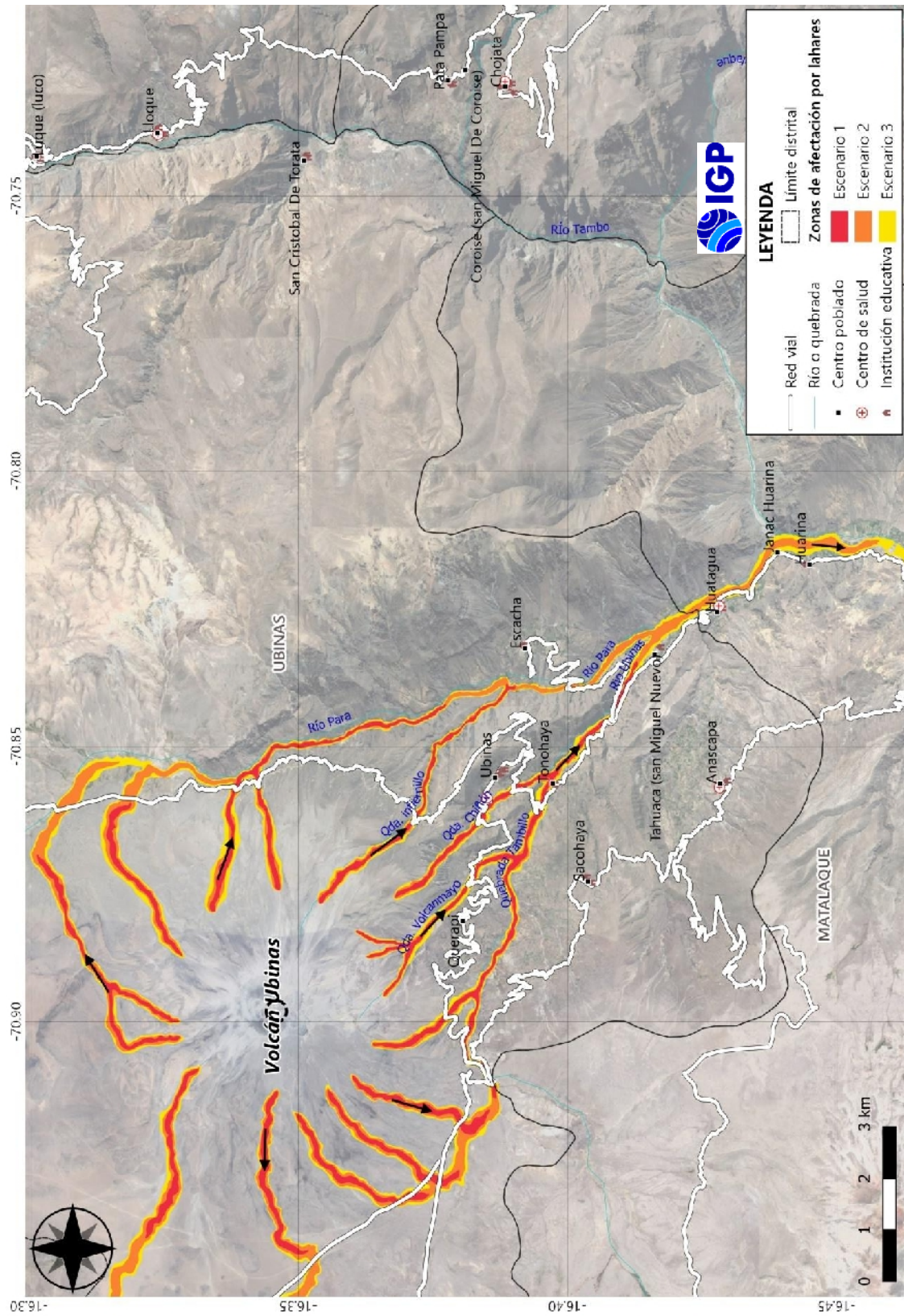


Figura 32.- Mapa de zonificación de escenarios críticos por descenso de lahares en el volcán Ubinas.

3.6.- lahares en el volcán Huaynaputina

El volcán Huaynaputina ($16^{\circ}37' S$; $70^{\circ}51' O$; 4850 m s. n. m.) está ubicado en la provincia de Omate (Figura 33), al extremo norte de la región Moquegua e históricamente, ha tenido una de las erupciones de mayor importancia a nivel mundial en febrero del año 1600 d. C., con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 6. Su erupción habría ocasionado la muerte de aproximadamente 1500 personas y sepultado más de 17 poblados que habrían estado ubicados en ambas márgenes del río tambo y a menos de 20 km alrededor del volcán (Thouret et al., 2002; Jara et al., 2000).

Históricamente, en este volcán se habrían generado algunos lahares debido a periodos de lluvias intensas, pero que no causaron daños mayores.



Figura 33.- Volcán Huaynaputina, provincia de General Sánchez Cerro, región Moquegua.

3.6.1.- Aspectos socioeconómicos

En inmediaciones del volcán Huaynaputina, específicamente dentro de un radio de 30 km alrededor del centro volcánico, se encuentran los distritos de Carumas, Chojata, Coalaque, Cuchumbaya, Matalaque, Omate,

Quinistaquillas, San Cristobal, Torata y Ubinas, todos pertenecientes a las provincias de General Sánchez Cerro y Mariscal Nieto de la región Moquegua. Su población tiene como actividades económicas la agricultura y ganadería. En estos distritos se ha identificado la existencia de 132 instituciones educativas y 19 establecimientos de salud.

Asimismo, dentro del área indicada, se cuenta con importantes vías de comunicación como la ruta MO-100 (MO-108 (Puente el Chorro 2) hasta el límite departamental Arequipa (Logen) y la ruta MO-104 (Empalme PE-36A (Torata) hasta el límite departamental Moquegua).

3.6.2.- Lahares históricos

Considerando que la red de monitoreo geofísico del volcán Huaynaputina inició operaciones en marzo de 2019; el CENVUL (IGP) logra reportar la ocurrencia de lahares con origen en esta estructura volcánica desde la temporada de lluvias del año 2020.

- **Lahares ocurridos en 2020:** Durante el año 2020 el CENVUL (IGP9 ha emitido la alerta de ocurrencia de cuatro (4) lahares con origen en el volcán Huaynaputina y que discurrieron por la quebrada El Volcán en dirección del distrito de Quinistaquillas hasta su confluencia con el río Tambo (Tabla 4; Figura 34), siendo sus características, las siguientes:

Tabla 4.- Alertas emitidas por el CENVUL por descenso de lahares en el volcán Huaynaputina, 2020

n.º	Fecha	Hora Local	Volcán
1	11/02/2020	16:40	Huaynaputina
2	20/02/2020	16:29	Huaynaputina
3	21/02/2020	16:23	Huaynaputina
4	26/02/2020	16:03	Huaynaputina

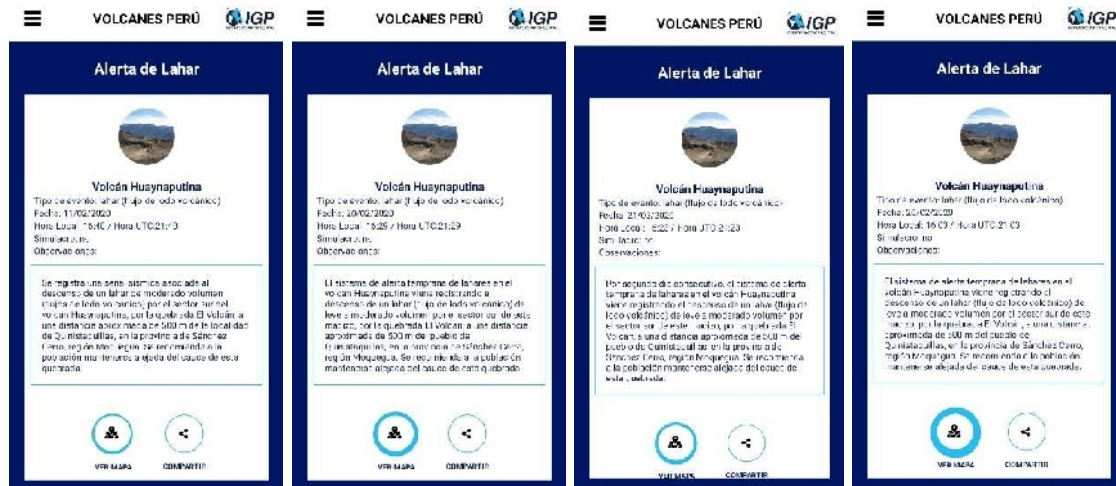


Figura 34.- Alertas del descenso de lahares en el volcán Huaynaputina emitidas a través del aplicativo móvil "Volcanes Perú"

- ✓ 11 de febrero de 2020, a las 16:40 hora local: El CENVUL (IGP) reportó la ocurrencia de un lahar de volumen moderado que descendió por la quebrada El Volcán, ubicada a una distancia de 500 m de la localidad de Quinistaquillas, sin producir daño alguno.
- ✓ 20 de febrero de 2020, a las 16:59 hora local: El CENVUL (IGP) reportó la ocurrencia de un lahar de volumen moderado que descendió por el sector sur del volcán Huaynaputina, por la quebrada El Volcán si causar daños.
- ✓ 21 de febrero de 2020, a las 16:12 hora local: por segundo día consecutivo, el CENVUL (IGP) reporta el descenso de un lahar, de volumen leve a moderado, por el sector sur del volcán Huaynaputina, por la quebrada El Volcán (Figura 35). El flujo contenía abundantes bloques de rocas y afectó tramos cortos de una vía local en la localidad de Quinistaquillas.
- ✓ 26 de febrero de 2020, a las 17:15 hora local: El CENVUL (IGP) reportó la ocurrencia de un lahar de poco volumen que descendió por la quebrada El Volcán ocasionando daños en un tramo de la carretera que comunica el Anexo de San José de Chimpapampa con

el distrito de Quinistaquillas, provincia de General Sánchez Cerro (Figura 36).



Figura 35.- Vista del descenso de un lahar ocurrido el 21 de febrero de 2020.



Figura 36.- Vista del descenso del lahar ocurrido el 26 de febrero de 2020

3.6.3.- Escenarios críticos por lahares

Para el volcán Huaynaputina se ha elaborado el mapa de escenarios críticos por descenso de lahares utilizando el programa LAHARZ (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998), el mismo que permite correlacionar el volumen de un evento lahárico y el área planimétrica en sección transversal inundada por un lahar. Para este objetivo se ha considerado volúmenes de flujos de 2 Mm³, 10 Mm³ y 20 Mm³, en base a escenarios críticos que podrían presentarse, similar a otros volcanes de la región sur del Perú y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 37:

- **Escenario 1** (sobre las quebradas, áreas de color rojo). Considera a las quebradas que drenan del volcán y que pueden ser afectadas por lahares o flujos de barro de poco volumen (2 Mm³), siendo su probabilidad de ocurrencia alta sobre todo en periodos de lluvia. Si estos lahares se producen, podrían afectar un tramo de la carretera Quinistaquillas-San José de Chimpapampa, Quinistaquillas-Moquegua, terrenos de cultivos, etc.
- **Escenario 2** (sobre las quebradas áreas de color naranja). Considera quebradas y valles al pie del volcán que pueden ser cubiertas por lahares con volumen de 10 Mm³ hasta distancias de 18 km desde el cráter del volcán. Si estos lahares se producen, podrían afectar un tramo de la carretera Quinistaquillas-San José de Chimpapampa, tramo de la carretera Quinistaquillas-Moquegua, terrenos de cultivos, canales de agua, etc.

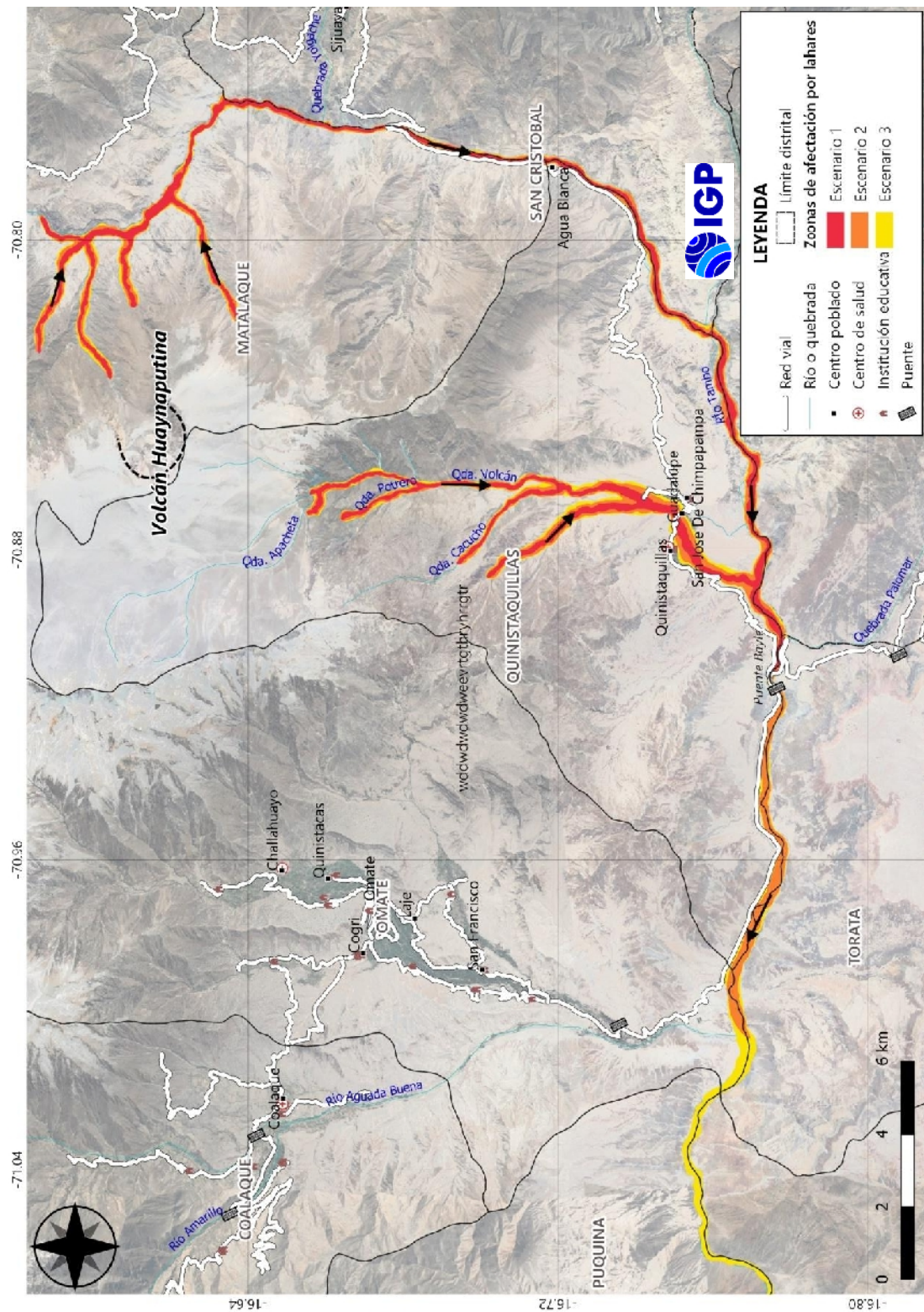


Figura 37.- Mapa de zonificación de escenarios críticos por descenso de lahares en el volcán Huaynaputina.

- **Escenario 3** (sobre las quebradas, áreas de color amarillo). Considera lahares que descienden por las quebradas con volúmenes mayores a 20 Mm^3 y que pueden alcanzar distancias de hasta 30 km desde el volcán, llegando a generar desbordes aguas abajo del río Tambo. Si estos lahares se producen, podrían afectar un tramo de la carretera Quinistaquillas-San José de Chimpapampa, tramo de la carretera Quinistaquillas-Moquegua, terrenos de cultivos, canales de agua, reservorios de agua, etc.

CONCLUSIONES

- En la zona del volcán Ubinas (región Moquegua) es frecuente el descenso de lahares por las quebradas y valles que drenan al valle del mismo nombre, especialmente por la quebrada Volcamayo. Su origen se debe a la temporada de lluvias que arrastra las cenizas acumuladas de erupciones previas. Estos lahares producen daños en tramos de la carretera Arequipa-Ubinas-Huarina, producen erosión y derrumbes en ambas márgenes del río Ubinas y en ocasiones, destruyen terrenos de cultivo, puentes peatonales y muerte de ganado.
- Para el volcán Misti, las evidencias de campo muestran la ocurrencia de lahares de moderada a gran magnitud que habrían discurrido hacia la ciudad de Arequipa a través de las quebradas de San Lázaro, Huarangal, río Chili, entre otras. Estos lahares, presentes en periodos de lluvias, ocasionaron severos daños en viviendas, avenidas y calles de la ciudad, así como la infraestructura de captación de agua de la empresa SEDAPAR en el flanco noroeste del volcán, indispensable para el suministro de agua potable para la ciudad de Arequipa.
- Entorno al volcán Chachani existen quebradas al pie de su flanco sur que drenan los lahares hacia los distritos de Yanahuara, Cayma, Cerro Colorado y Yura. El último lahar generado en periodo de lluvias, avanzó por las quebradas Pasto Raiz, Azufral y torrentera Chullo ocasionando daños y destrucción de algunas viviendas construidas sobre su curso y márgenes, principalmente en el distrito de Yanahuara. Asimismo, generó inundación de áreas de cultivo en distrito de Sachaca.
- En el volcán Coropuna han sido frecuentes la ocurrencia de lahares de magnitud moderada, tal como ocurrió en diciembre de 2016, debido al desprendimiento de hielo en el sector sur del volcán. El lahar causó

daños en bocatomas y canales en las localidades de Tipán, Pampacolca y Viraco, así como la pérdida de terrenos de pastoreo.

- En el volcán Sabancaya ocurren lahares de manera periódica durante el periodo de lluvias que arrastran las cenizas depositadas en las laderas del volcán y áreas aledañas. Estos lahares discurren por el flanco sureste del Sabancaya (límite del distrito de Lluta), y al noroeste del volcán, por las quebradas Huayuray y Hualca Hualca, próximas a las localidades de Pinchollo y Cabanaconde, respectivamente.
- En el volcán Huaynaputina, en enero de 2020, un lahar de moderado volumen arrastró maquinaria pesada que laboraba en la quebrada El Volcán (distrito de Quinistaquillas), demostrando a los pobladores del lugar lo destructivos y peligrosos que pueden ser estos flujos.
- El Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), con base en el monitoreo permanente y en tiempo real que realiza sobre los volcanes activos y potencialmente activos presentes en la región sur del Perú, ha emitido alertas oportunas por el descenso de lahares con origen en los volcanes Misti, Sabancaya, Huaynaputina y Ubinas. Las alertas fueron comunicadas al SINAGERD, autoridades regionales (Arequipa y Moquegua), locales (Caylloma, Ubinas y Arequipa), INDECI y población en general vía APP Volcanes_Perú.
- Considerando la información relevante de lahares históricos, la topografía de las estructuras volcánicas y los máximos de lluvias extremas, se ha realizado el modelamiento numérico para construir mapas de escenarios críticos por descenso de lahares y así identificar las áreas en riesgo, esperando que este tipo de información sea considerada en la gestión del riesgo, que por lahares, se encuentran expuestas la población, medio ambiente y obras de ingeniería.

RECOMENDACIONES

- Realizar de manera periódica la limpieza de los cauces de las quebradas por donde descienden lahares. Evitar echar desmontes o basuras en los cauces de las quebradas. Asimismo, evitar construir viviendas u obras de infraestructura cerca de las riberas de las quebradas para evitar daños por el descenso y desborde de flujos.

- En épocas de lluvia, se recomienda a los pobladores alejarse de las quebradas por donde descienden los flujos de lodo o lahares y a las autoridades, mantenerse alertas ante cualquier emergencia generada por estos flujos. Las alertas les serán enviadas directamente desde el CENVUL (IGP).

- El Instituto Geofísico del Perú, pone a disposición de las autoridades regionales y locales, su capacidad de desarrollo tecnológico, investigación y asesoría técnico-científica para la instalación de sistemas de alerta inminente de lahares mediante la firma de convenios.

- Mantenerse informado en todo momento sobre la ocurrencia de lahares a través de la información proporcionada por el IGP a través de la web del Centro Vulcanológico Nacional (<http://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>) y la aplicación Volcanes Perú

BIBLIOGRAFÍA

- Alavi, H. (2020). Evaluación de peligro por ocurrencia de lahares (flujos de lodo) en el complejo volcánico Chachani – Arequipa. Tesis pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- ANA - Autoridad Nacional del Agua (2017). Complementación de identificación de poblaciones vulnerables por activación de quebradas 2016-2017. Lima: ANA
- Charbonnier, S.J., Thouret, J.-C., Gueugneau, V., Constantinescu, R (2020) - New Insights Into the 2070 cal yr BP Pyroclastic Currents at El Misti Volcano (Peru) From Field Investigations, Satellite Imagery and Probabilistic Modeling. *Front. Earth Sci.* 8:557788.
- Constantinescu, R., Thouret, J. C., Irimuş, I. A. (2011) - Computer modeling as tool for volcanic hazards assessment: an example of pyroclastic flow modeling at El Misti volcano, southern Peru. *Geographia Technica*, 14(2).
- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, M.F., Stinton, A., Labazuy, P., Souriot, T., Van Westen, C. (2005). Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars: *Zeitschrift für Geomorphology N.F., supplement*, vol. 140, p. 209–231.
- Del Carpio J., Macedo O., Puma N., Torres J., Chijcheapaza, R. (2017). Alerta temprana de lahares mediante señales sísmicas en el volcán Misti: caso del lahar del 13 de marzo de 2017. Universidad Nacional de San Agustín, II Congreso Internacional de Geociencias, Arequipa 2017.
- Gerbe, M.-C., Thouret, J.-C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6): 541-561.
- Harpel, C., de Silva, S., Salas, G., 2011. The 2 ka eruption of Misti volcano, southern Peru-The most recent Plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. *Geological Society of America Special papers* 484, 72 pp.

- INEI (2018). Directorio Nacional de Centros Poblados, Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas (https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm)
- Iverson, R. M., Schilling, S. P., Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8), 972-984.
- Jara, L., Navarro R., Thouret, J.-C., Siebe, C., Dávila, J. (2000). The AD 1600 eruption of Huaynaputina as described in early Spanish gazetteers. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, vol. 90, pp. 121–132.
- Kelvin, R. (2000). The hazard from lahars and Jokulhaups. In *Encyclopedia of volcanoes*, p. 973-1004
- Kochitzky, W. H.; Edwards, B. R.; Enderlin, E. M.; Mariño, J.; Manrique, N. (2018). Improved estimates of glacier change rates at Nevado Coropuna Ice Cap, Peru. *Journal of Glaciology*, 175–184 p.
- Mariño, J., Valdivia, D., Soncco, Y., Miranda, R., Machacca, R. (2017). Lahares emplazados en el valle de Ubinas en febrero del 2016: Geología, impacto, modelamiento y evaluación de peligros, región Moquegua. Informe Técnico N°A6745. INGEMMET 19 p.
- Mothes, P. A., Vallance, J. W. (2015). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador: Highlights from Stratigraphy and Observational Records and Related Downstream Hazards. En *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (141-168 p.). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00006-X>
- Naranjo, J., Sigurdsson, H., Carey, S., Fritz, W. (1986). Eruption of the Nevado Del Ruiz Volcano, Colombia, on 13 November 1985: Tephra Fall and Lahars, *Science*, Vol. 233, pp. 961-963.
- Paquereau-Lebti, P., Thouret J.-C., Wörner, G., Fornari, M. (2006). Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(3-4): 251–275.
- Rivera, M., Thouret, J.C., Mariño, J., Berolatti, R., Fuentes, J. (2010). Characteristics and management of the 2006-2008 volcanic crisis at

- the Ubinas volcano (Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 198(1-2): 19-34.
- Rivera, M.; Mariño, J.; Thouret, J.C. (2011). Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas. INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 46, 88 p.
- Rivera M, Mariño J., Samaniego P., Delgado R., Manrique N. (2016). Geología y Evaluación de Peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Boletín N°61 Serie C, Geodinámica e ingeniería geológica, INGEMMET, Lima, 122 p., anexos y mapas
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 323, p. 110-128.
- Sandri L., Thouret J.C., Constantinescu R., Blass S., Tonini R. (2014). Long-term multi-hazard assessment form El Misti volcano (Peru). *Bulletin of Volcanology* (2014) 76:771.
- Schilling, S. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar inundation hazard zones. Report, 98-638 p.USGS.
- Thouret, J.C., Antoine, S., Magill, C., Ollier, C. (2019). Lahars and debris flows: characteristics and impacts. *Earth-Science Reviews* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.1030037>
- Thouret, J. C., Cantagrel, J. M., Salinas, R., Murcia, A. (1990). Quaternary eruptive history of Nevado del Ruiz (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1-4), 225-251.
- Thouret, J.-C. (1990). Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1-4): 177-201.
- Thouret, J.-C., Juvigné, E., Gourgaud, A., Boivin, P., Dávila, J. (2002). Reconstruction of the AD 1600 explosive eruption at Huaynaputina volcano, Peru, based on geologic evidence and Spanish chronicles. *J. Volc. Geoth. Res.* 115, (3-4): 529-570

- Thouret, J.C.; Finizola, A.; Fornari, M.; Legeley-Padovani, A.; Suni, J., Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610.
- Tilling, R. I. (1989). Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos. Santa Fe, Nuevo México, USA.
- Vallance, J. W., Iverson, R. M. (2015). Lahars and Their Deposits. *Encyclopedia of volcanoes*, 649-664 p.
- Vargas, R.; Thouret, J.-C.; Delaite, G.; Van Westen, C.; Sheridan, M.F., (2010). Mapping and assessing volcanic and flood hazards and risks, with emphasis on lahars, in Arequipa, Peru. En: Groppelli, G., & Viereck-Goette, L., eds. *Stratigraphy and geology of volcanic areas*. Boulder, CO: Geological Society of America, Special Paper 464, p. 265-280.
- Vela, J.; Cuno, J.J., (2017). Evaluación de los peligros geológicos que afectan al centro poblado de Huarina (Distrito Matalaque, Región Moquegua). Informe Técnico N A6785. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. 16 p.