

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7104

EVALUACIÓN DE CAÍDA DE CENIZA DEL VOLCÁN SABANCAYA EN EL VALLE DEL COLCA Y ALREDEDORES

Región Arequipa
Provincia Caylloma



DICIEMBRE
2020

Informe Técnico Nro. A7104

EVALUACIÓN DE CAÍDA DE CENIZA DEL VOLCÁN SABANCAYA EN EL VALLE DEL COLCA Y ALREDEDORES

Provincia de Caylloma

Región Arequipa



Observatorio Vulcanológico del INGEMMET

Equipo Técnico

Ing. David Valdivia Humerez
Ing. Saida Japura Paredes
Ing. Rosario Paxi Zamalloa
MSc. Rigoberto Aguilar Contreras
MSc. Edu Taipe Maquerhua

DICIEMBRE – 2020

CONTENIDO

RESUMEN	3
1 INTRODUCCIÓN	4
1.1 Objetivo	4
1.2 Antecedentes	4
1.3 Ubicación de la Zona de Estudio	4
2 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO ERUPTIVO	5
2.1 Caracterización de las Columnas Eruptivas.....	5
2.2 Altura y Dispersión Predominante de las Emisiones.....	6
2.3 Flujos Piroclásticos	8
3 MONITOREO DE CENIZA VOLCÁNICA.....	9
3.1 Cenizómetros	9
3.2 Red de Cenizómetros	9
3.3 Información Recolectada	10
4 CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS.....	11
4.1 Granulometría	11
4.2 Parámetros Estadísticos	12
4.3 Mineralogía	15
5 CALCULO DE VOLUMEN	17
6 RESULTADOS EN MAPAS	19
6.1 Isópacas.....	19
6.2 Isomasas.....	20
7 EFECTOS DE LA CENIZA EN LA SALUD.....	22
7.1 Problemas Respiratorios	22
7.2 Efectos en los Ojos	24
8 AFECTACIÓN POR CAIDA CENIZA	24
8.1 Poblados y Anexos Afectados	24
8.2 Efectos en la Agricultura	26
8.3 Efectos en la Ganadería.....	27
8.4 Efecto en Infraestructura Local.....	29
8.4.1 Reservorios de agua	29
8.4.2 Centrales Hidroeléctricas	30
8.5 Efectos en la Minería.....	31
8.6 Efectos Secundarios	32
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES.....	35
BIBLIOGRAFIA.....	36

RESUMEN

El volcán Sabancaya es uno de los volcanes más activos del Perú, en la actualidad es el único en proceso eruptivo, edificado durante los últimos 10 mil años es considerado como el volcán más joven de nuestro país. Este volcán es parte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, su última erupción ocurrió entre los años 1986 y 1998, alcanzando un índice de explosividad volcánica (IEV) de 2 (Gerbe y Thouret, 2004).

El 6 de noviembre del 2016 a las 20:40 horas ocurrió una explosión, la cual fue seguida de emisiones continuas de ceniza, con columnas eruptivas que alcanzaron alturas entre 1000 y 3000 metros sobre el cráter. Este evento marcó el comienzo de un nuevo proceso eruptivo, caracterizado por una actividad explosiva de leve a moderada con formación y destrucción de domos de lava, siendo el principal peligro volcánico la caída de ceniza, la cual ha venido afectando a diferentes pueblos de la provincia de Caylloma.

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), monitorea este volcán en tiempo real desde al año 2013 y entre sus diferentes métodos de monitoreo emplea el monitoreo geológico mediante el análisis y cuantificación de la ceniza emitida por el volcán. Para este fin, administra una red de 43 cenizómetros ubicados alrededor del volcán, estos instrumentos permiten medir espesores, densidad de área y recolectar muestras sin alteraciones; y a su vez, permite evaluar la afectación de la caída de ceniza en los poblados y anexos asentados en los alrededores volcán Sabancaya. Los productos son mapas de Isópacas e Isomasas que muestran la cantidad de ceniza depositada en los poblados y anexos, con esta información se establece las zonas más afectadas por la caída de ceniza, los cuales fueron los anexos de Sallalli y Hornillos. Así mismo, se realizaron análisis granulométricos de 4 muestras, indicando que los depósitos de ceniza se clasifican como mal sorteada en las cercanías del volcán y moderadamente sorteada entre 20 a 24 km del volcán, generando una sedimentación homogénea; además, las muestras de ceniza estuvieron compuestas por material juvenil (90.2 - 86.8%), líticos oxidados, hidrotermalizados y accidentales. Finalmente, el volumen de magma expulsado como ceniza volcánica durante el periodo octubre 2019 – octubre 2020 se estimó en 270,000 m³.

1 INTRODUCCIÓN

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) es una entidad rectora de la geología en el país. Según el ROF del INGEMMET (Decreto Supremo Nro. 035-2007-EM, ver Anexo), en el Artículo 3, dentro sus ámbitos de competencia y funciones, esta el de “Identificar, estudiar y monitorear los peligros asociados a movimientos en masa, actividad volcánica, aluviones, tsunamis y otros”. En ese sentido, mediante su observatorio vulcanológico desarrolla estudios y monitoreo de peligros geológicos de origen volcánico.

Así mismo, el INGEMMET brinda asistencia técnica e información actualizada, confiable y oportuna acerca de los peligros volcánicos, permitiendo identificar, aquellas zonas urbanas o rurales, que podrían verse afectadas por estos fenómenos de origen volcánico. Estos estudios son concebidos principalmente como herramientas de apoyo a la planificación territorial y la gestión del riesgo (planes de emergencia). Esta labor es desarrollada por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.

La actividad del Sabancaya durante el año 2020 presentó explosiones de leves a moderadas, actividad que el INGEMMET viene realizando el seguimiento permanente, informando a las autoridades sobre la evolución del proceso eruptivo, así como los efectos que generan la dispersión y caída de ceniza.

1.1 Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo definir las áreas afectadas por la caída de ceniza volcánica debido a la actividad del Sabancaya durante el año 2020 y sus posibles efectos en la población, ganadería, agricultura e infraestructura.

1.2 Antecedentes

Estudios geológicos efectuados por Gerbe y Thouret (2004); Mariño, (2012); Samaniego et al., (2016); Rivera et al., (2016), entre otros, describen el comportamiento eruptivo pasado del Sabancaya en los últimos 10,000 años. De acuerdo a su actividad recurrente en el pasado, este volcán ha presentado erupciones efusivas lávicas y actividad explosiva moderada con considerables emisiones de ceniza. Así mismo, la actividad eruptiva del Sabancaya ocurrida en época histórica, durante los últimos 400 años, consistió en erupciones explosivas de leves a moderadas (Índice de Explosividad Volcánica IEV: 1-2). Durante este periodo presentó cuatro erupciones explosivas de leves a moderadas ocurridas en los años 1750, 1784, 1990–1998 y 2016 al presente, caracterizados por una intensa actividad fumarólica y emisiones de ceniza (Rodríguez & Uribe, 1994; Gerbe y Thouret, 2004). Durante la erupción 1990-1998, se midió ceniza volcánica acumulada, hasta 3 cm de espesor a 8 km al Este del volcán.

1.3 Ubicación de la Zona de Estudio

El volcán Sabancaya está ubicado en la provincia de Caylloma, en la región Arequipa a 75 km al noroeste de la ciudad de Arequipa y 20 km al sur del valle del Colca (Figura 1). El centro de este volcán (cráter) se encuentra en las coordenadas: Este: 193987 y Norte: 8252557, zona 19L, y presenta una altura máxima de 5622 msnm.

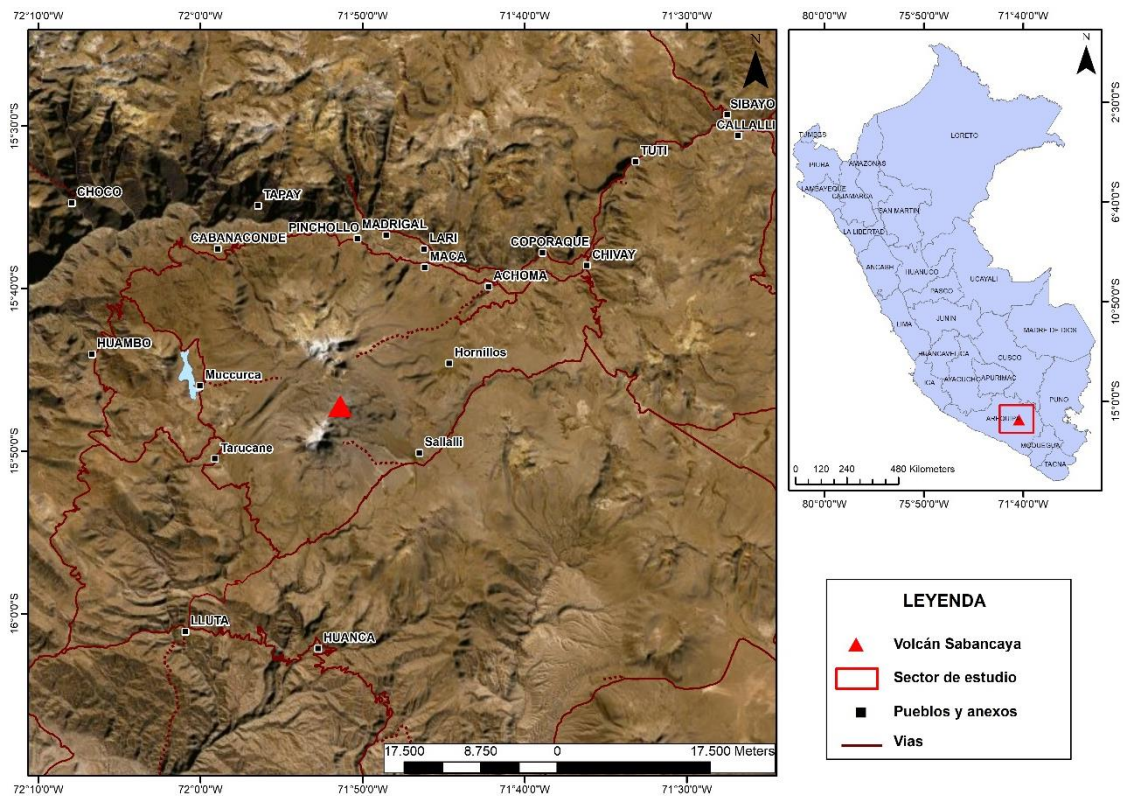


Figura 1: Mapa de ubicación del volcán Sabancaya.

2 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO ERUPTIVO

El análisis multiparamétrico de la actividad volcánica, muestra que este proceso está caracterizado por la ocurrencia de actividad sísmica relacionada a explosiones volcánicas, dinámica de fluidos y fracturamiento de estructuras internas del volcán, se registra a su vez una constante deformación superficial provocada por el incremento de presión en una cámara magmática profunda (~12 km), hay una persistencia de anomalías térmicas, desgasificación de gases volcánicos, principalmente dióxido de azufre (SO₂). Dentro de esta actividad, se puede observar un importante proceso de expulsión de lava a manera de ceniza volcánica, siendo este el principal peligro volcánico del Sabancaya que se viene reportando para el actual proceso eruptivo y cuyo análisis y efectos se tratan de manera detallada en este informe.

2.1 Caracterización de las Columnas Eruptivas

Durante el año 2020 la actividad se mantiene en niveles moderados. Las columnas eruptivas se mantuvieron entre 1500 y 2000 m.s.c. (metros sobre el cráter), la composición de estas columnas es ceniza (lava pulverizada), gases, vapor de agua y bloques balísticos (fragmentos de lava).

Las emisiones predominantes tienen una coloración gris claro que corresponde a una composición de ceniza muy fina, estas se presentaron en emisiones de alturas variables a lo largo de todo el periodo de estudio. Las emisiones con mayor contenido de ceniza y mayor tamaño de granos son aquellas con una coloración gris oscuro, las que

estuvieron presentes en menor proporción, principalmente durante los meses de abril a octubre. Las emisiones con mayor contenido de gases magmáticos (coloración azulina) se presentaron esporádicamente durante los meses de enero a marzo y de mayo a septiembre. Estas variaciones se pueden ver en la figura 2, donde la coloración de los puntos representa el contenido predominante de las emisiones volcánicas.

Otra característica de las emisiones observada durante todo el año, son los pequeños periodos de incremento y disminución en la altura de las emisiones, que denotan periodos de intrusión magmática y despresurización.

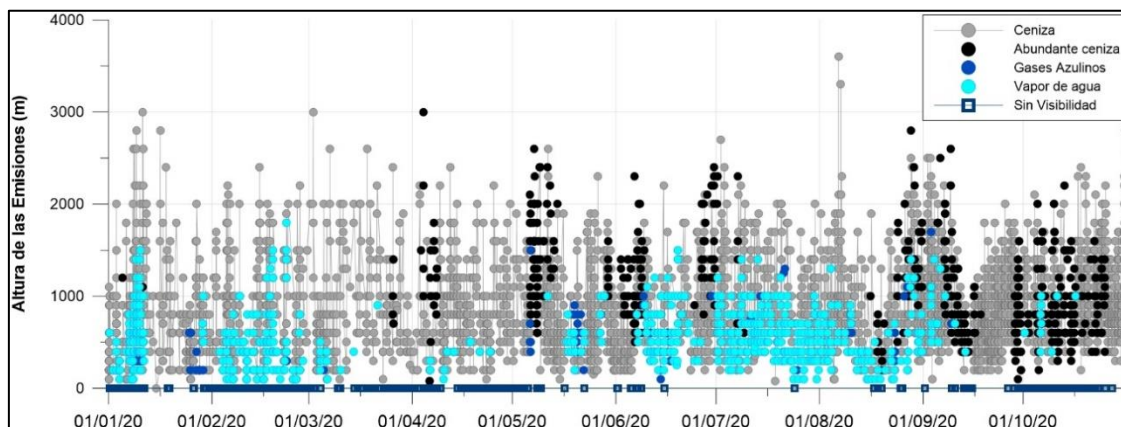


Figura 2: Composiciones y altura de las columnas eruptivas en el Sabancaya, periodo 2020.

2.2 Altura y Dispersión Predominante de las Emisiones

Desde enero hasta marzo de 2020 la actividad fue leve; en estos meses las emisiones de gases y ceniza se mantuvieron constantes con alturas promedio de 600 m.s.c. las cuales, fueron dispersadas por el viento principalmente en dirección sureste, noroeste, suroeste y oeste del Sabancaya. Los días 11 de enero y 03 febrero se registraron explosiones importantes con dispersiones al Sureste y Oeste respectivamente alcanzando alturas de hasta 3000 m.s.c. (Figura 3-A), reportándose caída de ceniza en los poblados de Chivay, Achoma, Huambo, Madrigal, Lari, Maca y anexo de Sallalli.

Desde abril hasta junio, la actividad se mantuvo leve, las emisiones se mantuvieron constantes con alturas promedio de 800 m.s.c. las cuales, fueron dispersadas principalmente en dirección este, sureste y noreste del volcán, el 04 de abril del 2020 se registraron explosiones importantes alcanzando alturas de hasta 3000 m.s.c. que fueron dispersadas al Este y Noreste (Figura 3-B), reportándose caída de ceniza en Ichupampa, Yanque, Coporaque, Chivay, Pinchollo, Madrigal, Lari y anexo de Hornillos.

Desde julio hasta septiembre la actividad fue leve; en estos meses las emisiones se mantuvieron constantes con alturas promedio de 800 m.s.c. las cuales, fueron dispersados por el viento principalmente en direcciones sureste, este y suroeste del Sabancaya, el 06 de agosto del 2020 se registraron explosiones importantes con emisiones de vapor de agua y ceniza alcanzando alturas de hasta 3,600 m.s.c. que fueron dispersada al SE (Figura 3-C), reportándose caída de ceniza en los poblados de Maca, Achoma, Lari, Chivay, Ichupampa, Yanque, Coporaque, Madrigal y los anexos de Sallalli y Hornillos.

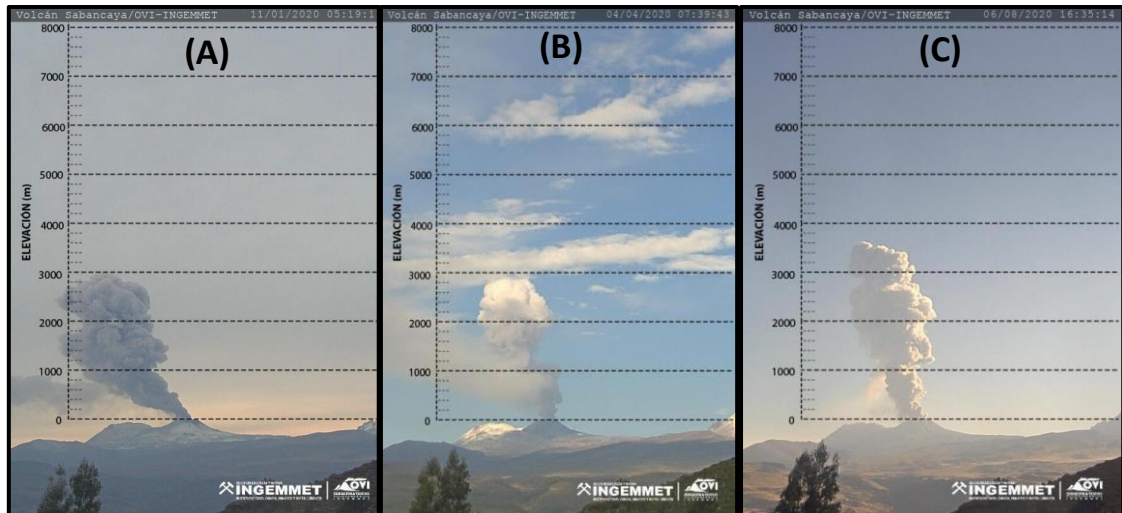


Figura 3: (A) Explosión día 11/01/2020 a las 05:19 horas, altura de columna 3000 m.s.c. dispersión hacia el este y sureste. (B) Explosión del día 04/04/2020, a las 07:39 horas, altura de la columna: 3000 msc, dispersión hacia el NE. (C) Explosión del día 06/08/2020, a las 16:35 Hrs., altura de la columna: 3800 msc, dispersión hacia el E.

Las direcciones predominantes de la dispersión de ceniza emitida durante el periodo del año 2020, fueron al sureste con 35%, al este con 16%, al suroeste con 13%, noreste con 10% y en menor porcentaje se tuvo direcciones de dispersión al oeste con 9 %, sur con 8% y norte 3%, esto se puede ver en el diagrama de torta de la figura 4.

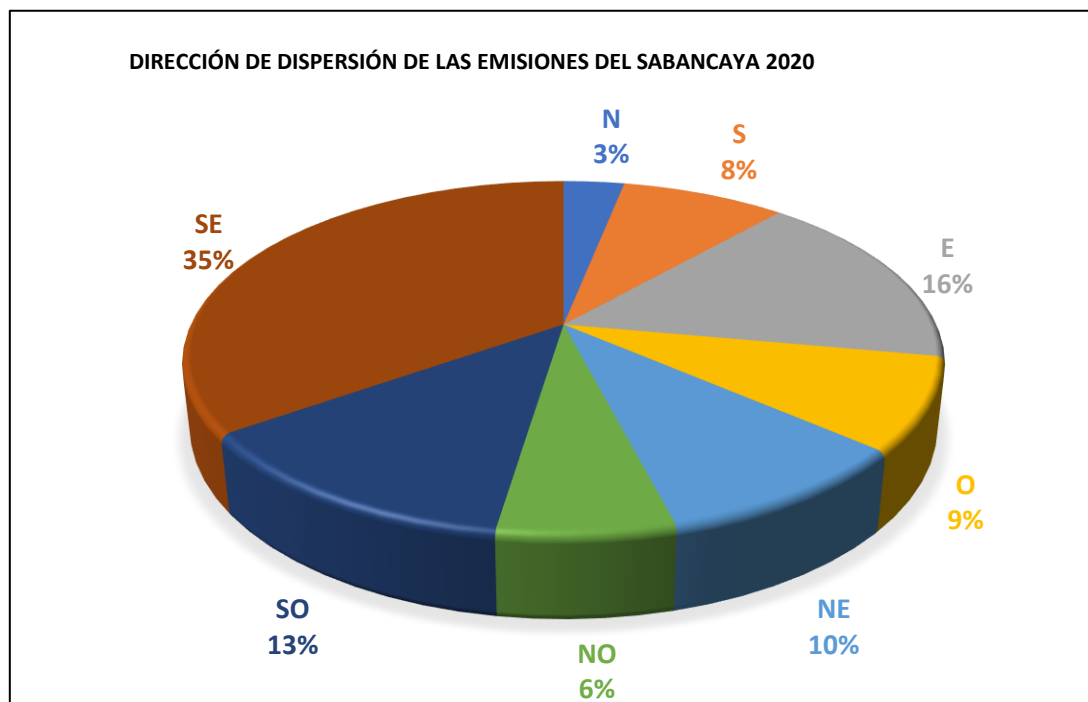


Figura 4: Distribución porcentual de las direcciones predominantes de emisiones.

2.3 Flujos Piroclásticos

Los flujos piroclásticos, son flujos compuestos por gases y material sólido (ceniza y rocas de diverso tamaño) capaces de fluir a grandes temperaturas y velocidades y de sobrepasar obstáculos a su paso. La velocidad que alcanzan varía según la proporción de los sólidos y gases. En el extremo más diluido (mucho más gas que sólidos) se encuentran las oleadas piroclásticas, las cuales alcanzan mayor velocidad y distancia. Otro aspecto que influye en el alcance de estos flujos es la energía de la erupción y la pendiente del terreno por el cual fluyen. Dependiendo del volumen y la distancia que alcanzan, los flujos piroclásticos son considerados como los eventos volcánicos más destructivos conocidos.

El 10 y 11 de enero y el 27 de febrero del 2020, se registraron explosiones energéticas seguidas de flujos piroclásticos de pequeño volumen y corto alcance (Figura 5), estos estuvieron compuestos de bloques de rocas y ceniza. La distancia máxima alcanzada fue de 1.6 km desde su origen, el cráter.



Figura 5. Imagen térmica del flujo piroclástico ocurrido el 11 de enero de 2020.

3 MONITOREO DE CENIZA VOLCÁNICA

El seguimiento de la ceniza que emite el volcán consiste en cuantificar el volumen de este producto volcánico y su caracterización mediante el análisis granulométrico y mineralógico.

3.1 Cenizómetros

Los cenizómetros son instrumentos que permiten recolectar la ceniza emitida por el volcán, esta diseñada con un área de recolección conocida y un compartimento graduado con una escala milimétrica, lo que permite medir el espesor de ceniza depositada (Figura 6. Estos instrumentos, permiten medir espesores, densidad de área y densidad total de pequeños depósitos de cenizas < 20 mm. Su fabricación está basada en el modelo de cenizómetros elaborados por Bernard (2013). Las muestras recolectadas permiten realizar análisis mineralógicos, granulométricos, petrográficos y geoquímicos, con el fin de hacer el seguimiento de las características del magma involucrado en este proceso eruptivo.

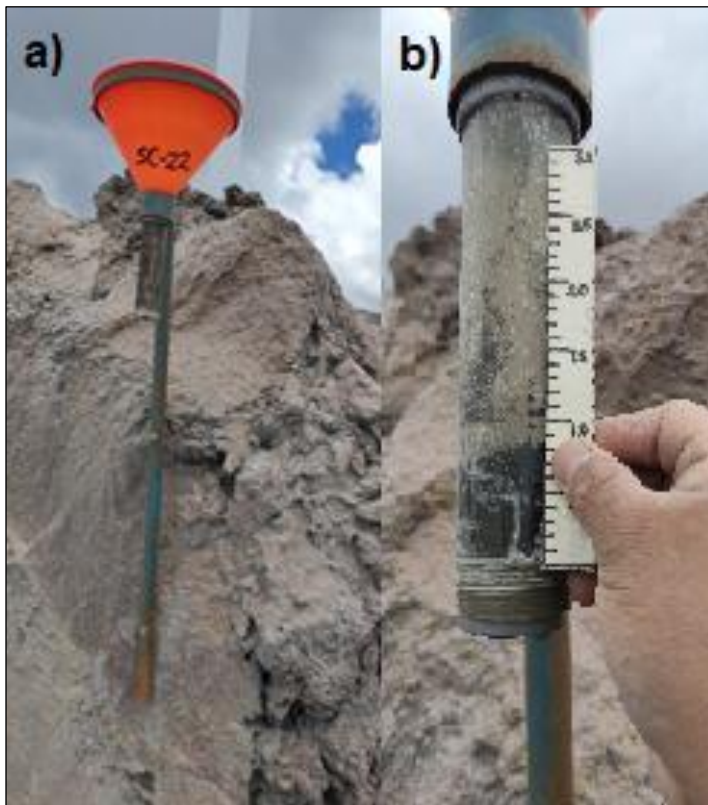


Figura 6: a) Cenizómetro SC-22 estación Sab11, b) Medición de espesor de ceniza cenizómetro SC-22.

3.2 Red de Cenizómetros

El OVI administra una red de 43 cenizómetros en el volcán Sabancaya (Figura 7). Los cuales se instalaron 33 en el año 2018 y 10 cenizómetros en setiembre del 2019, con el apoyo de los voluntarios de la plataforma de defensa civil de la provincia de Caylloma y la ONG PREDES-AGRA.

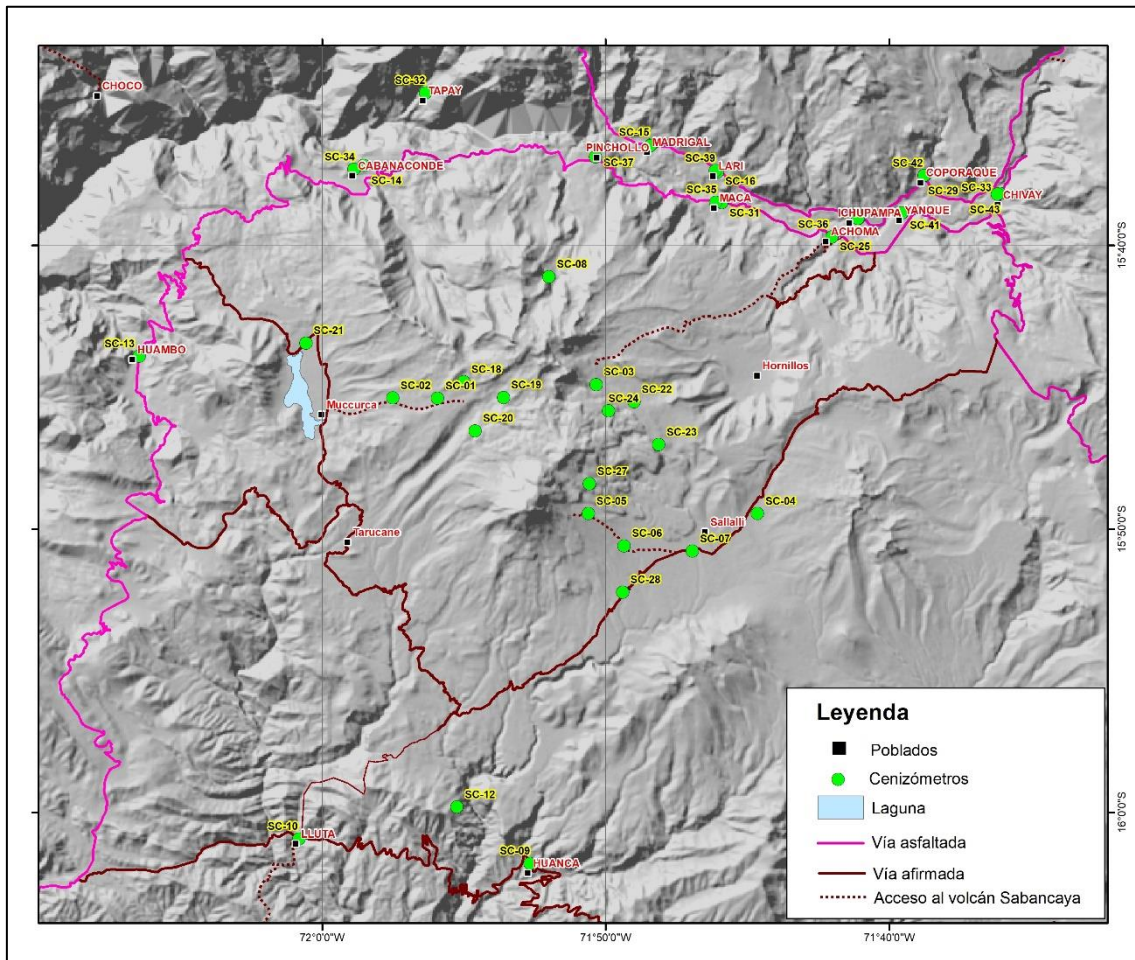


Figura 7: Mapa de ubicación de cenizómetros y muestras tomadas en el año 2020 en el volcán Sabancaya.

3.3 Información Recolectada

Para el presente informe se ha considerado el análisis correspondiente al periodo de octubre del 2019 a septiembre del 2020. En función a la calidad y completitud del muestreo, se ha considerado para este periodo un total de 13 muestras de ceniza (Cuadro 1).

Estas 13 muestras, presentan diferentes cantidades: las muestras correspondientes a la zona cercana al volcán, presentan espesores de 6.1 mm al Sureste a una distancia de 2.6 km, mientras al Noreste se tiene un espesor de 2.7 mm a 3.6 km y al Noroeste presenta un espesor de 1 mm a 8.7 km del cráter.

En relación a las muestras más lejanas estas presentan menor cantidad, así tenemos que a una distancia de 12.7 km al Sureste del volcán los espesores son de 0.5 mm, mientras que a 20.7 km al Noreste se cuenta con un espesor de 0.3 mm, y a 18 km al Noroeste del cráter se tiene un espesor de 0.15 mm.

Cuadro 1: Muestreo de cenizas.

Periodo	Código de Muestra	Código de Cenizómetros	Espesor (mm)	Distancia del cráter (km)
Oct2019 - Set 2020	sab-20-09	SC-27	6.1	2.6
	sab-20-04	SC-22	2.7	3.7
	sab-20-03	SC-05	2.4	4.4
	sab-20-15	SC-23	1.3	5.8
	sab-20-05	SC-01	1	8.8
	sab-20-08	SC-06	0.9	7.2
	sab-20-10	SC-28	0.7	9.9
	sab-20-12	SC-04	0.5	12.7
	sab-20-13	SC-24	0.5	5.3
	sab-20-06	SC-02	0.4	11.5
	sab-20-19	SC-08	0.4	11.3
	sab-20-02	SC-15	0.3	20.6
	sab-20-17	SC-17	0.2	23.8

4 CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS

En esta sección se describe el análisis realizado a las muestras de ceniza recolectadas, con la finalidad de caracterizarlas a nivel granulométrico y mineralógico. Se presentan, así mismo, los resultados obtenidos de este análisis.

4.1 Granulometría

El análisis granulométrico se usa como principal fuente de datos para caracterizar la población de granos y examinar las variaciones en el tamaño de grano en los depósitos de ceniza (Walker, 1971), el objetivo es conocer las condiciones de sedimentación mediante la cuantificación de los parámetros granulométricos, que nos permiten establecer su grado de selección, distancia recorrida, niveles de energía, etc. (Spalletti, 1980).

El método utilizado para el análisis granulométrico, consiste en hacer pasar una muestra a través de una serie de mallas (tamices) con diferentes diámetros de apertura, que van desde 1 mm hasta 0.032 mm. Las proporciones retenidas en cada malla "refus", son pesadas y los resultados se muestran en el Cuadro 2.

Se realizó el tamizado de 4 muestras: Sab-20-09 tomado a 6.7 km; Sab-20-10 a 10 km; Sab-20-16 a 20.4 km y Sab-20-17 a 23.8 km, distancias referenciadas al cráter del volcán Sabancaya, con esta información luego realizar el análisis de parámetros estadísticos.

Cuadro 2: Ensayos granulométricos del depósito.

Malla		Sab-20-09			Sab-20-10			Sab-20-16			Sab-20-17		
		Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.
(mm)	Phi	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)
1	0.0	10.12	2.21	2.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	1.0	59.32	12.97	15.19	0.56	1.36	1.36	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.25	2.0	152.22	33.29	48.48	9.63	23.31	24.67	0.28	2.66	2.67	0.06	1.69	1.69
0.18	2.5	57.61	12.60	61.07	8.34	20.19	44.86	0.58	5.51	8.18	0.22	6.20	7.89
0.125	3.0	47.56	10.40	71.48	9.49	22.97	67.83	3.09	29.34	37.52	0.71	20.00	27.89
0.09	3.5	26.24	5.74	77.21	5.68	13.75	81.58	3.08	29.25	66.76	0.90	25.35	53.24
0.063	4.0	16.86	3.69	80.90	4.74	11.47	93.05	2.09	19.85	86.61	0.91	25.63	78.87
0.032	5.0	87.33	19.10	100.00	2.87	6.95	100.00	1.41	13.39	100.00	0.75	21.13	100.00
> 0.032		13.35	2.92		1.50	3.63		0.49	4.65		0.30	8.45	
total		457.26			41.31			10.53			3.55		

4.2 Parámetros Estadísticos

Para llevar a cabo el análisis estadístico, previamente se convierte los diámetros de las partículas expresadas en milímetros (mm) a unidades Phi (Φ). La escala phi, fue definida por Krumbein (1934) como el logaritmo negativo de base 2 del tamaño de grano en milímetros:

$$\text{Phi } (\Phi) = -\log_2 N$$

Donde: N = tamaño de grano en mm o la apertura de cada malla en mm.

Los datos obtenidos son representados gráficamente en histogramas, donde en el eje "Y" van los diámetros de las partículas que están expresadas en unidades (Φ), mientras que, en que el eje "X" van los pesos en cada fracción retenida expresadas en porcentaje (%). Para graficar los histogramas se utilizó el software SFT Kware de acuerdo con el método de fragmentación y transporte secuencial (Sequential Fragmentation SFT por su sigla en inglés) (Brown, 1989).

Los parámetros estadísticos según Folk (1966) e Imman (1952), incluyen la mediana (Md), media (Mz), desviación estándar ($\sigma\emptyset$), asimetría (SkG) y curtosis (KG).

Mediante los resultados de los parámetros estadísticos obtenidos, se pudo evaluar las características de generación y emplazamientos de 4 muestras dentro del área de estudio (Cuadro 3).

Cuadro 3: Cuadro resumen de los parámetros granulométricos de las muestras analizadas.

Código	Mediana (Md) Inman	Media (Mz) Folk	Desviación Estándar (σ) folk	Asimetría (SkI) Folk	Curtosis (KG) Folk
Sab-20-09	2.05	2.37	1.47	0.25	0.88
Sab-20-10	2.55	2.58	0.94	0.06	0.98
Sab-20-16	3.2	3.18	0.77	-0.02	0.98
Sab-20-17	3.4	3.38	0.81	-0.02	1.03

- La muestra Sab-20-09 tiene una distribución multimodal (Figura 8). La mediana (Md) presenta un valor de 2.05 Φ , mientras que el tamaño de promedio de grano (Mz) es de 2.37 Φ . Estos resultados nos muestran que el depósito está mal sorteado (σ), con asimetría positiva (Sk1) y curva platicúrtica.

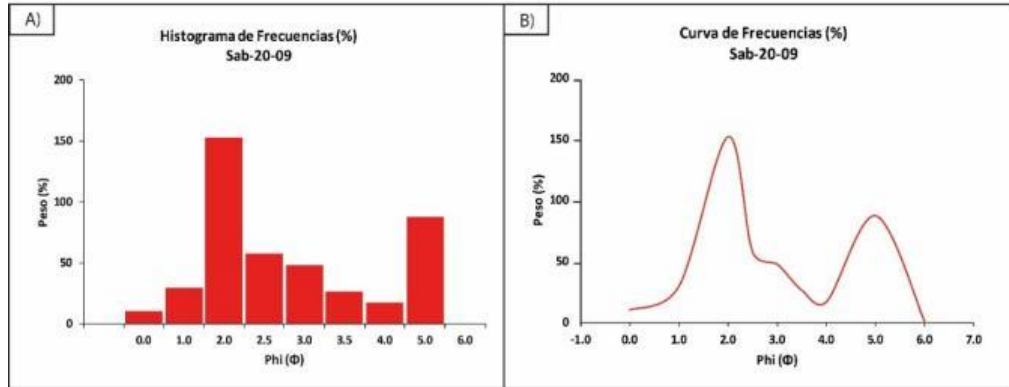


Figura 8: A) Histogramas de frecuencia y B) curvas de frecuencia de Sab-20-09.

- La muestra Sab-20-10 tiene una distribución multimodal (Figura 9). La mediana (Md) presenta un valor de 2.55 Φ , mientras que el tamaño de promedio de grano (Mz) es de 2.58 Φ . El depósito presenta un sorteo moderado (σ), cercanamente simétrica (Sk1) y curva mesocúrtica.

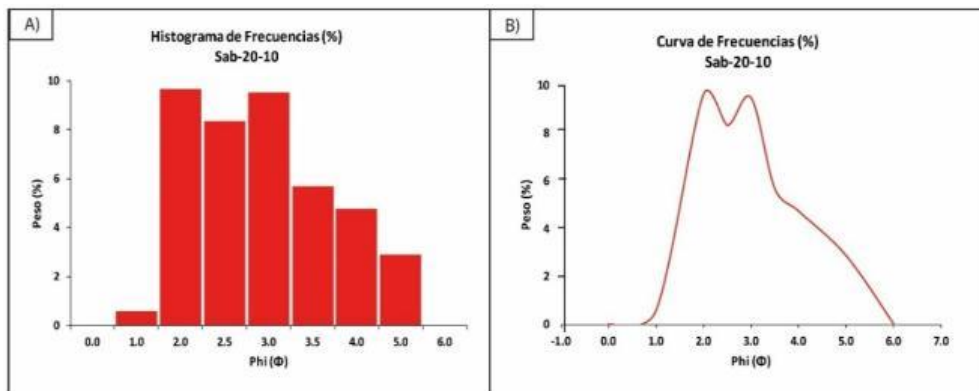


Figura 9: A) Histogramas de frecuencia y B) curvas de frecuencia de Sab-20-10.

- La muestra Sab-20-16 tiene una distribución unimodal (Figura 10). La mediana (Md) presenta un valor de 3.2 Φ , mientras que el tamaño de promedio de grano (Mz) es de 3.18 Φ . El depósito presenta un sorteo moderado (σ), cercanamente simétrica (Sk1) y curva mesocúrtica.

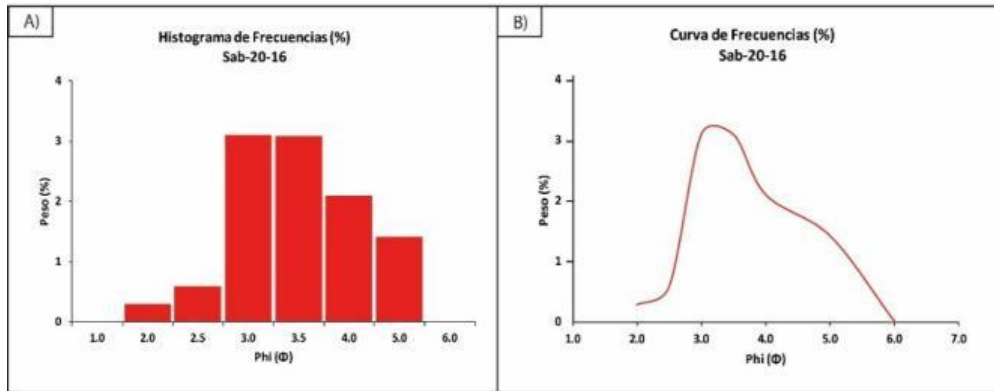


Figura 10: A) Histogramas de frecuencia y B) curvas de frecuencia de Sab-20-16.

- La muestra Sab-20-17 tiene una distribución unimodal (Figura 11). La mediana (Md) presenta un valor de 3.4 Ø, mientras que el tamaño de promedio de grano (Mz) es de 3.38 Ø. El depósito presenta un sorteo moderado (σ), cercanamente simétrica (Skl) y curva mesocúrtica.

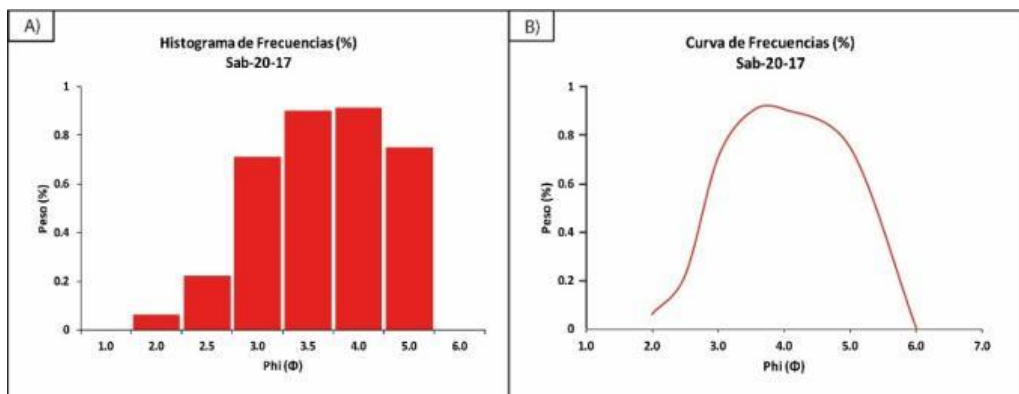


Figura 11: A) Histogramas de frecuencia y B) curvas de frecuencia de Sab-20-17

Las muestras presentan curvas con tendencia multimodal cercanas al volcán y unimodal lejos del volcán, esto indica que la sedimentación del tamaño de partículas es variable según la distancia al cráter, influenciada principalmente por la dirección del viento (Biaass and Bonadonna, 2011).

La mediana (Md) presenta valores entre en 2.05 a 3.4 Ø y la media 2.37 a 3.38 Ø. Esto indica que mientras más alejado del cráter los valores de la mediana y media se acerca a los valores positivos (partículas finas), esto se debe a la dispersión de las partículas a causa de la dirección de viento (sotavento).

Las muestras están clasificadas entre mal sorteadas a moderadamente sorteadas, indicando un mejor ordenamiento de las partículas por acción del viento (sotavento) y, por consiguiente, una sedimentación homogénea de las partículas

La asimetría (Skl) de las muestras cercanas al volcán presenta una tendencia hacia los finos, mientras que las muestras en entre 20 y 24 km del volcán presenta un equilibrio

en el tamaño de las partículas. Esto estaría controlado por la fuerza e influencia seleccionadora del viento.

Las curvas presentan una variación entre platicúrtica a mesocúrtica, que indica una moderada selección del depósito.

4.3 Mineralogía

La mineralogía de la ceniza nos proporciona información sobre la dinámica del proceso eruptivo. Los componentes litológicos de la ceniza recolectada desde octubre del 2019 hasta octubre del 2020, han sido estudiados en base a 2 muestras: Sab-20-09 y Sab-20-10, cuyo punto de recolección está ubicada a 2.6 y 10 km de distancia del cráter del volcán respectivamente, en la fracción retenida en el tamiz de 500 micras. El estudio mineralógico se realizó mediante el microscopio binocular, que permitió caracterizar los componentes de la ceniza conformada principalmente por líticos juveniles de colores grises claros y grises oscuros, cristales mayormente de plagioclasa, pocos olivinos y biotita; y una cantidad de partículas oxidadas e hidrotermalizadas, también se encontraron algunos líticos accidentales (Figura 12 y Cuadro 4).

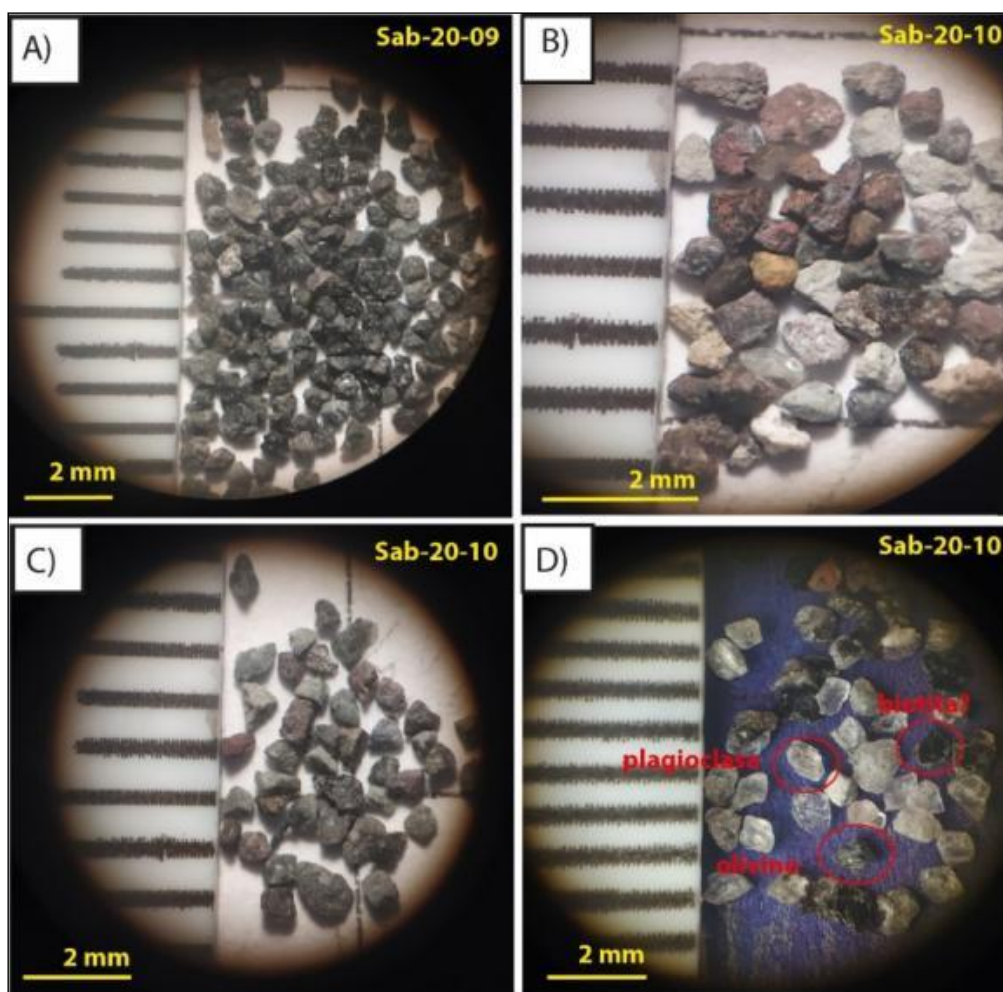


Figura 12: A) Lítico juvenil gris oscuro; B) Cristal; C) Lítico accidentales; D) Lítico no juvenil Oxidado e hidrotermalizados de la fracción de 500 micras.

Cuadro 4: Porcentaje del conteo litológico en la fracción de 500 micras.

Código	500 micras (%)			
	L. juveniles	Cristales libres	L. oxidados	L. accidentales
Sab-20-09	90.2	5.4	2.5	2.0
Sab-20-10	86.8	4.9	4.1	3.6

Los resultados de este análisis muestran el porcentaje de composición (Figuras 13 y 14) y son los siguiente:

- Líticos juveniles. En la muestra Sab-20-09, se tiene un 90.2% mientras que en la Sab-20-10 se tiene un 86.8%.
- Cristales de plagioclasas, biotita y pocos olivinos. En la muestra Sab-20-09 se tiene 5.4% y en la muestra Sab-20-10 se tiene 4.9%.
- Líticos oxidados e hidrotermalizados presentan color blanquecino y pardo rojizo. En la muestra Sab-20-09 se tiene 2.5%, mientras que en la muestra Sab-20-10 se tiene 4.1%.
- Líticos accidentales presentan color gris y pardo oscuro. El porcentaje en la muestra Sab-20-09 es de 2.0% y en la muestra Sab-20-10 se tiene 3.6%.

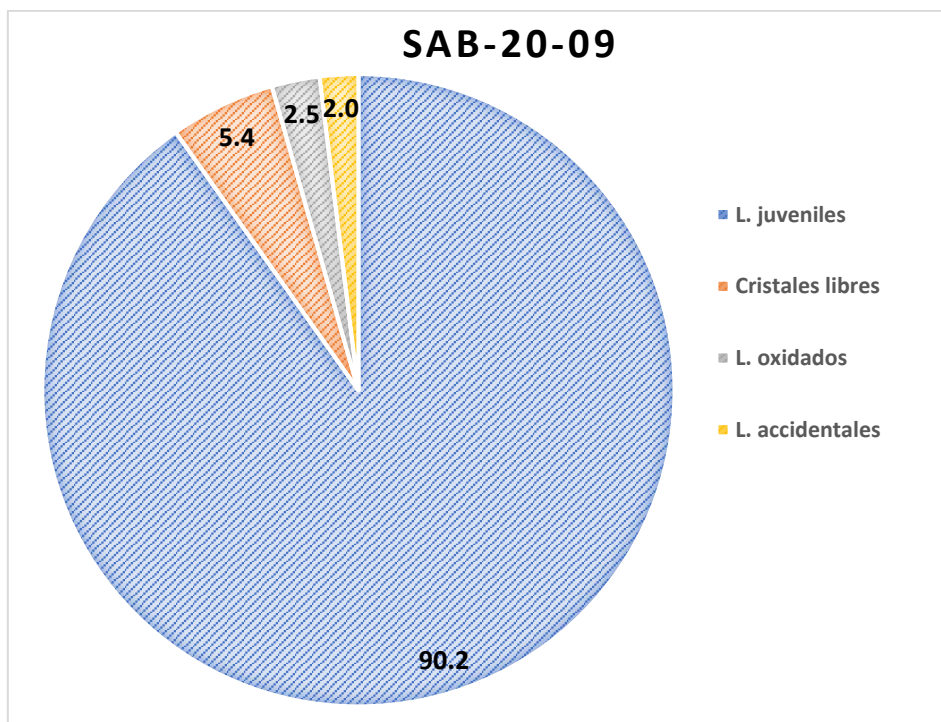


Figura 13: Porcentajes de componentes litológicos de las muestras Sab-20-09.

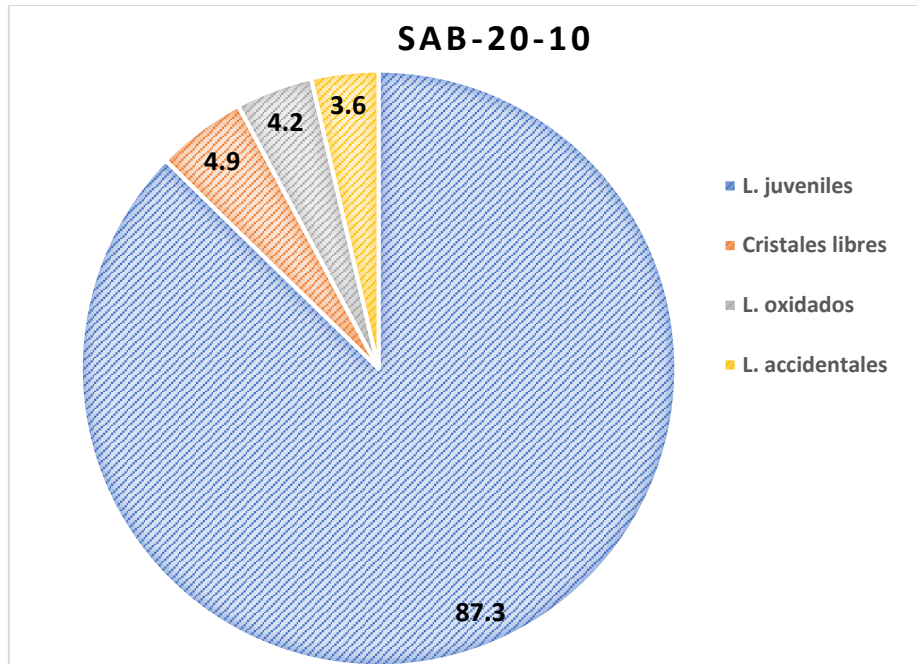


Figura 14: Porcentajes de componentes litológicos de las muestras sab-20-10.

5 CÁLCULO DE VOLUMEN

Para el cálculo de volumen se emplea el método de Pyle (1989) modificado por Fierstein and Nathenson (1992), el cual, está basada en la integración de segmentos lineales, donde el espesor del depósito disminuye exponencialmente respecto la distancia de la fuente. La representación gráfica resultante es el espesor de una isópaca (T) en función de la raíz cuadrada del área de la misma, que se muestra mediante uno o varios segmentos de línea recta. El segmento lineal está dado por la siguiente ecuación (1).

$$T = T_0 \exp(-kA^{1/2}) \quad (1)$$

Dónde: A es el área del contorno de la isópaca

T_0 es el espesor máximo extrapolado

K: es la pendiente de la recta.

Pyle (1989) integró la ecuación (1) para calcular el volumen asumiendo la forma elíptica de la isópaca, mientras que Fiersten and Nathenson (1992) mejoraron el método haciéndola independiente a la forma de la isópaca. El volumen está dado por la formula (2).

$$V = 2T_0/K^2 \quad (2)$$

Donde V: volumen, T_0 : espesor máximo extrapolado y K: pendiente de la recta.

Se ingresan los datos a la gráfica donde se muestra la raíz cuadrada del área de las isópacas versus el espesor de las isópacas (Cuadro 6), para luego, hallar el valor de T_0 y K en la ecuación de la curva exponencial, luego se reemplazan los datos en la formula (2) lo que nos permite obtener un volumen total de $\sim 0.000723 \text{ km}^3$ equivalente a $723,000 \text{ m}^3$ (Figura 15).

Cuadro 5: Datos del espesor de isópacas y de raíz cuadrada del área de las isópacas.

Espesor(m)	Raíz (área en km ²)
0.006	5.28150212
0.003	8.12667367
0.001	8.45061238
0.0007	5.98102477
0.0005	13.9392436
0.0004	14.7837097
0.0003	30.8019564
0.0002	28.273007
0.0001	38.5197545

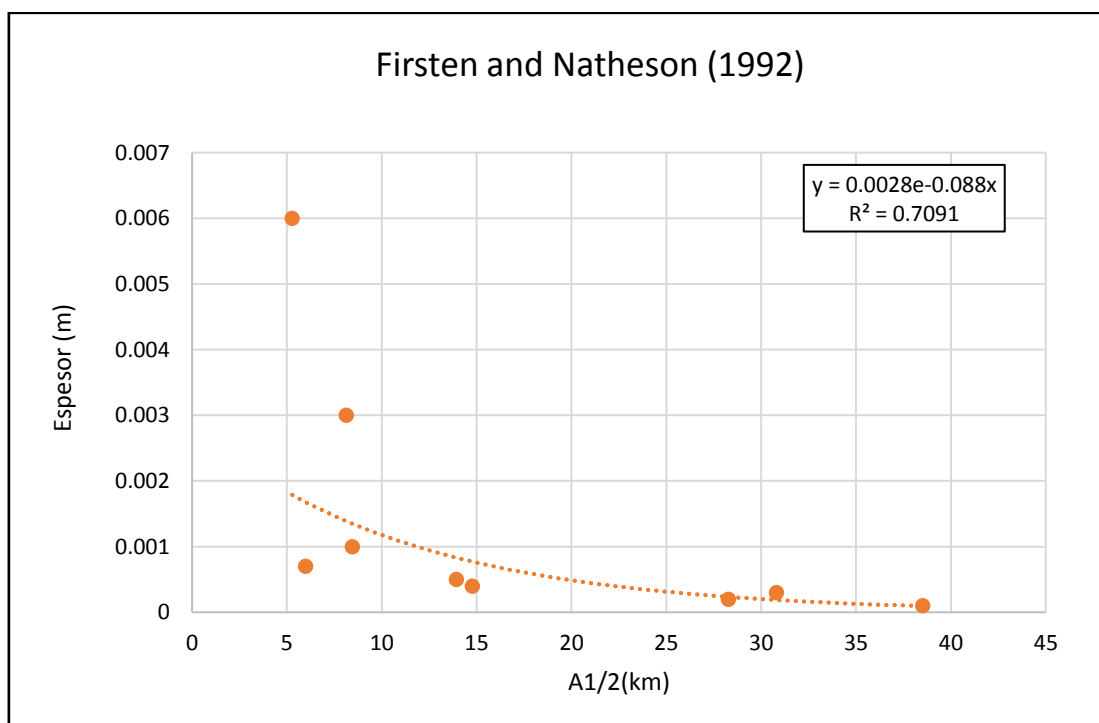


Figura 15: El diagrama de Fierstein and Nathenson (1992) está representada por el espesor en el eje “Y” vs la raíz cuadrada del área en el eje “X”, donde se realiza el ajuste de la curva exponencial.

Adicionalmente, se calcula el DRE (equivalente de roca densa), el cual es el volumen calculado del material emitido por una erupción, corregido a una densidad asumida, equivalente a la densidad del magma sin burbujas (Sidgurson et al. 2015). Los análisis geoquímicos (Informe técnico A6998-2019) de la muestra de ceniza corresponden a un magma de composición andesítica, por lo cual, la densidad del magma sin considerar los gases es de 2.7 kg/ m³ (Aguilar, 2019), para la densidad del depósito se ha considerado que varía de 690 – 1,200 kg/m³ (R. Aguilar, 2019), que depende de la distancia del cráter del volcán, por lo cual, se utilizó un valor de promedio 1,000 kg/m³ (Cuadro 7).

Cuadro 6: Datos usados para la obtención del volumen DRE.

Fierstein and Nathenson (1992)	0.000723 km ³
Densidad del depósito	1,000 kg/m ³
Masa Densa Equivalente (DME) juvenil	2,700 kg/m ³
Volumen DRE total	0.00027 km³

6 RESULTADOS EN MAPAS

6.1 Isópacas

Las isópacas son líneas que resultan de la unión de puntos con valores similares de espesores para formar una figura geométrica, en nuestro caso una elipse, y así hallar el área mediante el software SIG (Sistemas de Información Geográfica), es así que, se muestra el área que cubre cada isópaca en el terreno.

El mapa de isópacas se elaboró en base a 13 puntos de control (Cuadro 1). Los datos fueron tomados entre octubre del 2019 hasta septiembre del 2020, con la dirección de dispersión predominante al sureste. Estos datos fueron introducidos y trabajados en un sistema de información geográfica (Arcgis) donde se genera elipses de igual espesor, además, se calculó el área de cada isópaca, donde la isópaca de mayor espesor de 6 mm abarca el área menor con 27.89 km², la isópaca de menor espesor de 0.1 mm presenta un área mayor de 1,483.77 km² donde se encuentran los poblados de Huambo, Lluta, Cabanaconde, Tapay, Chivay y Yanque (Figura 16 y Cuadro 5).

Cuadro 7: Área abarcada por las isópacas.

Isópaca (mm)	Area (km ²)
6.0	27.89
3.0	66.04
1.0	71.41
0.7	35.77
0.5	194.30
0.4	218.56
0.3	948.76
0.2	799.36
0.1	1483.77

Según el mapa de isópacas (Figura 16), los anexos más afectados por la caída de ceniza fueron Sallali cubierta por 0.5 mm de espesor, Hornillos que por 0.4 mm de espesor de ceniza, los poblados de Achoma, Lari, Maca, Madrigal, Pinchollo, Ichupampa, Muccurca, Huanca, Yanque, Chivay, Coporaque, Tapay, Cabanaconde, Huambo, Lluta y anexos Ampí, Tarucane, Mocca y Curñirca fueron afectados con espesores entre 0.3 a 0.1 mm de ceniza.

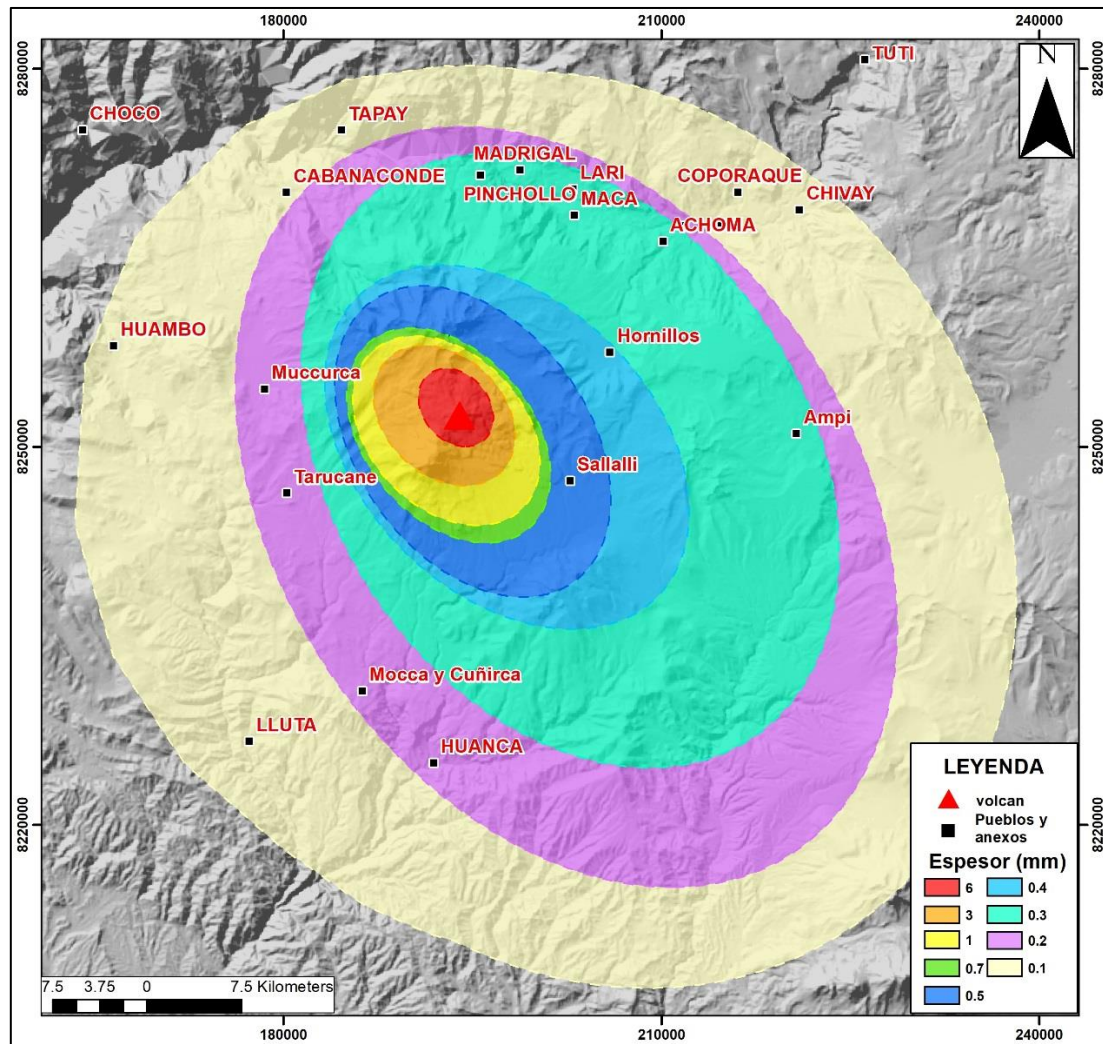


Figura 16: Mapa de isópachas para el periodo octubre 2019 a septiembre del 2020.

6.2 Isomasas

Las isomasas son líneas que resultan de la unión de puntos con valores similares de densidad de área (g/m^2), en nuestro caso se realizó una interpolación y se delimitó el área que cubre cada isomasa en terreno.

El mapa de Isomasas se elaboró en base a 13 puntos de control (Cuadro 8). Los datos fueron tomados entre octubre del 2019 hasta octubre del 2020 (Figura 17). Estos datos fueron introducidos y trabajados en un sistema de información geográfica (ArcGIS) donde se interpolaron en curvas de igual densidad de área.

7 EFECTOS DE LA CENIZA EN LA SALUD

El desarrollo de síntomas de problemas respiratorios a partir de la inhalación de cenizas volcánicas depende de varios factores como la concentración de partículas en el aire, la proporción de partículas finas en la ceniza, condiciones meteorológicas, la frecuencia y duración de la exposición Howell and Baxter (2006).

Según el análisis granulométrico realizado, se obtuvo un porcentaje de 5 % de ceniza fina menor a 32 micras, que puede llegar a viajar a grandes distancias y ser perjudiciales para la salud en largo plazo, llegando afectar al sistema respiratorio y ojos (Figura 18).

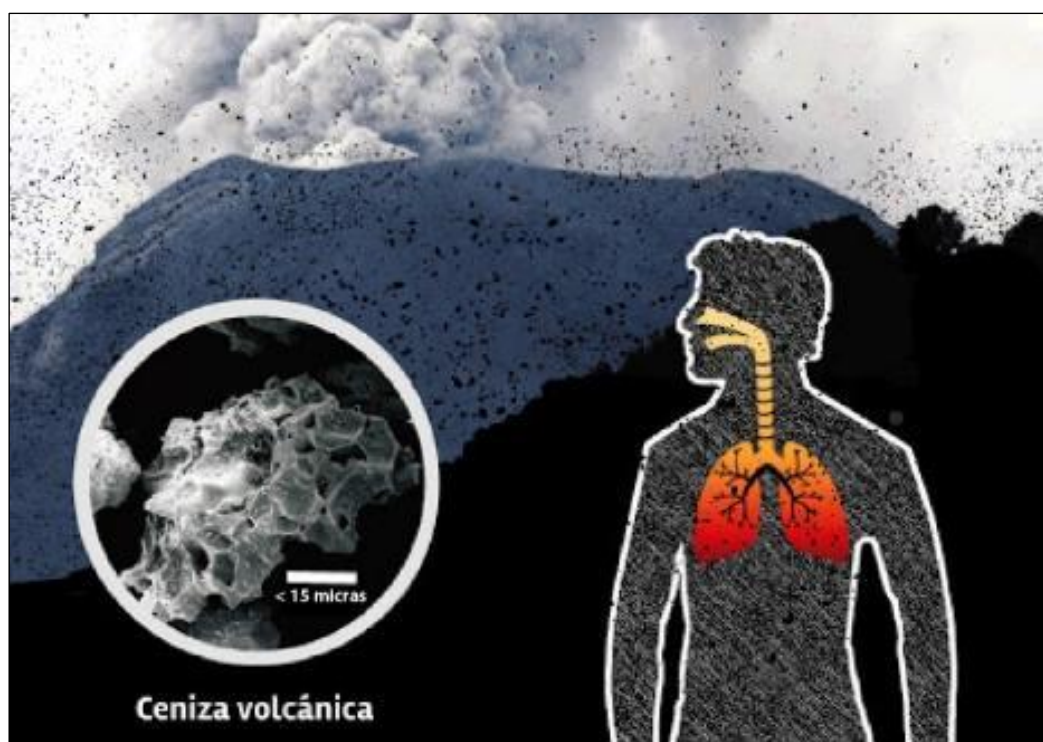


Figura 18: La ceniza menor a 15 micras afecta a la salud de la población (Tomado de Ayala, 2015).

7.1 Problemas Respiratorios

Según los avances recientes en las investigaciones vulcanológicas, y en el impacto de las emisiones sobre la salud, se ha determinado que los problemas respiratorios ocurren a partir de dos características principales de las cenizas volcánicas: el tamaño y la composición de las partículas:

En relación al tamaño, existen tres fracciones de polvo definidas en la norma europea EN481 y Howell and Baxter (2006): las fracciones inhalables, torácicas y respirables (Figura 19).

- La fracción inhalable donde las partículas menores a 15 micras generan fenómenos inflamatorios en la región extratorácica del sistema respiratorio, se manifiesta con síntomas como irritación en la garganta, obstrucción nasal, tos, flema.

- La fracción torácica donde las partículas menores a 10 micras afectan a la región traqueobronquial, pudiendo generar laringotraqueitis.
- Para el polvo respirable menor a 4 micras penetran profundamente en los pulmones, el cuerpo cuenta con mecanismos de defensa natural eliminando la mayor parte. Sin embargo, en casos de exposición prolongada a niveles excesivos de ceniza, se hace difícil su eliminación de los pulmones y su acumulación a largo plazo, puede ocasionar efectos irreversibles sobre la salud.

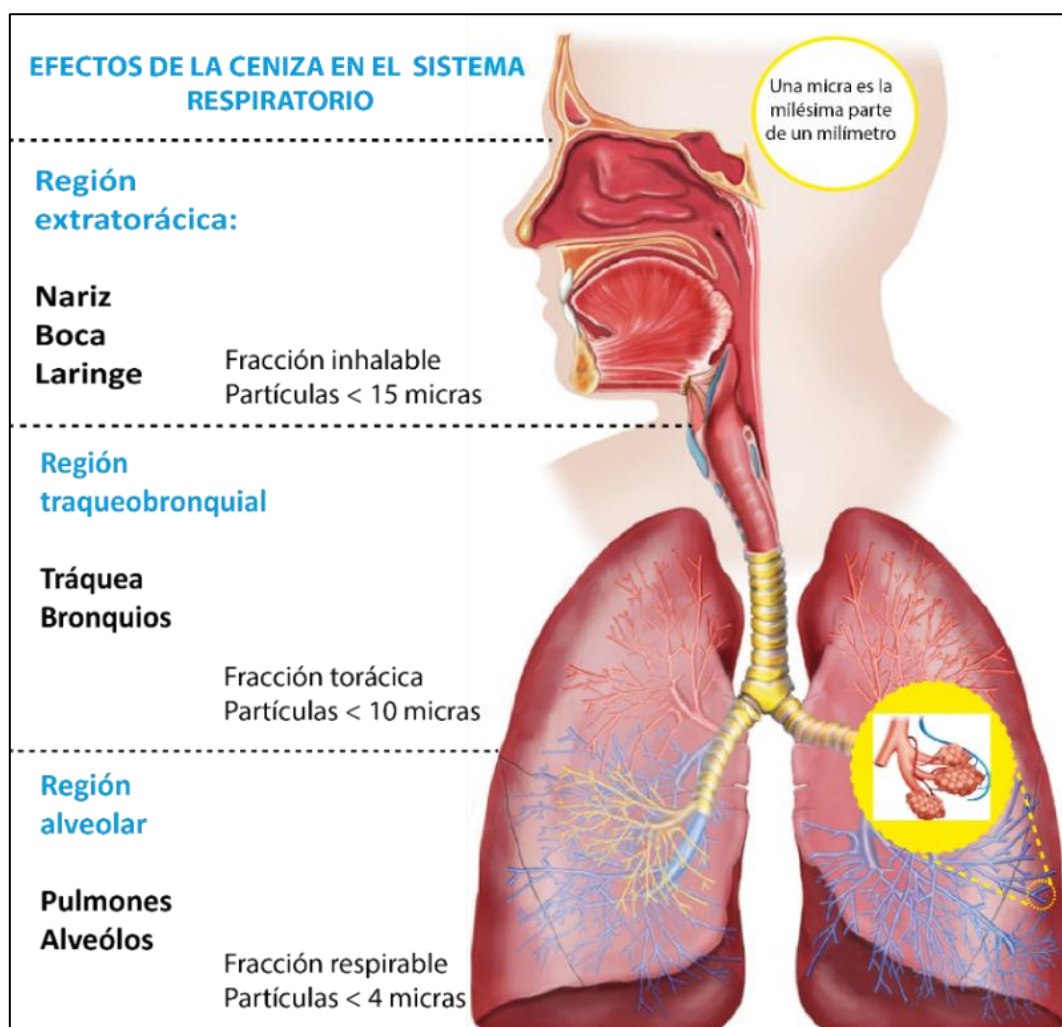


Figura 19: Efectos de la ceniza en la salud modificado de Howell and Baxter (2006).

El estudio de la composición mineralógica de la ceniza volcánica es un paso crucial en la evaluación de los peligros para la salud. La ceniza volcánica a menudo contiene sílice cristalina que en exposición prolongada y en grandes cantidades puede ser perjudicial para la salud. La cual es bien conocida en la industria por causar silicosis una enfermedad pulmonar (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer 1997).

Según Howell and Baxter (2006) la ceniza de composición basáltica tiene una menor toxicidad que la ceniza de composición andesítica o dacítica, esto debido al contenido de sílice cristalina. Las emisiones de ceniza con partículas menores a 10 micras

contienen entre 4 a 13% de sílice cristalina, mientras que en partículas de 4 micras el contenido de sílice cristalino es de 40 a 45 %.

El volcán Sabancaya durante el 2016 al 2019 ha emitido ceniza de composición andesítica a dacítica, pero no representa gran riesgo para la población, ya que las emisiones durante octubre 2019 a septiembre 2020 fueron moderadas. Sin embargo, se recomienda tomar medidas de precaución en caso que la caída de ceniza sea mayor o evitar su exposición prolongada.

7.2 Efectos en los Ojos

La irritación en los ojos es un efecto común, ya que una porción de arenilla puede provocar dolorosas erosiones (rasguños) en la parte frontal del ojo, abrasiones en la córnea y conjuntivitis.

Los síntomas son:

- Sensación de cuerpo extraño en los ojos.
- Dolor ocular, escozor e inyección conjuntival (ojos rojos).
- Secreción pegajosa o lagrimeo
- Abrasiones en la córnea o erosiones (rasguños).

8 AFECTACIÓN POR CAIDA CENIZA

Si bien muchas personas aprovechan este rico recurso, puesto que la ceniza provee de micronutrientes como el magnesio, boro, manganeso, vanadio y polifenoles, entre otros, permite que la tierra recupere los elementos que pierde por el uso agrícola, la ceniza volcánica pueda causar problemas a las personas expuestas por un largo período de tiempo, sobre todo la ceniza que es menor de 15 micras que afecta al sistema respiratorio. A pesar de que las erupciones volcánicas sean de corta duración, la ceniza puede mantenerse en el aire por años, siendo finalmente removidas por el viento. La ceniza volcánica no es altamente toxica, pero puede significar un alto riesgo a personas que trabajan en ambientes externos como la ganadería y agricultura (Morales et al., 2009).

8.1 Poblados y Anexos Afectados

En función al mapa de Isomasas se ha generado el mapa con el grado de afectación por caída de ceniza volcánica, este se muestra en la figura 20, en donde se delimitan tres zonas de las cuatro descritas en el cuadro 9, esto debido a que para el volcán Sabancaya la afectación no ha llegado al grado “fuerte”.

Cuadro 9: Grado de afectación por caída de ceniza volcánica. Fuente IGPEN. (Informe sobre la dispersión y sedimentación de la ceniza asociada a la actividad del volcán Sangay del 20 de septiembre de 2020).

Valor de caída (g/m ²)	Grado de afectación	Color en el mapa
1,000 – 1,500	Fuerte	Rojo oscuro
500 – 1,000	Moderada a fuerte	Rojo
100 - 500	Moderada a leve	Naranja
10 - 100	Leve	Amarillo

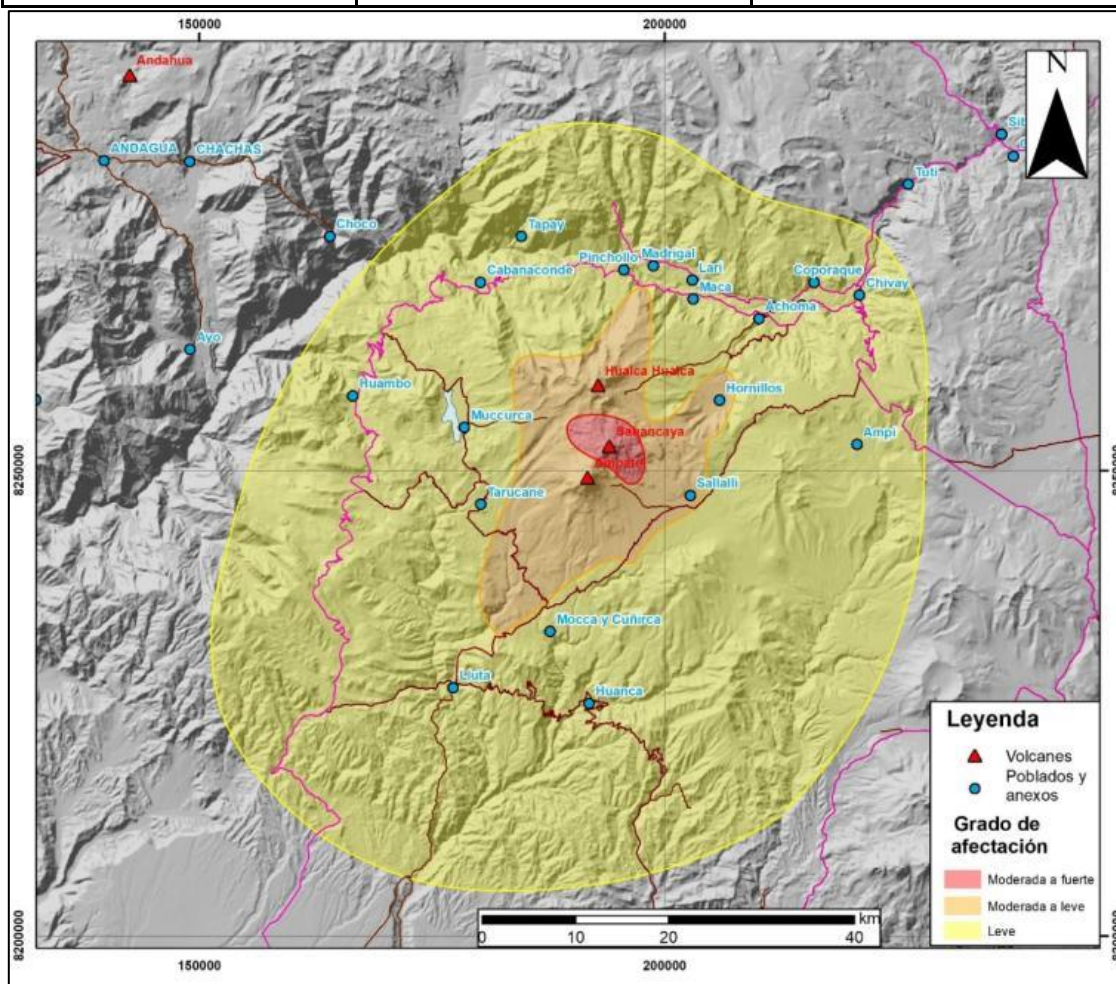


Figura 20: Mapa de grado de afectación de la ceniza volcánica emitida por el Sabancaya periodo octubre 2019 - octubre 2020.

De acuerdo a este mapa de grado de afectación (Figura 20), la caída de ceniza en el volcán Sabancaya afecta a alrededor del 27% de la población en la provincia de Caylloma el cual vive en un radio de 60 km respecto del volcán.

El valor máximo de caída acumulada expresada en densidad de área (g/m²), fue de 870 g/m², registrada en la estación de Sallalli a 2.3 km al sureste del volcán, y se encuentra en la zona donde la caída de ceniza es calificada como moderada a fuerte. En la zona naranja donde la caída de ceniza acumulada es de moderada-leve (100-500 g/m²), se encuentran la estación de Hornillos a 3.6 km al norte del volcán y los anexos de Hornillos y Sallalli. En la zona amarilla la caída de ceniza es leve (5-100 g/m²) y están ubicados los poblados de Chivay, Coporaque, Achoma, Ichupampa, Yanque, Maca, Lari, Madrigal,

Pinchollo, Tapay, Cabanaconde, Lluta, Huambo y Huanca, y los anexos de Muccurca, Tarucane, Ampí, Mocca y Cuñirca. (Figura 20).

8.2 Efectos en la Agricultura

Según las investigaciones, la agricultura puede verse afectada cuando la ceniza impulsada por el viento se deposita en las hojas de los árboles y plantas provocando abrasión y heridas sobre la superficie de las mismas, por otra parte, las partículas de ceniza se adhieren a la superficie de las hojas y dificultan las funciones de fotosíntesis y respiración (Figura 21).



Figura 21: Afectación de la ceniza los cultivos modificado de (Guía de preparación de salud frente a erupciones volcánicas 2005).

La población asentada en el valle del Colca y otros poblados que se desarrollan en los valles interandinos circundantes al volcán, se dedican principalmente a la agricultura. En el valle del Colca se tiene 9,285.24 hectáreas de cultivos (Robles, 2008), en los cuales se registró presencia de ceniza fina afectando los sembríos, ya que las partículas finas se adhieren en algunas hojas de los diferentes productos como papas, habas, maíz entre otros, impidiendo que se realice con normalidad el proceso de la fotosíntesis (Figura 22-A). La ceniza también afecta a las plantas silvestres (Figura 22-B).



Figura 22: a) Plantas impregnadas de ceniza fina ubicada en el Poblado de Madrigal, b) Frutos de cactus afectados por caída de ceniza, observados durante el mes de octubre.

8.3 Efectos en la Ganadería

Al contaminar la cobertura vegetal, las cenizas afectan indirectamente al ganado cuando éste ingiere junto con el pasto la ceniza provocando un desgaste prematuro de la dentadura (Figura 23). Así mismo, la ceniza ingerida que no es eliminada en las heces, dificulta la digestión del ganado, registrándose casos de diarrea, en algunas ocasiones la ceniza puede provocar la muerte de los animales de pastoreo por intoxicación.



Figura 23: Afectación de la caída de ceniza a la ganadería modificado de (Guía de preparación de salud frente a erupciones volcánicas 2005).

En el valle del Colca se tiene 705,238 cabezas de ganado (Robles, 2008), los que están expuestos a la caída de ceniza. En el año 2017 los pobladores del distrito de Achoma reportaron pérdidas de ganado camélidos andinos (alpacas) probablemente debido al consumo de alimento contaminado por ceniza (Figura 24).



Figura 24: Ganadería más afectada por la emisión de ceniza en el volcán Sabancaya.

En los alrededores del volcán Sabancaya se encuentran varios sectores donde se realiza la crianza y el pastoreo de animales entre ellos los principales son: Sallali, Hornillos, Muccurca, Tarucane, Mocca y Cuñirca; los cuales se encuentran entre 10 a 20 km del volcán y son afectados directamente por la caída de ceniza y gases volcánicos (Figura 25).

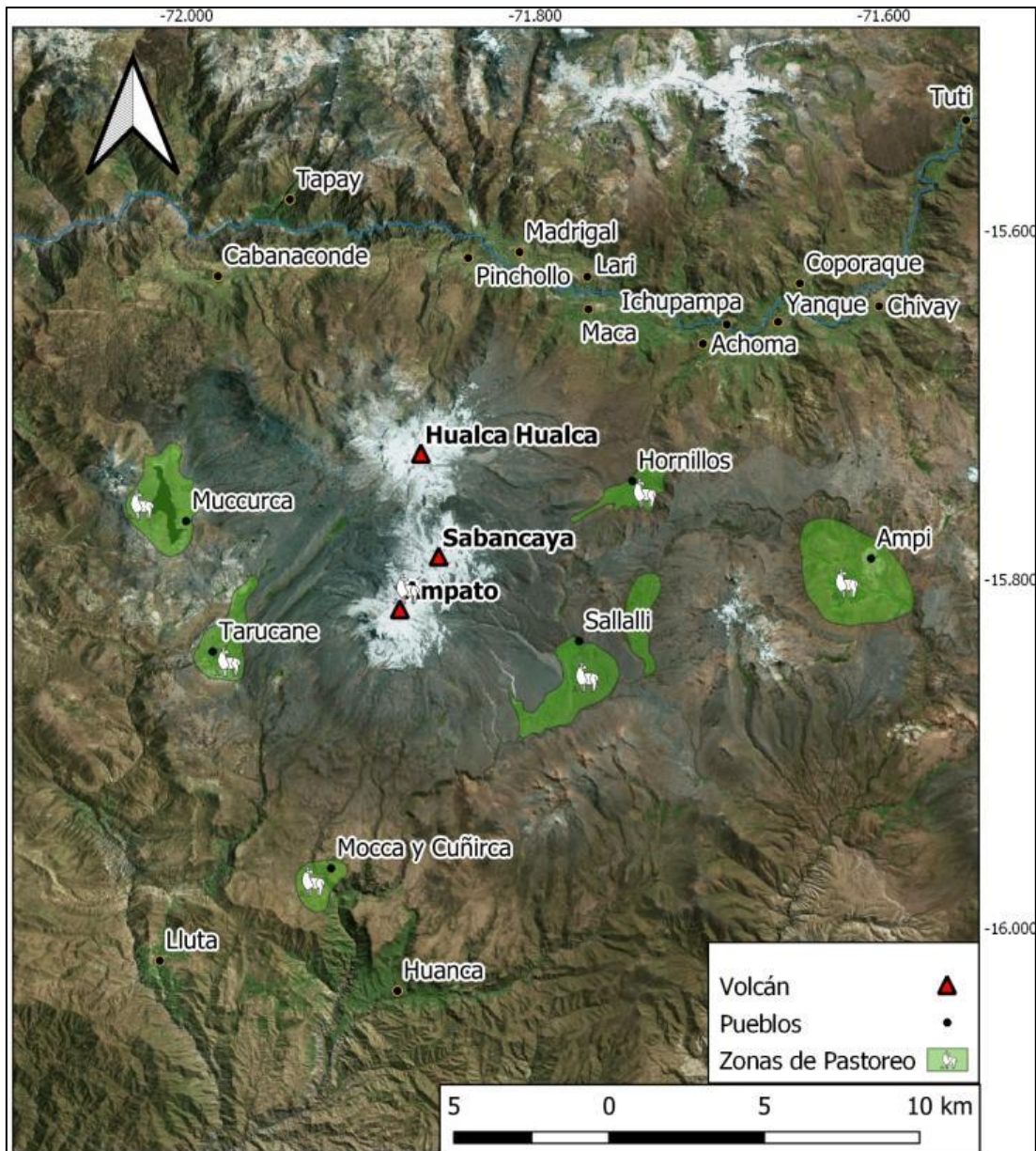


Figura 25: Mapa de zonas de pastoreo en los alrededores del volcán Sabancaya.

8.4 Efecto en Infraestructura Local

La caída y sedimentación de la ceniza, dependiendo de la cantidad de esta, también genera problemas en la infraestructura como reservorios de agua, canales de regadío, centrales hidroeléctricas, entre otros.

8.4.1 Reservorios de agua

La ceniza puede contaminar el agua, así como producir atascos o daños en el equipo de abastecimiento de agua. La caída de ceniza, en incluso pequeñas cantidades de cenizas pueden reducir la potabilidad del agua. Aunque el riesgo de intoxicación es bajo, el pH puede verse reducido o la clorificación inhibida.

El valle del Colca cuenta con 102 fuentes de agua (Robles, 2008), los cuales, pueden ser afectadas durante y después de la caída de ceniza provocando escases de agua en los poblados. El 28 de octubre del 2020 el poblado de Lluta reportó contaminación de los reservorios de agua por ceniza, que provocó intoxicación estomacal de los habitantes de la zona (Figura 28).



Figura 26: Reservorio de agua en el poblado de Lluta contaminada por la caída de ceniza en el mes de octubre.

8.4.2 Centrales Hidroeléctricas

La caída de ceniza puede contaminar los embalses de agua, colmatando los canales y afectando las turbinas de la central hidroeléctrica, generando a su vez, cortes de suministro de energía eléctrica a la población.

En el ámbito de afectación por caída de ceniza del volcán Sabancaya se encuentra la central hidroeléctrica de Lluta y Lluclla, en donde se reportó en el mes de octubre colmatación de los canales de agua con ceniza, interrumpiendo el fluido eléctrico de la zona (Figura 27).



Figura 27: Colmatación de los canales de la Planta Hidroeléctrica Lluta y Llucta reportado en el mes de octubre del año 2020.

8.5 Efectos en la Minería

En relación a la actividad minera, la caída de ceniza afecta los sistemas de ventilación, transporte, plantas concentradoras, maquinarias y equipos, además del personal. En relación al volcán Sabancaya en un radio de aproximadamente 60 km se encuentran campamentos mineros que se dedican a la extracción de oro como lo son las minas Shila-Paula y Tambomayo que tienen una producción anual de aprox. 3,000 t de oro, también se encuentran proyectos mineros como: Zafranal y Hualca Hualca I, ubicados entre 50 y 10 km del volcán respectivamente. La empresa Yura y su principal cantera se encuentra a 43 km del volcán y finalmente, plantas de beneficios como la de Santo Domingo en Lluta y la fábrica de cementos Yura (Figura 28).

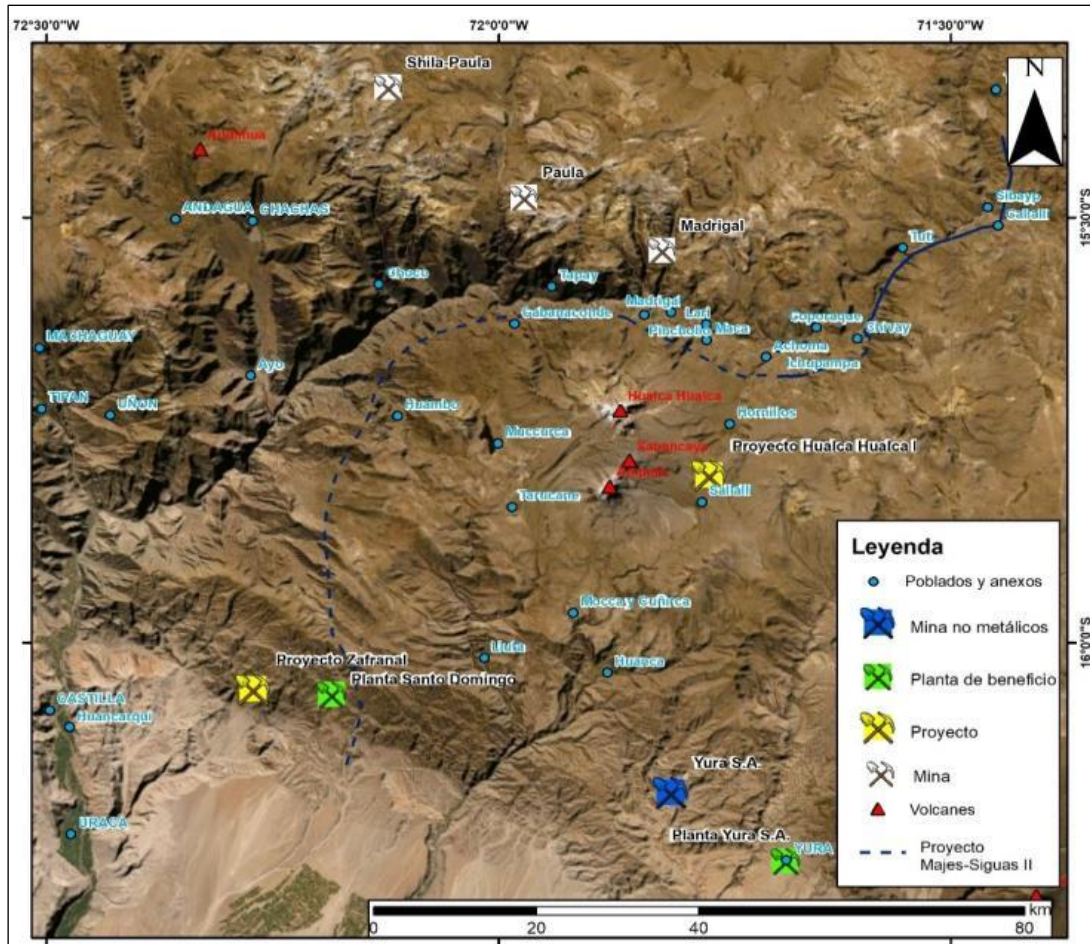


Figura 28: Mapa de zonas mineras alrededor del volcán Sabancaya.

8.6 Efectos Secundarios

Un efecto secundario de la caída de ceniza es la formación de lahares. Los lahares consisten en una mezcla sedimentos, rocas y agua que viajan por las laderas de los volcanes a gran velocidad (Smith y Fritz, 1989) y usualmente son provocados por la removilización de la ceniza volcánica acumulada y material suelto depositado en las quebradas o laderas de los volcanes a causa de precipitaciones intensas o derretimiento precipitado de nieve. Los meses que se han reportado lahares son en enero, febrero y marzo; los cuales corresponden al periodo de lluvias.

El mapa de peligros elaborado por el OVI (Figura 29) muestra posibles zonas a ser afectadas por la ocurrencia de lahares.

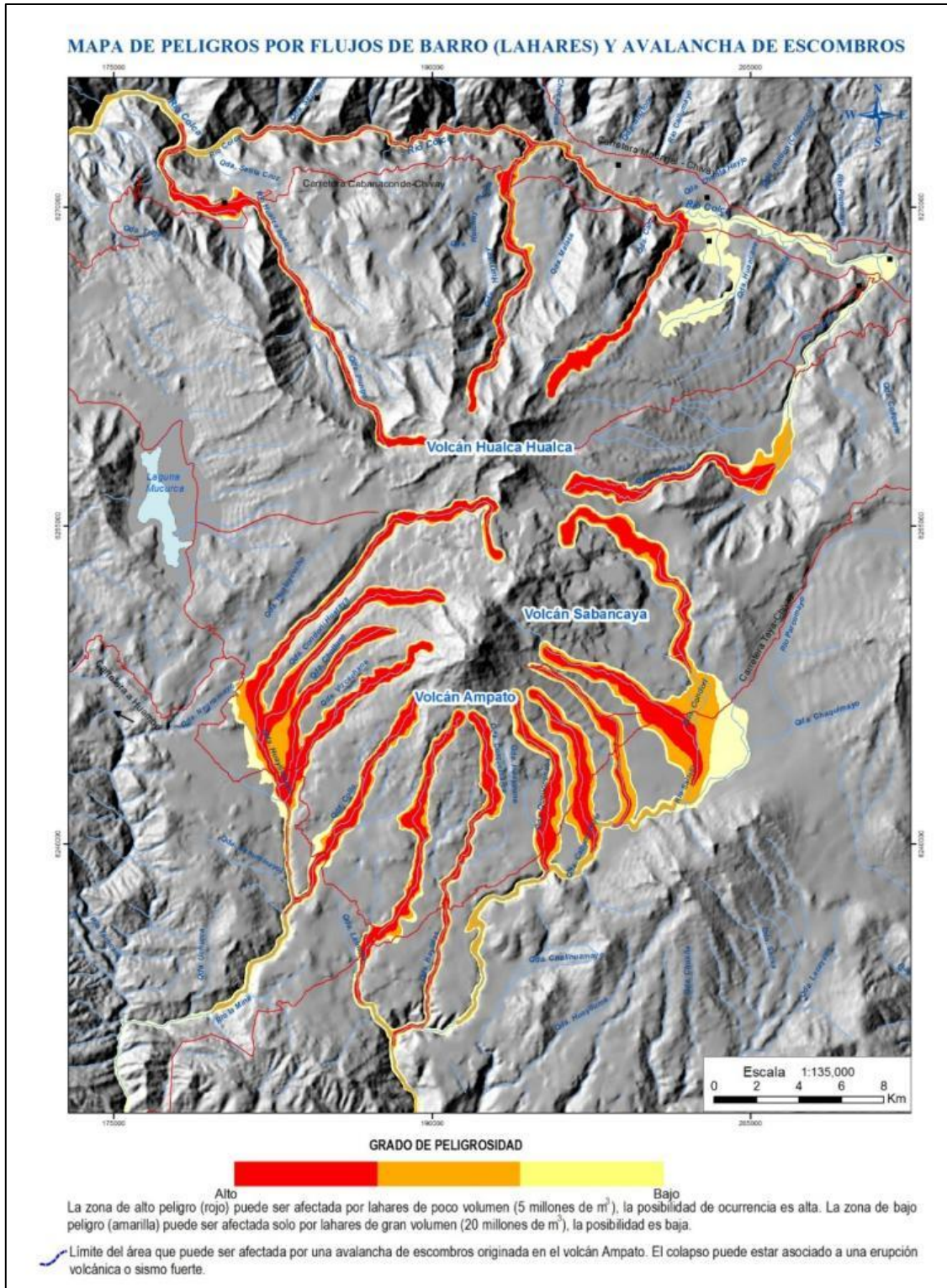


Figura 29: Mapa de peligros por flujos de lahares del volcán Sabancaya.

CONCLUSIONES

- La emisión de ceniza entre enero a septiembre del 2020 fue moderada, con columnas eruptivas que alcanzaron una altura máxima de 3,600 m sobre el cráter, la dirección predominante fue al Sureste.
- Se identificó 3 zonas de afectadas por la caída de ceniza volcánica:
 - **ZONA ROJA**, donde la caída de ceniza fue calificada como moderada a fuerte (500–1,000 g/m²) y se encuentra a 3 km en el sector sureste y 5 km en el sector noroeste y oeste del volcán Sabancaya.
 - **ZONA NARANJA**, donde la caída de ceniza acumulada fue moderada-leve (100-500 g/m²), se encuentra la estación de Hornillos a 3.6 km al noreste del volcán y los anexos de Hornillos y Sallalli.
 - **ZONA AMARILLA**, donde la caída de ceniza fue leve (5-100 g/m²) y están ubicados los poblados de Chivay, Coporaque, Achoma, Ichupampa, Yanque, Maca, Iari, Madrigal, Pinchollo, Tapay, Cabanaconde, Lluta, Huambo y Huanca, y los anexos de Muccurca, Tarucane, Ampí, Mocca y Cuñirca.
- Se ha calculado el volumen máximo de ceniza emitida, siendo este de 270000 m³ para el periodo de octubre 2019 hasta septiembre 2020.
- El distrito de Achoma, en los sectores de Sallalli y Hornillos, se han medido espesores de 0.5 y 0.4 mm de caída de ceniza y fueron los sectores más afectados.
- Según el análisis granulométrico realizado, las muestras de ceniza contienen 5 % de material fino menor a 32 micras, el cual, puede afectar el sistema respiratorio y visual.
- El conteo litológico de las muestras Sa-20-09 y Sab-20-10 mayormente están compuesto por líticos juveniles de color gris claro en un 90% - 86.8%, seguida por cristales libres en un 5.4% - 4.9%. También se cuenta con líticos oxidados e hidrotermalizados en un 2.5 % - 4.1%, finalmente, en estas muestras se identificaron líticos accidentales en 2% - 3.6%.
- Alrededor del volcán Sabancaya existen gran cantidad de ganado, los cuales se ven afectados por el consumo de la ceniza impregnada en la vegetación, produciéndoles desgaste en los dientes y problemas gastrointestinales.

RECOMENDACIONES

- Las cenizas pueden causar efectos respiratorios, molestias oculares, irritación de la piel y efectos indirectos, por lo cual, la gerencia de salud debe brindar una atención adecuada a las personas afectadas por estos males y además debe realizar campañas de prevención y protección que se deben implementar en las zonas aledañas al volcán para preservar la integridad física de la población.
- La ceniza puede contaminar el agua, por lo cual, el ANA debería realizar estudios periódicos de las fuentes de agua que se encuentran alrededor del volcán Sabancaya, e informar oportunamente a la población si es apta para el consumo humano y el de los animales.
- Las entidades encargadas deben realizar periódicamente una evaluación a los animales de la zona, en especial los animales que se encuentran hasta los 20 km del volcán Sabancaya.
- Se sugiere que los organismos encargados de la gestión de la actividad agrícola (ministerio de agricultura y gerencia regional de agricultura) realicen estudios y análisis de los campos agrícolas dañados por la caída de ceniza, y plantear alternativas a la población.
- En caso de suscitarse precipitaciones pluviales, se recomienda a la población mantenerse alejada de las quebradas susceptibles a la ocurrencia de lahares y mantenerse informada de la evolución del fenómeno. Revisar el mapa de peligros por lahares del INGEMMET.
- Realizar simulacros ante la ocurrencia de lahares y preparar a las comunidades asentadas en zonas de alto riesgo por ocurrencia de lahares, propiciando una cultura de prevención, mitigación y preparación ante peligros por este tipo de fenómenos.
- Mantenerse informado sobre la actividad del volcán Sabancaya a través de las alertas, pronósticos y reportes de monitoreo del INGEMMET.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar R. (2019). "Exposure-based risk assessment of tephrafall associated with long-lasting Vulcanian eruptions at Sabancaya volcano, Peru", Specialisation certificate in the assessment and management of geological and climate related risk CERG-C 2018, 33p.
- Bernard, B. (2013). Homemade ashmeter: a low-cost, high-efficiency solution to improve tephra field-data collection for contemporary explosive eruptions. *Journal of Applied Volcanology* 2:1.
- Bias, S., and Bonadonna, C. (2011). A quantitative uncertainty assessment of eruptive parameters derived from tephra deposits: The example of two large eruptions of Cotopaxi volcano, Ecuador: *Bulletin of Volcanology*, v. 73, p. 73–90, doi:10.1007/s00445-010-0404-5.
- Brown, W.K., (1989). A theory of sequential fragmentation and its astronomical applications. - *J. Astrophys. Astr.* 10: 89- 112.
- Fierstein, J. and Nathenson, M. (1992). "Another look at the calculation of fallout tephra volumes" *Bulletin of Volcanology*, 54, 156-167.
- Folk, R. L. (1966) - A review of grain size parameters. *sedimentology* 6, 73 - 93 p.
- Gerbe M.-C., Thouret J.-C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya in south Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66, 541-561.
- Howell, C. & Baxter, P. (2006). "The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bull Volcanol* DOI 10.1007/s00445-006-0052-y.
- IGPEN (2020). Informe sobre la dispersión y sedimentación de la ceniza asociada a la actividad del volcán Sangay del 20 de septiembre de 2020; <https://www.igepn.edu.ec/>
- INGEMMET (2019). Muestreo de cenizas en los alrededores del volcán sabancaya. Informe Técnico N° A6954.
- Inman, D. L. (1952) - Measures of describing the size distribution of sediments. *Jour. Sed. Petrol*, 22, 125 – 145 p.
- Krumbein W. C. (1934) - Size frequency distribution of sediments. *Jour Sedim. Petrol.* Vol-1, 65 - 77p.
- Mariño, J. (2012). Escenarios eruptivos y mapa de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Tesis Maestría, Universidad de Nice, Francia, 87 p.
- Morales, E.V., Villar-Cociña, E., Frias, M., Santos, S.F., Savastano Jr, H. (2009). Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): influence in the pozzolanic activation. *Cement & Concrete Composites*, 31, 22-28.
- Pyle, D., 1989. The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 51, 1-15.
- Rivera, M.; Mariño, J.; Samaniego, P.; Delgado, R. & Manrique, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa), INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 61, 122 p., 2 mapas.

- Robles R. (2008). "Agricultura de riego y tradiciones en el valle del Colca". Departamento de Antropología, UNMSM.
- Rodríguez A. & Uribe M. (1994). Participación del Instituto Geofísico del Perú en relación con la reactivación del Volcán Sabancaya, provincia de Caylloma, región de Arequipa. Informe interno OVS-IGP, Oficina de Arequipa, 28 pags..
- 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.
- Spalletti, L.A., (1980). Paleoambientes sedimentarios en secuencias silicoclásticas. Serie B Didáctica y Complementaris Nro. 8. Asoc.Geol.Arg. 175 pags.
- Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir., 2015) – *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 1456 p.
- Smith, G. A.; Fritz, W. J. (1989). Volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology* 17, p. 375-37
- Walker, G. (1971) - Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *J. Geol.*, 79, 696-714 p.