

Universidad Católica de Santa María
Escuela de Postgrado
Maestría en Planificación y Gestión Ambiental



**EFFECTOS AMBIENTALES EN LA CALIDAD DEL AIRE POR LAS ERUPCIONES
VOLCÁNICAS DEL HUAYNAPUTINA Y SABANCAYA (PERÚ)**

Tesis Presentada por el Bachiller:

Cueva Sandoval, Kevin Arnold

Para optar el Grado Académico de:

**Maestro en Planificación y Gestión
Ambiental**

Asesor:

Mg. Bernabé Ortiz Julio César

Arequipa – Perú

2021

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
ESCUELA DE POSTGRADO
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 25 de Mayo del 2021

Dictamen: 001144-C-EPG-2021

Visto el borrador del expediente 001144, presentado por:

2017008731 - CUEVA SANDOVAL KEVIN ARNOLD

Titulado:

**EFFECTOS AMBIENTALES EN LA CALIDAD DEL AIRE POR LAS ERUPCIONES VOLCÁNICAS
DEL HUAYNAPUTINA Y SABANCAYA (PERÚ).**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**1058 - DAVILA DEL CARPIO GONZALO HERMILIO
DICTAMINADOR**



**1072 - BERNABE ORTIZ JULIO CESAR
DICTAMINADOR**



**7703 - MAYTA COAGUILA RONALD ALBINO
DICTAMINADOR**



DEDICATORIA

A mis queridos padres:

Freddy Cueva Ugarte

Ana Sandoval Santamaría

A mis hermanos:

Anthony Cueva Sandoval

Jhon Cueva Sandoval

*A mis compañeros de la Maestría Planificación y Gestión Ambiental de la Universidad Católica
Santa María.*

EPÍGRAFE

La vida en dos de sus faces



“Un camino sin retorno pero que se debe aprender a andar, caminar en la vida es un trabajo difícil pero simple de llevar, pues las dificultades se presentan y franquearlas es la base de la vida misma, es finalmente la lucha contra el tiempo y contra uno mismo”

Trabajando por la vida todos tenemos mucho que hacer, pero apreciar la vida pocos lo logran, generalmente todos se ocupan de ganarse la vida, de obtener lo más posible, están en busca del dinero, pero no en busca del porqué vivir, caso contrario hay quienes buscan el hedonismo el placer por el placer mismo y pierden el piso convirtiéndose en entes vanos desvalorando la vida una vez más.



AGRADECIMIENTOS

Quiero brindar mis más sinceros agradecimientos a todos los que me apoyaron en mi formación como persona y como profesional.

Agradezco a mis padres, Fredy Cueva Ugarte y Ana Sandoval Santamaría, por su motivación y apoyo para superar los retos y obstáculos presentados y que ellos me encaminaron a buscar la mejor solución.

A mis hermanos Anthony Cueva y Jhon Cueva, que me ayudaron a continuar con mis metas trazadas en mi vida profesional. Así mismo agradezco a todos mis docentes por sus enseñanzas y experiencias impartidas durante mi transcurso por la Escuela de Postgrado de la Maestría de Planificación y Gestión Ambiental de la Universidad Católica Santa María de Arequipa.

Agradezco a mi asesor Mg. Bernabé, que me ayudo con el desarrollo de esta tesis, con sus revisiones detalladas y sus recomendaciones para desarrollarme como profesional.

Agradezco al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico y al Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, por haberme permitido el procesamiento de sus datos.

Agradezco al Cienciactiva por permitirme realizar la tesis de Postgrado, en el marco del Convenio con Fondecyt 0015-2017.

RESUMEN

La mayor erupción registrada en época histórica en los Andes la produjo el volcán Huaynaputina (1600), ubicado en la región de Moquegua. Alcanzó un Índice de Explosividad Volcánica 6, sepultando a más de 15 poblados emplazados alrededor de este volcán, originando la muerte de aproximadamente 1500 personas en los valles de Omate, Quinistaquillas y Matalaque. Esta erupción afectó la calidad del aire, variando por 1.33 C° el clima global de la tierra, el contenido de SO₂ superó los estándares normales. Los productos emitidos durante esta erupción, comprenden pómez, cenizas y gases volcánicos. Se ha realizado un estudio de la granulometría de 33 muestras de pómez y ceniza, estudios realizados en el Laboratorio de Magmas y Volcanes de Francia, obteniendo mayormente tamaños entre 5.6, 4 y 2.8 mm. Cabe resaltar que también se pudo medir el acumulado de cenizas finas por debajo de 65 μm . El nivel de afectación de ceniza de dicha erupción fue muy grande, ya que a pesar de que hubo fragmentos centimétricos que cayeron, la ceniza fina quedó suspendida en el aire por varias semanas, provocando enfermedades y problemas crónicos de Salud. El mencionado volcán se encuentra en estado de inactividad, con algunas emanaciones fumarólicas de poca importancia, pero no se descarta que pueda reactivarse. Este tipo de erupciones muy explosivas afectan considerablemente la calidad del aire, debido a su considerable magnitud. No se tienen registros cuantificables de la calidad del aire en la época de la mencionada erupción, solo algunos registros históricos que narraron la erupción volcánica. Por otro lado, Mariño (2016) menciona que el volcán Sabancaya, es el segundo volcán más activo del Perú. Actualmente se encuentra en un periodo eruptivo desde el 2016 emitiendo cenizas a la atmósfera constantemente, que van dirigidas a los sectores sureste y noreste del macizo volcánico, donde se encuentran los poblados de Chivay, Achoma, Maca, Cabanaconde, pertenecientes al valle del Colca en la región de Arequipa. Los materiales que emite constantemente el volcán son cenizas y gases volcánicos. La ceniza arrojada dentro de la atmósfera puede causar enfermedades en poblaciones humanas a través de la caída de partículas provenientes de las columnas eruptivas. Se ha empleado la técnica de granulometría para poder hallar el tamaño de la ceniza que cae alrededor del Sabancaya. El contenido de ceniza no es abundante, pero sí es perjudicial para los principales cultivos de la zona. Para poder evaluar la afectación de la calidad del aire en los pueblos del valle del Colca, por parte de la erupción del volcán, se ha realizado un monitoreo ambiental midiendo PM 10 y PM 2.5, obteniendo valores de 13.40 y 15.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM 10; 8.92 y 2.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM 2,5 en las estaciones de Achoma AIR-01 y Maca AIR-02 respectivamente, pueblos ubicados al SE del macizo volcánico. Los valores vigentes de los Estándares de Calidad Ambiental de Aire (ECA) para material particulado PM 10 son 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor promedio de 24 horas; mientras que el Valor Guía de la Organización Mundial de la

Salud (OMS) es de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que es el mismo valor promedio anual del ECA nacional. Para el material particulado PM 2,5 el valor es $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) es de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En base a estos resultados se puede apreciar que los valores obtenidos no superan los valores establecidos por el Estándar Nacional de la Calidad Ambiental de Aire según el D.S. N° 003-2017-MINAM, no considerando un riesgo significativo para la calidad de aire y de la salud de las personas.

Se ha calculado los valores INCA con respecto a los cálculos obtenidos del PM 10 y PM 2,5 de las cenizas del volcán Sabancaya, obteniendo de 8.93, 10.39 y 35.68, 9.64 respectivamente. En base de los ECAS de monitoreo de calidad de aire, los valores INCA se encuentran en categoría BUENA, donde no representa un riesgo alto para la salud y el ambiente.

Se ha elaborado un plan de acción de la calidad del aire para emergencias volcánicas, como medio de remediación del impacto generado en la zona de estudio en los alrededores del volcán Sabancaya, donde se basa en las medidas para convivir con las cenizas del volcán, ya que este tipo de erupciones como el Sabancaya, presentan periodos de duración de varios años.

PALABRAS CLAVE

-Huaynaputina – Sabancaya – Ceniza – calidad de aire – SO_2

ABSTRACT

The largest eruption recorded in historical times in the Andes was produced by the Huaynaputina volcano (1600), located in the Moquegua region. It reached a Volcanic Explosivity Index 6, burying more than 15 villages located around this volcano, causing the death of approximately 1500 people in the valleys of Omate, Quinistaquillas and Matalaque. This eruption affected air quality, varying by 1.33 C° the global climate of the earth, the SO₂ content exceeded normal standards. The products emitted during this eruption include pumice, ash and volcanic gases. A study of the granulometry of 33 samples of pumice and ash has been carried out, studies carried out in the Laboratory of Magmas and Volcanoes of France, obtaining mostly sizes between 5.6, 4 and 2.8 mm. It should be noted that it was also possible to measure the accumulated fine ash below 65 um. The level of ash damage from said eruption was very large, since despite the fact that there were centimeter fragments that fell, the fine ash remained suspended in the air for several weeks, causing diseases and chronic health problems. The aforementioned volcano is in a state of inactivity, with some minor fumarolic emanations, but it is not ruled out that it can be reactivated. This type of very explosive eruptions considerably affect the quality of the air, due to its considerable magnitude. There are no quantifiable records of air quality at the time of the aforementioned eruption, only some historical records that narrated the volcanic eruption.

On the other hand, the Sabancaya volcano, according to the most active volcano in Peru, is currently in an eruptive period since 2016 emitting ashes into the atmosphere constantly, which are directed to the southeast and northeast sectors of the volcanic massif, where the towns are located. from Chivay, Achoma, Maca, Cabanaconde, belonging to the Colca Valley in the Arequipa region. The materials that the volcano constantly emits are ash and volcanic gases. The ash thrown into the atmosphere can cause diseases in human populations through the fall of particles from the eruptive columns. The granulometry technique has been used to find the size of the ash that falls around the Sabancaya. The ash content is not abundant, but it is detrimental to the main crops in the area. In order to assess the impact on air quality in the towns of the Colca valley, due to the eruption of the volcano, environmental monitoring has been carried out measuring PM 10 and PM 2.5, obtaining values of 13.40 and 15.58 µg / m³ for PM 10; 8.92 and 2.42 µg / m³ for PM 2.5 at the Achoma AIR-01 and Maca AIR-02 stations respectively, towns located SE of the volcanic massif. The current values of the Air Environmental Quality Standards (ECA) for PM 10 particulate matter are 100 µg / m³, a 24-hour average value; while the Guide Value of the World Health Organization (WHO) is 50 µg / m³, which is the same annual average value of the national ECA. For PM 2.5 the value is 50 µg / m³, while the World Health Organization (WHO) Guide Value is 25 µg / m³. Based on these results, it can be seen that the values obtained do not exceed the

values established by the National Standard of Environmental Air Quality according to the S.D. No. 003-2017-MINAM, not considering a significant risk to air quality and people's health.

The INCA values have been calculated with respect to the calculations obtained from PM 10 and PM 2.5 from the Sabancaya volcano ashes, obtaining 8.93, 10.39 and 35.68, 9.64 respectively. Based on the ECAS for air quality monitoring, the INCA values are in the GOOD category, where they do not represent a high risk to health and the environment.

An air quality action plan for volcanic emergencies has been drawn up, as a means of remediation of the impact generated in the study area around the Sabancaya volcano, where it is based on measures to coexist with the volcanic ash, as that this type of eruptions, like the Sabancaya, have periods of duration of several years.

KEYWORDS

-Huaynaputina – Sabancaya – Ash – Air Quality – SO₂

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ABSTRACT.....	IV
ÍNDICE.....	VI
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	3
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO I:	
1 MARCO TEÓRICO	5
1.1 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD.....	5
1.2 POBLACIÓN.....	7
1.3 ANTECEDENTES	8
1.4 EL VOLCÁN HUAYNAPUTINA.....	9
1.5 EL VOLCAN SABANCAYA.....	13
1.6 LAS CENIZAS VOLCÁNICAS	14
1.7 MATERIAL PARTICULADO.....	16
1.8 LOS GASES VOLCÁNICOS	21
1.9 NORMATIVIDAD DE LACALIDAD AMBIENTAL.....	26
1.10 LA CALIDAD DE AIRE	28
1.11 ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL.....	29
1.12 VALORES FIJADOS EN LAS DIRECTRICES DE LA OMS EN LA CALIDAD DE AIRE	30
1.13 INDICE DE CALIDAD DEL AIRE - INCA	32
1.14 RESPUESTA DE LA EPA ANTE ERUPCIONES VOLCÁNICAS.....	32
1.15 PLANES DE GESTIÓN DE CALIDAD DEL AIRE	33
CAPÍTULO II:	
2 METODOLOGÍA.....	35
2.1 VOLCÁN HUAYNAPUTINA.....	36
2.1.1 MAPAS DE ISOPACAS	36

2.1.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	38
2.2 VOLCÁN SABANCAYA.....	41
2.2.1 MONITOREO DE GASES VOLCÁNICOS.....	41
2.2.2 MONITOREO VISUAL Y DISPERSIÓN DE CENIZA.....	44
2.2.3 MONITOREO Y ANÁLISIS DE LA CENIZA.....	45
2.2.4 MINERALOGÍA Y GRANULOMETRÍA GENERAL DE LA CENIZA.....	47
2.2.5 MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE PM10 Y PM2.5.....	48
2.2.6 INDICE DE CALIDAD DE AIRE.....	53
CAPÍTULO III	
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
3.1 VOLCAN HUAYNPUTINA.....	56
3.1.1 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA.....	56
3.2 VOLCAN SABANCAYA 2017-2019.....	66
3.2.1 MEDIDAS DE DIÓXIDO DE AZUFRE SO ₂	66
3.2.2 GRANULOMETRÍA DE LA CENIZA.....	68
3.2.3 MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE.....	70
3.2.6 INDICE DE CALIDAD DE AIRE.....	74
3.3 MEDIDAS DE GESTIÓN AMBIENTAL.....	75
DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	80
CONCLUSIONES.....	82
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	83
ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Vías de acceso al volcán Huaynaputina – Moquegua. Fuente: Elaboración propia.
- Tabla 2. Vías de acceso al volcán Sabancaya – Arequipa Fuente: Elaboración propia.
- Tabla 3. Población total alrededor del volcán Huaynaputina, pertenecientes a la provincia General de Sanchez Cerro. Basado en datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI censo 2017.
- Tabla 4. Datos del censo del INEI 2017, sobre población rural y urbana dentro del área de influencia del volcán Sabancaya.
- Tabla 5. Emisiones a escala global de material particulado atmosférico. D: diámetro de partícula (Modificado de Brasseur et al., 1999).
- Tabla 6. Efectos sobre la salud por exposición respiratoria al dióxido de azufre (Baxter, 2000); (Nemery, 2001).
- Tabla 7. Coordenadas de los puntos de monitoreo de Aire.
- Tabla 8. Metodología de ensayo para los parámetros. Fuente: Ensayo de laboratorio acreditado “CERPER S.A.”
- Tabla 9. Equipos utilizados para monitoreo. Elaborado por: Bioterra Consultores Asociados S.A.C.
- Tabla 10. Estándares de Calidad Ambiental para Aire.
- Tabla 11. Valores INCA en base a los ECAS, según MINAM 2017.
- Tabla 12. Cuidados y recomendaciones según categoría de Calidad del Aire, según MINAM 2017.
- Tabla 13. Datos de peso de acuerdo a cada malla de la granulometría, para las pómez y cenizas de las zonas proximales del Huaynaputina.
- Tabla 14. Datos de peso de acuerdo a cada malla de la granulometría, para las pómez y cenizas de las zonas mediales del Huaynaputina.
- Tabla 15. Datos de peso de acuerdo a cada malla de la granulometría, para las pómez y cenizas de las zonas distales del Huaynaputina.
- Tabla 16. Resultados del monitoreo ambiental de aire en la zona de Achoma.
- Tabla 17. Resultados del monitoreo ambiental de aire en la zona de Maca.
- Tabla 18. Resultados de INCA para un periodo de 24 horas.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Huaynaputina (Moquegua) y el volcán Sabancaya (Arequipa). Ambos se encuentran en una cadena de volcanes que conforman la Zona Volcánica de los Andes Centrales. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Localización del complejo volcánico Ampato Sabancaya y pueblos cercanos en el valle del Colca. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Fotografía que muestra el flanco sur del volcán Huaynaputina, terreno accidentado y de difícil accesibilidad debido a la pómez y ceniza. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Valle de la zona de Santa Cruz, pueblo sepultado por la erupción de 1600 d.C del volcán Huaynaputina. Se puede apreciar que después de 400 años, el valle es fértil. Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Gráfico que muestra las anomalías en el clima causada por las erupciones volcánicas en cuanto a la tasa de emisión de dióxido de azufre (Modificado de Stoffel, 2015).

Figura 6. Columna estratigráfica del cráter del volcán Huaynaputina, donde se muestran pómez y fragmentos líticos rocosos de tamaños métricos. Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Depósitos piroclásticos emitidos por la erupción de 1600 d.C. del volcán Huaynaputina, aflorando sobre la quebrada de Calicanto, principal pueblo sepultado. Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Comienzo de la actividad eruptiva del volcán Sabancaya en 2016. Personal del OVI monitoreando de cerca dicho macizo volcánico. Fuente: Observatorio Vulcanológico de INGEMMET.

Figura 9. Columna eruptiva de gases volcánicos y cenizas emitidas por el volcán Sabancaya. Los gases que afectan la calidad de aire se encuentran el CO_2 y el SO_2 . Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. (Izquierda) La vegetación localizada alrededor del volcán se encuentra cubierta por ceniza. (Derecha) Paneles solares de la estación de monitoreo del OVI con ceniza. Fuente: Observatorio Vulcanológico de INGEMMET.

Figura 11. Distribución del número de partículas en función del diámetro (Modificado de EPA, 1996).

Figura 12. Rango de tamaños de las partículas volcánicas (Duran, 2010).

Figura 13. Representación de las diversas regiones del aparato respiratorio humano (EPA, 2002).

Figura 14. Modelo de un sistema hidrotermal y su interacción con los gases volcánicos (Modificado de Hochtein & Broune, 2000).

Figura 15. Alteración atmosférica por emisiones volcánicas. Tomado del informe especial: Volcanismo y cambio climático (Richard Turco, 1992).

Figura 16. Cuadro de estándares de Calidad Ambiental para Aire (Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM)

Figura 17. ECAS para material particulado (OMS, 2013-2014).

Figura 18. Plan de gestión de la calidad del aire establecido por el MINAM en el 2012.

Figura 19. Niveles de estado de alerta para contaminantes críticos establecidos por el MINAM.

Figura 20. Diagrama de flujo para determinar la afectación de la calidad del aire de las erupciones del volcán Huaynaputina y Sabancaya. Elaboración Propia.

Figura 21. Mapa de isópacas del depósito de caída pliniana del volcán Huaynaputina, donde se muestra la variación del espesor (cm) con la distancia respecto al cráter, las isópacas que varían de 12 a 0.01 m de espesor (Modificado de Japura, 2018).

Figura 22. Mapa de isópacas para el periodo junio-agosto del 2019 del volcán Sabancaya (Valdivia, 2019).

Figura 23. Mapa de ubicación de secciones de muestras para el análisis granulométrico del depósito de caída pliniana de la erupción de 1600 d.C.

Figura 24. Proceso de tamizado y cuarteo de la pómez y cenizas para posterior tratamiento granulométrico.

Figura 25. Laboratorio de tamizaje (en Laboratorio de Geotecnia del LMV), donde se desarrolló el análisis granulométrico de las pómez del volcán Huaynaputina. Se usaron una batería de tamices y el limpiador ultrasónico.

Figura 26. Red de estaciones de monitoreo de la actividad del volcán Sabancaya.

Figura 27. Red de sistemas escáner DOAS para el monitoreo de gas de azufre SO_2 en la pluma volcánica del Sabancaya. Equipos donados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos a través de VDAP.

Figura 28. Equipo móvil DOAS, usado para cuantificar la tasa de SO_2 emitida por una erupción volcánica.

Figura 29. Partes del sistema DOAS para el monitoreo de gas de azufre SO_2 en la pluma volcánica.

Figura 30. Alturas de columnas eruptivas en noviembre del 2016, agosto del 2017, mayo 2018, agosto 2019. (Informe especial A6969 – Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, 2019).

Figura 31. Mapa de isópacas de la caída de ceniza producidas por el volcán Sabancaya durante el 2019; las elipses representan los espesores del depósito de cenizas medidos en los cenizómetros. (Informe especial A6969 – Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, 2019).

Figura 32. Instalación de cenizómetros en el sector de Collpa, suroeste del volcán Sabancaya, 2017.

Figura 33. Mapa de ubicación actual de los cenizómetros en los alrededores del volcán Sabancaya, ubicados en sectores proximales, mediales y distales del macizo volcánico. Actualización hasta el 2018.

Figura 34. a) Ceniza fina acumulada en el techo del centro de salud de Huanca. B) Ceniza correspondiente al periodo inicial (diciembre 2016).

Figura 35. Muestreador de alto volumen para partículas en suspensión menores a 10 micras (Hi Vol – PM 10).

Figura 36. Instalación del muestreador de alto volumen para PM10 en la Municipalidad de Achoma.

Figura 37. Instalación del muestreador de alto volumen para PM10 en la Municipalidad de Maca.

Figura 38. Gráficos de histograma de frecuencia y curva granulométrica acumulativa (Folk e Inman) de muestras representativas del sector proximal correspondiente a la primera fase (caída Pliniana) de la erupción del volcán Huaynaputina en 1600 d.C.

Figura 39. Gráficos de la columna estratigráfica representativa de la zona proximal, junto con los histogramas de granulometría de cada sección.

Figura 40. Gráficos de histograma de frecuencia y curva granulométrica cumulativa (Folk e Inman) de muestras representativas del sector medial correspondiente a la primera fase (caída Pliniana) de la erupción del volcán Huaynaputina en 1600 d.C.

Figura 41. Gráficos de la columna estratigráfica representativa de la zona medial, junto con los histogramas de granulometría de cada sección.

Figura 42. Gráficos de histograma de frecuencia y curva granulométrica cumulativa (Folk e Inman) de muestras representativas del sector distal correspondiente a la primera fase (caída Pliniana) de la erupción del volcán Huaynaputina en 1600 d.C.

Figura 43. Tabla de resultados de la Distribución Total de tamaño de grano, usando el software TOTGS. Se puede apreciar que el promedio de tamaño de grano de la erupción de 1600 d.C. se encuentra entre -5 a 2, los cuales corresponden a tamaños entre 31.5 mm a 0.25 mm. Según la distribución granulométrica 2.8, 4 y 5.6 mm.

Figura 44. Mediciones de los flujos máximos diarios con el equipo NOVAC escáner de las lecturas diarias (color azul), registradas en la estación SAD1 para el monitoreo de gases de azufre SO_2 en la pluma volcánica del Sabancaya durante el 2017. Fuente: Observatorio Vulcanológico de INGEMMET.

Figura 45. Mediciones de los flujos máximos diarios con el equipo NOVAC, escáner de las lecturas diarias (color rojo), Mediciones realizadas con el móvil DOAS (color amarillo) para el monitoreo del gas volcánico dióxido de azufre SO_2 , en la pluma volcánica del Sabancaya, durante el 2018. Fuente: Observatorio Vulcanológico de INGEMMET.

Figura 46. Mediciones de los flujos máximos diarios con el equipo NOVAC, escáner de las lecturas diarias (color rojo), registradas en las estaciones SAD1, SAD2, SAD3 y SAD5. Mediciones realizadas con el móvil DOAS (Color amarillo) para el monitoreo del gas volcánico dióxido de azufre SO_2 , en la pluma volcánica del Sabancaya, durante el 2019. (Informe especial A6969 – Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, 2019).

Figura 47. Vista de las cenizas a escala microscópica (5x-10x). Se puede apreciar cristales de Plagioclasa, Vidrio volcánico, minerales oscuros y óxidos.

Figura 48. Gráficos de barras que representan el porcentaje de peso vs el tamaño de grano de las cenizas del volcán Sabancaya durante el 2017, desde la estación Hornillos al noreste del volcán. Se puede apreciar que desde enero a mayo se presentó tamaños medios a muy finos de ceniza, mientras que a partir de setiembre a diciembre la ceniza es fina.

Figura 49. Gráfica de comparación del PM_{10} con el ECA en la zona de Achoma.

Figura 50. Gráfica de comparación del $PM_{2.5}$ con el ECA en la zona de Achoma.

Figura 51. Gráfica de comparación del PM_{10} con el ECA en la zona de Maca.

Figura 52. Gráfica de comparación del PM_{10} con el ECA en la zona de Maca.

Figura 53. Mapa de dispersión de cenizas del volcán Sabancaya correspondiente a los años 2016, 2017, 2018 y 2019, donde se puede notar que el eje de dispersión es en dirección al NO, N, SE. Datos obtenidos del SENAMHI y el OVI.

Figura 54. Mapa de peligros por caída de ceniza y pómez del volcán Sabancaya, elaborado por el OVI.



INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas han sido estudiadas científicamente para intentar explicar su origen, comportamiento, monitoreo, con el fin de salvaguardar las vidas de las personas en una probable situación de riesgo. El Huaynaputina y el Sabancaya son algunos de los volcanes más activos del sur del Perú. El estudio de las grandes erupciones volcánicas es de mucho interés para los vulcanólogos, ya que estos volcanes expulsan grandes cantidades de material volcánico que contaminan el aire. Estos materiales alcanzan la tropósfera y estratósfera, los cuales pueden afectar poblaciones cercanas al volcán a corto plazo, pero también causar grandes cambios climáticos y ambientales a corto plazo en escala local y global a largo plazo.

Fei (2015) menciona que la erupción del volcán Pinatubo de 1991 d.C. (Filipinas), generó un descenso de la temperatura global de $-1.13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mientras que la erupción del Monte Pinatubo inyectó 20 Mt de SO_2 en la atmósfera, donde el hemisferio norte se calentó $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el invierno y se enfrió $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el verano de 1991-1992 (Duran et al., 2010).

La emisión de contaminantes a la atmósfera como el Material Particulado PM 10, PM 2.5 y gases volcánicos como el SO_2 producto de la actividad volcánica, puede generar efectos con características globales, además de efectos adversos sobre la salud que incluyen afecciones a los sistemas respiratorio y cardiovascular, con una gran afectación a la calidad de aire.

La ceniza volcánica fácilmente arrastrada por el viento a grandes distancias, además del material particulado más fino que puede permanecer indefinidamente en suspensión. El aumento de la densidad poblacional en los alrededores de los volcanes hace que el riesgo por amenazas por la mala calidad de aire a causa de erupciones volcánicas sea cada vez mayor. El grado de afectación de la calidad ambiental por la actividad volcánica se puede valorar tomando en cuenta varios factores como: el área afectada por la erupción, el tiempo que persisten los efectos y residuos del material volcánico, la alteración de la calidad de vida. (Guía de Preparativos de Salud Frente a Erupciones Volcánicas OMS, OPS, 2005).

En el año 1600 d.C. el volcán Huaynaputina (Moquegua) situado en el Sur del Perú, presentó una gran erupción de tipo Pliniana, emitiendo cenizas y pómez en volúmenes entre 13 y 14 km^3 , con una columna eruptiva de hasta 35 km (Japura, 2018), (Prival et al., 2020).

Estudios de granulometría se han realizado en la Universidad de Clermont Auvergne, Francia, donde se estudió el tamaño de las cenizas provenientes del macizo volcánico.

El volcán Sabancaya es uno de los volcanes más activos del Perú, el cual se encuentra en erupción desde noviembre del 2016. Se produjeron columnas eruptivas de hasta 4.5 km de altura, donde

las cenizas arrojadas llegaron hasta la localidad de Chivay y a lo largo de todo el valle del Colca, a unos 30 km del volcán Sabancaya. El proceso eruptivo continúa actualmente y el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI), monitorea constantemente y a tiempo real el comportamiento del volcán, con equipos de Monitoreo Sísmico, Visual, Geodésico y Geoquímico, también se realizan acciones de educación y sensibilización de la población frente al riesgo volcánico. Debido a que las emisiones de ceniza de dicho volcán afectan parcial y totalmente a los pueblos distribuidos en el valle del Colca, se pretende caracterizar la calidad de aire de la zona, utilizando al mencionado como única fuente natural. Para poder cuantificar la cantidad de SO_2 que emite el volcán Sabancaya, el OVI tiene implementado un sistema de monitoreo utilizando técnicas de espectroscopia UV empleando estaciones DOAS (Espectrometría de Absorción Óptica Diferencial). Los datos de PM 10 y PM 2.5 se han obtenido de un monitoreo de calidad de aire realizado en los poblados de Chivay, Achoma y Maca por la empresa BioTerra, Consultores Asociados SAC. Actualmente, el conocimiento de contaminantes atmosféricos como PM10 y PM 2.5 en la Región es limitado, debido a la falta de apoyo de las autoridades en implementar sistemas de vigilancia de la calidad del aire con un enfoque de salud ambiental.

Para la localidad de Chivay en Arequipa y de Quinistaquillas – Omate en Moquegua el tema de la calidad del aire es importante, ya que se dichas localidades se encuentran asentadas próximos a volcanes activos, donde esta presenta una alta densidad de ceniza volcánica y emisiones de gases volcánicos. Las partículas de menos de 4 μm de diámetro viajan por el aire con una capacidad de alojarse en las partes más profundas del sistema respiratorio, donde irritan las vías respiratorias, ocasionando síntomas de obstrucción. Las cenizas volcánicas pueden contener partículas silicatadas de tamaño respirable, lo que puede producir problemas agudos a largo plazo para las poblaciones expuestas.

La Gestión de la Calidad del Aire en el Perú cuenta con una institucionalidad establecida en los niveles nacionales (MINAM, DIGESA, SENAMHI, OEFA, SNGA, sectores), regional y local, así como la participación del sector privado y sociedad civil, cada día más conscientes de la importancia de la calidad del aire para la salud. Se cuenta con un marco normativo que define los instrumentos de gestión para la calidad del aire, como son los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), Límites Máximos Permisibles (LMP), conformación de los Grupos de Estudio Técnico Ambiental (GESTA) para la elaboración de los planes de acción de la calidad del aire y la implementación de los mismos; así como con programas de vigilancia de la calidad del aire. (Informe de Calidad del Aire 2013-2014 -MINAM, 2014).

En este estudio también se utilizará el Índice de Calidad del Aire (INCA), como un indicador que muestre los valores calculados de manera sencilla y directa, presentando los valores máximos y

mínimos encontrados en cada ciudad. Se han plan implementado programas de vigilancia de calidad del aire y manejo ambiental.

La realización de esta tesis se hizo con el financiamiento de Cienciaactiva, en el marco del Convenio con Fondecyt 0015-2017.

HIPÓTESIS

HIPÓTESIS PRINCIPAL

Es posible que una evaluación y análisis científico del material particulado y de la dispersión, así como el estudio granulométrico de las tefras de los volcanes Huaynaputina y Sabancaya, nos permita conocer los efectos de las erupciones volcánicas en el medio ambiente, particularmente la calidad de aire en las zonas de Chivay, Achoma y Maca.

SUB - HIPÓTESIS

- 1.- Los productos volcánicos que son expulsados a la atmósfera, afectan la calidad del aire.
- 2.- El análisis del tamaño de grano de las partículas volcánicas, nos permiten medir el grado de afectación en la calidad del aire en el medio ambiente.
- 3.- Es probable postular algunas medidas para mitigar los efectos ambientales negativos de parte de las erupciones volcánicas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar el efecto de las erupciones volcánicas del Huaynaputina y del Sabancaya sobre la calidad ambiental del aire.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Realizar un análisis granulométrico de las cenizas emitidas por los volcanes Huaynaputina y Sabancaya.
2. Realizar el monitoreo de la calidad de aire para los parámetros de PM 10 y PM 2.5, al fin de evaluar el grado de afectación en el medio ambiente en base a los ECAS por el MINAM, con la normativa nacional vigente.
3. Calcular el Índice de Calidad del Aire AQI con respecto al Material Particulado del volcán Sabancaya.
4. Determinar los efectos ambientales y proponer un plan de mitigación y remediación de riesgos ambientales por parte de una erupción volcánica.

CAPÍTULO I: 1 MARCO TEÓRICO

1.1 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

El volcán Huaynaputina (4800 msnm); con coordenadas 8162195N, 302187E (UTM – WGS 84 – Zona 19 Sur), se encuentra a 75 km al SE de la ciudad de Arequipa, en la región de Moquegua (Figura 1). Dentro de los pueblos más cercanos se encuentran: Omate ubicado a 15 km al este, Quinistaquillas a 14 km al suroeste del cráter del volcán, los cuales fueron seriamente afectados por la erupción de hace 420 años. El acceso al volcán Huaynaputina se realiza a través de 3 vías principales, desde las ciudades de Arequipa y Moquegua, como se indica en la tabla 1.

Tabla 1
Vías de acceso al volcán Huaynaputina.
Fuente: Elaboración propia.

Carretera	Tiempo	Km
La carretera Arequipa-Omate-Quinistaquillas	4 h	141
La carretera Arequipa-Matalaque-Quinistaquillas	5 h	282
La carretera Moquegua-Torata-Quinistaquillas	3 h	113

El volcán Sabancaya se encuentra ubicado a 75 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, a 36 km al suroeste de la localidad de Chivay, en la Provincia de Caylloma, Región de Arequipa (Figura 1 y 2). La cumbre del volcán Sabancaya se encuentra a 5980 msnm y el edificio volcánico cubre un área de 65 a 70 km². Este volcán es considerado el segundo más activo del Perú después del Ubinas.

El acceso al volcán Sabancaya se realiza a través de 2 vías principales, desde las ciudades de Arequipa, como se indica en la tabla 2.

Tabla 2
Vías de acceso al volcán Sabancaya – Arequipa.
Fuente: Elaboración propia.

Carretera	Tiempo	Km
La carretera Arequipa-Sumbay-Patapampa-flanco este del Ampato Sabancaya	4 h	141
	4.5 h	282

La carretera Arequipa-Yura-Huanca-Taya-flanco
este del Ampato Sabancaya

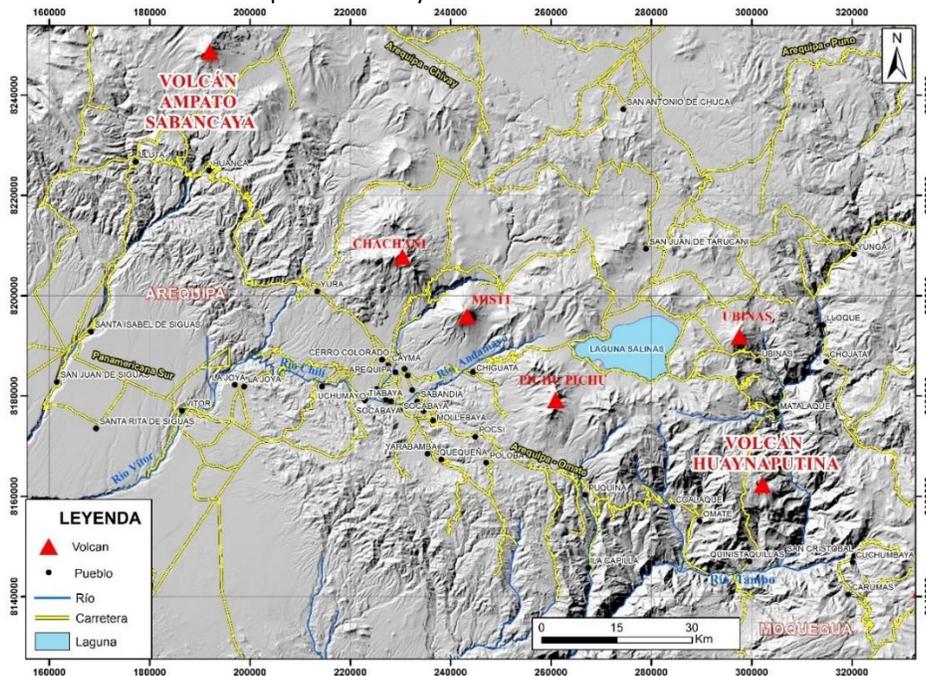


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Huaynaputina (Moquegua) y el volcán Sabancaya (Arequipa). Ambos se encuentran en una cadena de volcanes que conforman la Zona Volcánica de los Andes Centrales.

Fuente: Elaboración propia.

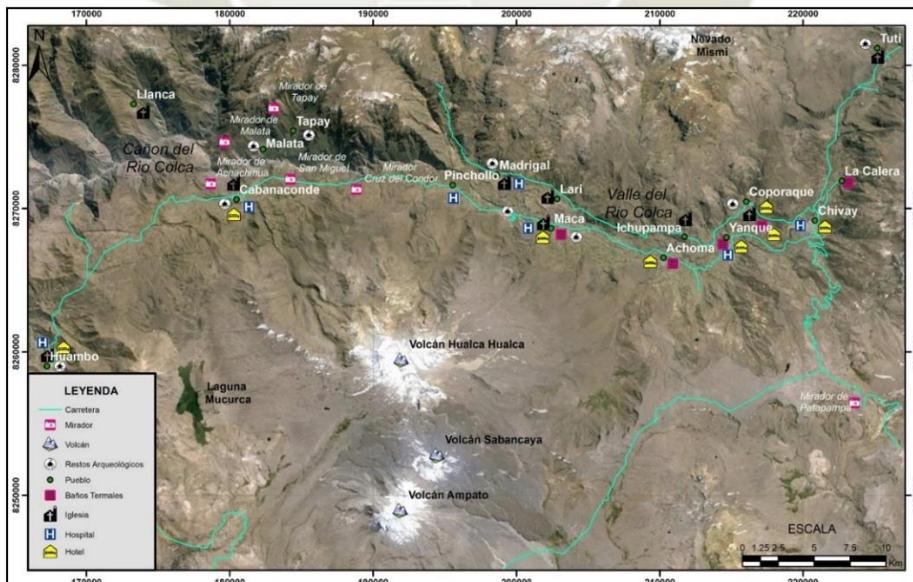


Figura 2. Localización del complejo volcánico Ampato Sabancaya y pueblos cercanos en el valle del Colca.

Fuente: Elaboración propia.

1.2 POBLACIÓN

En un radio 15 km del volcán Huaynaputina se encuentran asentados 4 distritos con sus respectivos anexos. Según el censo del 2017 realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI (Tabla 3).

Tabla 3

Población total alrededor del volcán Huaynaputina, pertenecientes a la provincia General de Sanchez Cerro. Basado en datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI censo 2017.

Provincia	Distrito	Población total
G. Sanchez Cerro	Omate	3158
G. Sanchez Cerro	Matalaque	455
G. Sanchez Cerro	Quinistaquillas	518
Total		61273

Dentro de un radio de 50 km alrededor del volcán Sabancaya, se localiza: Chivay, Coporaque, Achoma, Yanque, Tuti, Cabanaconde, Callalli, Choco. Huambo, Huanca, Ichupampa, Lari, Lluta, Maca, Madrigal, pinchollo, Sibayo, Tisco, Santiago de Chuca y Tapay que alberga una población total (rural y urbana) de 66811 habitantes.

Tabla 4

Datos del censo del INEI 2017, sobre población rural y urbana dentro del área de influencia del volcán Sabancaya.

Provincia	Distrito	Población Censada	Población total
Caylloma	Chivay	5770	6242
Caylloma	Coporaque	1089	1220
Caylloma	Yanque	2117	2271
Caylloma	Tuti	621	672
Caylloma	Achoma	841	907
Caylloma	Huanca	1010	1106
Caylloma	Lluta	718	788
Caylloma	Huambo	670	729
Caylloma	Tapay	772	801
Caylloma	Maca	701	756
Caylloma	Cabanaconde	2096	2314
Caylloma	Ichupampa	555	598
Caylloma	Callalli	1458	1599
Caylloma	Lari	904	970
Caylloma	Sibayo	669	726
Caylloma	Madrigal	648	693
Caylloma	Tisco	1441	1602

Caylloma	San Antonio de Chuca	896	975
Castilla	Chachas	1646	1758
Castilla	Ayo	242	261
Castilla	Uñon	207	221
Castilla	Huancarqui	1472	1609
Castilla	Choco	702	767
Arequipa	Santa Isabel de Sigwas	682	771
Arequipa	Yura	33346	36455
TOTAL		61273	66811

1.3 ANTECEDENTES

Los reportes en sobre la erupción del Huaynaputina en el año 1600 DC, son los siguientes:

- Costa, F. & Scaillet, B., (2003). Massive atmospheric sulfur loading of the AD 1600 Huaynaputina eruption and implications for petrologic sulfur estimates, estimaron la cantidad de azufre emitido, concluyendo que dicha erupción produjo 26 – 55 Tg de azufre inyectado a la atmósfera.
- Delgado R., (2012), elaboró una tesis de Ing. Geólogo titulada: “Estudio geológico, petrográfico y geoquímico del complejo volcánico Ampato-Sabancaya (2012)”, la cual fue presentada a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Fei et al., (2015). 1600 AD Huaynaputina Eruption (Peru), Abrupt Cooling, and Epidemics in China and Korea, realizó el estudio de los cambios drásticos ocasionados por la erupción, al clima de los países lejanos como China y Corea.
- INGEMMET, Boletín N° 61, Serie C: Geología y Evaluación de Peligros del Complejo Volcánico Ampato – Sabancaya (Arequipa), don de puede apreciar las características de la erupción de 2016-2018 del volcán Sabancaya.
- Lavallé (2009); Shanaka (2008); Thouret (2002), hicieron estudios de geología y tefroestratigrafía de la erupción de 1600 d.C. del volcán Huaynaputina.
- Ministerio del Ambiente, Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014, donde se puede apreciar las diferentes fuentes de emisión de material particulado y dióxido de azufre en las principales regiones del Perú.
- Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, Informes Anuales 2016, 2017 y 2018 de la actividad eruptiva y el monitoreo de cenizas del volcán Sabancaya.
- Roy Navarro (1994), en el libro “Antología del valle de Omate”, narra el origen y la convivencia de los pobladores de los repartimientos de Omate y Quinistacas, hasta el

momento de la erupción, así también relata la evolución de la erupción y los daños causados en el contexto social y económico.

- Thouret J. C., Gourgaud A., Uribe M., Guillande y R., Salas G. (1994) publicaron un estudio sobre “La actividad eruptiva actual del volcán nevado Sabancaya (Sur del Perú): reconocimiento geológico, evaluación y cartografiado de las amenazas volcánicas” en el Boletín de la Sociedad Geológica de Francia N° 165, Vol. 1, 49-63. Para el episodio eruptivo de 1990-1992, dichos autores estimaron un volumen de tefra emitido de 0.025 km³. La dispersión de la ceniza alcanzó más de 20 km de distancia al Este respecto al volcán.

1.4 EL VOLCÁN HUAYNAPUTINA

El volcán Huaynaputina (Figura 3) se encuentra situado a 4800 m.s.n.m., constituido por una sucesión de flujos de lavas e ignimbritas cuyo emplazamiento ocurrió en el Pleistoceno, hace más de 1 millón de años. Es considerado un estratovolcán, caracterizado por presentar erupciones explosivas, como en 1600 d.C.



Figura 3. Fotografía que muestra el flanco sur del volcán Huaynaputina, terreno accidentado y de difícil accesibilidad debido a la pómez y ceniza.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Valle de la zona de Santa Cruz, pueblo sepultado por la erupción de 1600 d.C del volcán Huaynaputina. Se puede apreciar que después de 400 años, el valle es fértil.

Fuente: Elaboración propia.

1.4.1 ERUPCIÓN DE 1600 D.C. DEL VOLCÁN HUAYNAPUTINA

La erupción de 1600 del volcán Huaynaputina es considerada la mayor erupción histórica ocurrida en Sudamérica en los últimos 500 años, sepultando a más de 15 pueblos los cuales se asentaron alrededor del volcán (Navarro, 1994); (Thouret et al., 1999 - 2002); (Adams et al., 2001).

Un relato del cura de Puquina, pueblo situado a 35 km al oeste del volcán Huaynaputina, quien visitó Omate un mes después de la erupción, refiere que “halló muertos a sus habitantes y cocidos con el fuego de las piedras encendidas” (Barriga, 1952).

Dicha erupción ocasionó la muerte de aproximadamente 1500 personas en los valles de Omate y Tambo, originando el descenso de la temperatura, provocando uno de los veranos más fríos de la historia en el hemisferio norte del planeta (Costa and Scaillet, 2003); (Stoffel et al., 2015).

Briffa et al., (1998), ha contabilizado los anillos de árboles en el hemisferio Norte para estimar algunas anomalías, obteniendo un descenso de temperatura de -0.8 C° en el verano de 1601.

Stoffel et al., (2015), clasificó la disminución de la temperatura del año 1601 como uno de los mayores enfriamientos inducidos por volcanes en la era actual. Los efectos de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C., fueron devastadores en la región sur del Perú, además de la zona occidental de Bolivia y norte de Chile. Generó un considerable daño a la infraestructura (viviendas, andenes, caminos y puentes), actividad agrícola, ganadera y economía del recién fundado Virreinato del

Perú, Navarro et al., (2000). Este enfriamiento tuvo efectos devastadores no solo en la economía colonial en Perú y Bolivia, sino también con la pobre producción de vino en Alemania y severa hambruna en Rusia. La erupción comenzó el 19 de febrero y se prolongó hasta el 6 o 15 de marzo de 1600 d.C., aunque hasta la fecha son poco conocidos los reales alcances de esta erupción, la cultura de aquella época y la historia que los enmarcaba, fue sepultada junto con su población. Esta erupción dio origen a lugares que poseen características geológicas y geomorfológicas singulares, así como una belleza paisajística excepcional.

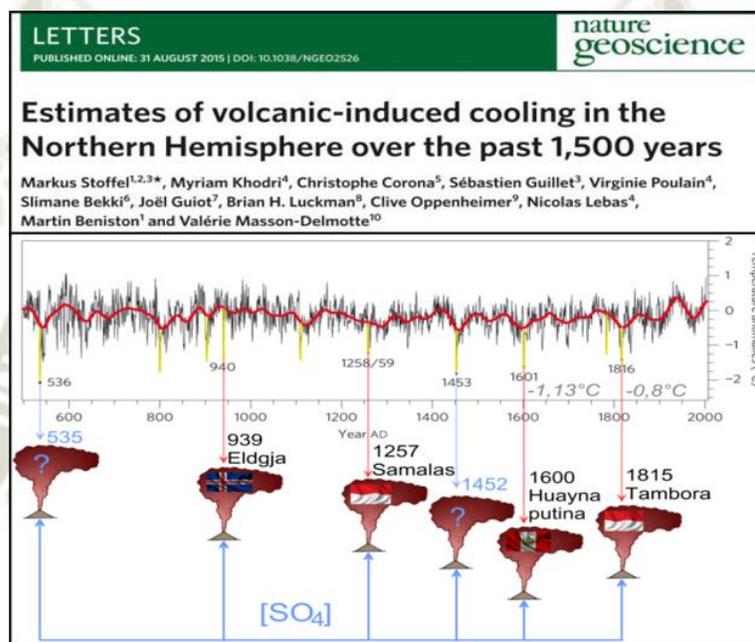


Figura 5. Gráfico que muestra las anomalías en el clima causada por las erupciones volcánicas en cuanto a la tasa de emisión de dióxido de azufre (Modificado de Stoffel, 2015).

1.4.2 DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS

Se han podido registrar 5 unidades que comprenden los depósitos emitidos por esta colosal erupción. El depósito de caída pliniana corresponde al primer evento producido por la erupción del 1600 d.C. El lóbulo de dispersión de ceniza conforme aumenta la distancia con respecto al volcán. En la zona proximal (< 32 km), el depósito de caída pliniana está distribuido al oeste-noroeste (sotavento) pero disminuye hacia el este. A una distancia de 15 km del cráter al SO en dirección al eje de dispersión, el depósito de caída pliniana es masiva, varía entre 2 a 2.6 m de espesor. En la zona medial, a 35 km del cráter entre Jaguay Grande y Jaguay Chico el depósito tiene un espesor de 0.26 a 0.32 m. Una segunda

unidad consiste en capas de ceniza de espesor milimétrico alternadas con capas de ceniza gruesa de espesor centimétricos y lapilli (Figura 6).

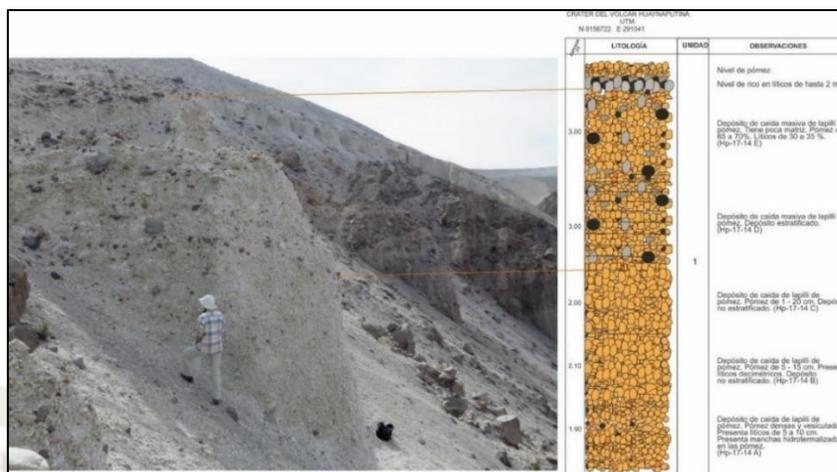


Figura 6. Columna estratigráfica del cráter del volcán Huaynaputina, donde se muestran pómez y fragmentos líticos rocosos de tamaños métricos.

Fuente: Elaboración propia.

Los productos más letales de la erupción del Huaynaputina fueron corrientes de densidad piroclástica se generaron por colapsos repetitivos de la columna. Se diferenciaron dos tipos de flujos canalizados y no canalizados que se extendieron hasta un radio de 40 km con direcciones al este, noreste y sureste del cráter, ubicados en los afluentes del río Tambo. Estos depósitos predominan hacia el O, NO, SO, siendo visibles hasta la zona distal. La disminución del espesor en zonas proximales se atribuye a la erosión por los flujos de ceniza (unidad 5) subsecuentes (Japura, 2018).



Figura 7. Depósitos piroclásticos emitidos por la erupción de 1600 d.C. del volcán Huaynaputina, aflorando sobre la quebrada de Calicanto, principal pueblo sepultado.

Fuente: Elaboración propia.

1.5 EL VOLCAN SABANCAYA

El Sabancaya es considerado el segundo volcán más activo del Perú después del Ubinas. Su actividad en el Holoceno estuvo dominada por el emplazamiento de flujos de lava y domos de lava con pocas ocurrencias de corrientes piroclásticas de densidad. (Thouret et al., 1994); (Gerbe and Thouret, 2004); (Samaniego et al., 2016).

Gerbe and Thouret (2004) mencionan que en época histórica el Sabancaya produjo tres erupciones explosivas, la primera reportada por las crónicas españolas en el siglo XVIII, la segunda entre 1990-1998 que presentó ceniza y fragmentos balísticos, y la última actividad reciente en 2016.

A partir del 6 de noviembre del 2016, el Sabancaya ha iniciado un nuevo proceso eruptivo caracterizado por recurrentes explosiones con presencia de gases y ceniza (Figura 8 y 9).



Figura 8. Comienzo de la actividad eruptiva del volcán Sabancaya en 2016. Personal del OVI monitoreando de cerca dicho macizo volcánico.

Fuente: Observatorio Vulcanológico de INGEMMET.



Figura 9. Columna eruptiva de gases volcánicos y cenizas emitidas por el volcán Sabancaya. Los gases que afectan la calidad de aire se encuentran el CO_2 y el SO_2 .

Fuente: Elaboración propia.

1.6 LAS CENIZAS VOLCÁNICAS

Las cenizas volcánicas son partículas producidas por fragmentación mecánica del magma durante las erupciones (Zimanowski et al., 2003).

La distribución de la ceniza y el tiempo de permanencia en la atmósfera depende del tamaño, densidad y vesicularidad de las partículas, así como de la altura de la columna eruptiva y las características atmosféricas (variaciones altitudinales en la dirección y velocidad del viento). La ceniza puede distribuirse desde metro hasta cientos de kilómetros a partir de la fuente emisora. Erupciones muy energéticas presentan cenizas más fragmentadas y producen columnas eruptivas más altas.

La ceniza volcánica está compuesta por óxidos, principalmente de sílice, aluminio y hierro (80%), magnesio, calcio, sodio, potasio, plomo; metales pesados como vanadio, cromo, cobalto, níquel y zinc. (Guía de Preparativos de Salud Frente a Erupciones Volcánicas, OMS, OPS, 2005).

El tamaño de las partículas y su composición mineral varía entre volcanes y aún entre erupciones de un mismo volcán. La ceniza arrojada dentro de la atmosfera puede causar enfermedades en poblaciones humanas a través de la caída de partículas provenientes de las columnas eruptivas.

1.6.1 IMPACTOS EN LOS HUMANOS Y EL MEDIO AMBIENTE

El transporte de los elementos halógenos y trazas de la ceniza volcánica a la superficie durante la caída, podría impactar los ecosistemas terrestres, así como la salud humana y animal. La caída de

ceniza puede causar el colapso de construcciones debido a la rápida acumulación y a la alta densidad de partículas de ceniza volcánica y puede contaminar también a las fuentes de agua (Spence et al., 2005).

Las cenizas en el aire y los gases tóxicos de SO_2 en altas concentraciones pueden presentar problemas respiratorios en los humanos.

Los riesgos que tiene la lluvia de ceniza en la salud de las personas se valoran por seis factores: la concentración total de las partículas suspendidas que bajan por el aire, el tamaño de las partículas, la frecuencia de las caídas y la duración de la exposición, enfermedades preexistentes de las vías respiratorias y la presencia de sílice (SiO_2) en las cenizas (Enríquez, 2012).

Los impactos dependen no solo de la magnitud de la erupción, sino de su duración. Las partículas de ceniza producidas en erupciones explosivas son a menudo lo suficientemente pequeñas para ser rápidamente inhaladas en lo profundo de los pulmones y las partículas más gruesas pueden alojarse en la nariz o en los ojos e irritar la piel. Según los estudios de la OMS las partículas de diámetro de 15 micras se depositan en la nariz, las de 10 micras alcanzan a llegar al árbol traqueo-bronquial y las menores de 5 micras son capaces de llegar a los alvéolos (OMS, OPS, 2005).

La ceniza volcánica fresca es arenosa, abrasiva, en ocasiones corrosiva y siempre desagradable. Aunque la ceniza no es altamente tóxica, puede afectar a los niños pequeños, a los ancianos y a quienes sufren problemas respiratorios. La ceniza también puede introducirse en los ojos y rayarlos, especialmente cuando hay mucho viento. La ceniza puede ser peligrosa para el ganado de pastoreo y dañar las instalaciones de tratamiento del agua potable y de las aguas residuales (u obligar su cierre) al obturar o dañar los equipos (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos - EPA).



Figura 10. (Izquierda) La vegetación localizada alrededor del volcán se encuentra cubierta por ceniza. (Derecha) Paneles solares de la estación de monitoreo del OVI con ceniza.

Fuente: Observatorio Vulcanológico de INGEMMET.

1.7 MATERIAL PARTICULADO

El término material particulado (PM por sus siglas en inglés) se utiliza para describir pequeñas partículas sólidas y gotas líquidas suspendidas en el aire, presentes en la atmósfera ya sea por una fracción pequeña de tiempo (algunos minutos) o largos periodos (días o semanas). La tasa de partículas volcánicas que pasan la atmósfera y se asientan en la superficie terrestre debido a la gravedad, está en función del tamaño de la partícula, la densidad y la forma (Duran et al., 2010).

El material particulado proveniente de las erupciones volcánicas se caracteriza por su granulometría predominantemente gruesa, aunque dependiendo de la velocidad del viento pueden encontrarse partículas en el rango de las finas (Alfaro et al., 1998).

Durante las erupciones volcánicas también se emiten partículas primarias que pueden alcanzar la Estratósfera. (Finlayson-Piits y Pitts, 2000); (Duran et al., 2010).

El material particulado puede ser emitido directamente a la atmósfera a partir de distintas fuentes antropogénicas o naturales (partículas primarias), también puede ser producto de reacciones químicas de ciertos gases en la atmósfera o procesos de condensación (partículas secundarias).

1.7.1 TAMAÑO DE PARTÍCULA

El diámetro de las partículas atmosféricas en suspensión varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micras (μm). Generalmente se identifican diferentes rangos de tamaños de partícula denominados “modas”, que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas: nucleación, aikten, acumulación y moda gruesa. (Warneck, 1988); (EPA, 1996); (Seinfeld y Pandis, 1998).

Las partículas menores a $10 \mu\text{m}$ (PM₁₀) son de especial interés dentro de las redes de calidad del aire y la epidemiología debido a su capacidad de ingresar al sistema respiratorio humano. En el PM₁₀ se distingue una fracción fina, diámetros menores de $2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) y una fracción gruesa, con diámetros entre 2.5 y $10 \mu\text{m}$. Así, como se verá más adelante, se denomina “partículas finas” en ciencias atmosféricas a aquellas partículas de diámetro $<1\mu\text{m}$, mientras que en epidemiología esta definición abarca hasta las partículas de diámetro $<2.5 \mu\text{m}$ (Figura 11).

En general, la granulometría y la composición química del material particulado suelen ser características del foco emisor. La denominación de las partículas incluidas en determinados rangos granulométricos varía en función del ámbito de estudio, ya sea en ciencias atmosféricas o en epidemiología y calidad del aire (Rodríguez et al., 2003).

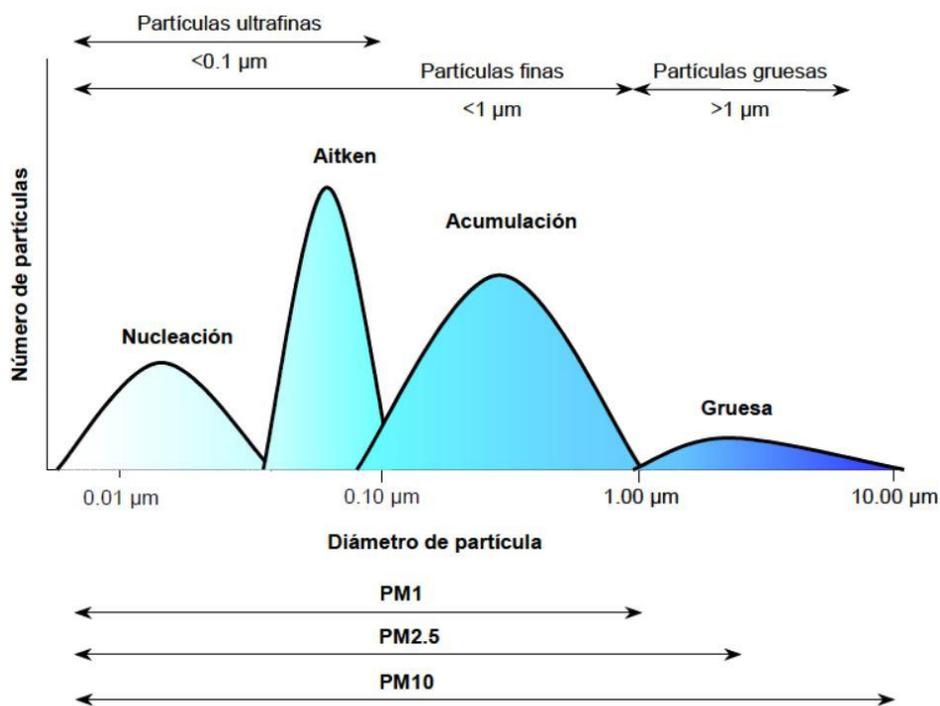


Figura 11. Distribución del número de partículas en función del diámetro (Modificado de EPA, 1996).

La figura siguiente compara el rango de tamaños de las partículas volcánicas presentes en las emisiones volcánicas que consisten en una mezcla de gases (H_2O , CO_2 , SO_2), aerosoles sólidos o líquidos de partículas (diámetro menor a $30 \mu m$) en un medio gaseoso, el cual se muestra en verde y las partículas de ceniza silicatadas (diámetro menor a $2000 \mu m$), que se muestran en azul (Figura 12). El tamaño, la forma y composición de las partículas volcánicas se caracterizan por ser muestreadas del aire (Duran et al., 2010).

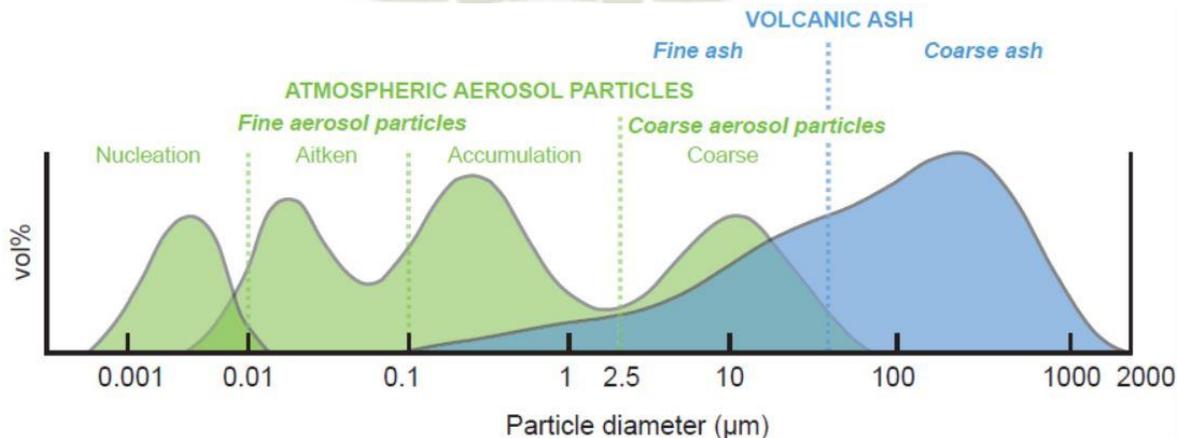


Figura 12. Rango de tamaños de las partículas volcánicas (Duran, 2010).

1.7.2 EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO

Según Brasseur et al., (1999) las emisiones a escala global de material particulado atmosférico se reflejan en la Tabla 5. Los resultados se expresan en millones de toneladas/año, y se han dividido en emisiones de fuentes antropogénicas y naturales, primarias y secundarias, de partículas de diámetro $<25 \mu\text{m}$ y $<1 \mu\text{m}$. Según estos datos, anualmente se emiten a la atmósfera entre 2.428 y $4.875 \cdot 10^6$ toneladas de material particulado de diámetro $<25 \mu\text{m}$, de las cuales entre 962 y $2.030 \cdot 10^6$ toneladas (alrededor del 40%) poseen un diámetro $<1 \mu\text{m}$.

Tabla 5

Emisiones a escala global de material particulado atmosférico. D: diámetro de partícula (Modificado de Brasseur et al., 1999).

EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO (10^6 t/año)					
Natural			Antropogénico		
Primario	D < 25 μm	D < 1 μm	Primario	D < 25 μm	D < 1 μm
Mineral	1000-3000	265	Industria	40-130	20-65
Incendios forest.	3-150	2-75	OC+EC	60-220	60-220
Aerosol marino	$1000 \cdot 10^4$	20-100	Mineral	820	140
Volcanes	$4 \cdot 10^4$	0.4-100			
Orgánico	26-50				
Secundario			Secundario		
DMS, H ₂ S	60-110	60-110	SO ₂	120-180	120-180
SO ₂ (volcanes)	10-30	10-30	NO _x	20-50	5-10
NO _x biogénico	10-40	10-40	COVs	5-25	5-25
COV biogénico	40-200	40-200			
NH ₃ , NH ₄ ⁺	80-270	80-270			
Total natural	1363-3550	397-1390	Total antropogénico	1065-1325	565-640

Generalmente, las mediciones de la calidad del aire se notifican como concentraciones medias diarias o anuales de partículas PM10 por metro cúbico (m^3) de aire. Las mediciones sistemáticas de la calidad del aire describen esas concentraciones de PM expresadas en microgramos (μ)/ m^3 . Cuando se dispone de instrumentos de medición suficientemente sensibles, se notifican también las concentraciones de partículas finas (PM2,5 o más pequeñas).

El material particulado es el contaminante que más deteriora la calidad del aire, superando en algunas ciudades los límites máximos permisibles tanto anuales como diarios.

1.7.3 EFECTOS POR EXPOSICIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PM10 Y PM2.5

El material particulado atmosférico es, tal como se ha descrito anteriormente, un conjunto heterogéneo de partículas emitidas por muy diversas fuentes, que incluye componentes de distinta naturaleza. Consecuentemente, los efectos del material particulado sobre el entorno son también muy variados, y los más importantes entre ellos se describen a continuación.

1.7.3.1 EFECTOS SOBRE LA SALUD

El sistema respiratorio constituye la principal vía de entrada del material particulado en el organismo. La deposición de las partículas en diferentes partes del cuerpo humano depende del tamaño, forma y densidad de las partículas, así como de la respiración del individuo (nasal u oral). Posteriormente, los efectos que puede inducir el material particulado en el organismo dependen de la granulometría, la morfología y la composición química de las partículas, el tiempo de exposición y la susceptibilidad de cada persona. Todas las partículas de diámetro $<10 \mu\text{m}$ (PM10, partículas torácicas) tienen un tamaño suficiente para penetrar en la región traqueobronquial (Figura 13), pero sólo aquellas de diámetro $<2.5 \mu\text{m}$ (PM2.5, partículas alveolares) pueden alcanzar la cavidad alveolar y, por tanto, provocar mayores afecciones (Arciniégas et al., 2011).

Los mecanismos de defensa del cuerpo humano tienen la capacidad de remover partículas inhaladas con diámetros superiores a $10 \mu\text{m}$, sin embargo, las partículas con diámetros menores (conocidas como —inhalables) pueden ingresar y depositarse en el sistema respiratorio humano (Zimanowsky et al., 2003).

Según la US EPA (2009), la exposición a PM10 ya sea a corto plazo (24 horas) o largo plazo (años), ha sido relacionada con enfermedades y muertes debido a la generación de problemas cardíacos y pulmonares.

La exposición a niveles altos de PM10 genera problemas en la salud que se incrementan progresivamente. El riesgo va desde la irritación de las vías respiratorias, tos, dificultad para respirar, disminución de la función pulmonar, asma agravada, desarrollo de bronquitis crónica, arritmia cardíaca, infartos no letales y muerte prematura en personas con problemas del corazón y pulmones. Los efectos de la exposición al material particulado atmosférico se observan tanto en episodios de contaminación crónicos como agudos (Who, 2002).

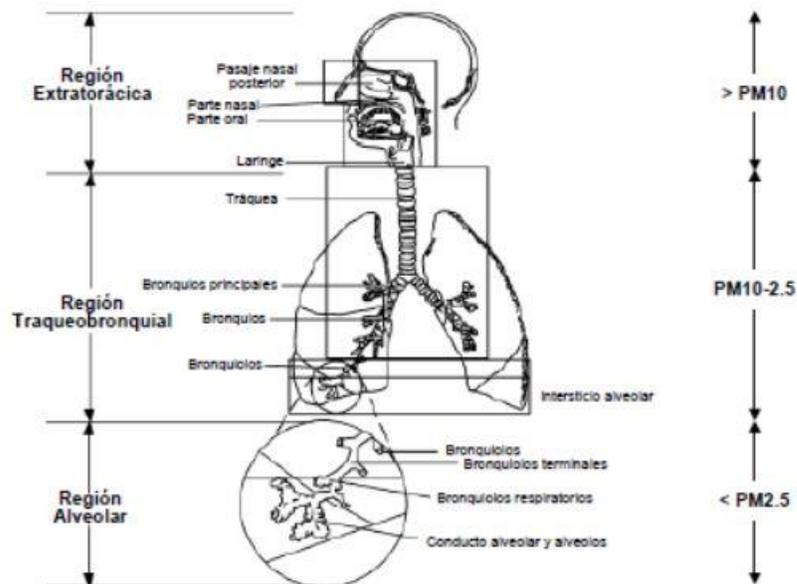


Figura 13. Representación de las diversas regiones del aparato respiratorio humano (EPA, 2002).

1.7.3.2 EFECTOS SOBRE EL AMBIENTE

La atmósfera es la parte del medio ambiente en la cual el ser humano está permanentemente en contacto, por lo tanto, el sistema respiratorio constituye la principal vía de entrada al organismo para el material particulado atmosférico (MPA). El grado de penetración dependerá del tamaño de partícula, ya que, a menor tamaño, la partícula podrá eludir más fácilmente los mecanismos de defensa del sistema respiratorio. Los efectos que pueden producir son muy diversos debido a la variabilidad de granulometría, composición química y morfología que podemos encontrar. Diversos estudios epidemiológicos ponen de manifiesto la existencia de una relación directa entre los niveles de PM10 (material particulado con diámetro $< 10 \mu\text{m}$; partículas torácicas) y el número de muertes y hospitalizaciones diarias debidas a enfermedades pulmonares y cardiovasculares.

La contaminación atmosférica produce daños tanto estéticos como físicos en los materiales de forma que edificios, monumentos y obras de arte pueden verse perjudicadas por la deposición seca o húmeda del Material particulado. Los daños físicos se producen por la deposición húmeda de contaminantes como material particulado (principalmente sulfatos y nitratos) y SO_2 que aceleran los procesos normales de degradación por agentes atmosféricos (EPA, 2004).

Multitud de estudios tratan de evaluar la influencia de diversos procesos climáticos sobre la emisión y flujos de material particulado atmosférico a escala global. Sin embargo, es necesario considerar la influencia de las mencionadas partículas atmosféricas sobre el clima, ya que la retroalimentación es un factor de gran importancia en el sistema Tierra-atmósfera. Las partículas atmosféricas juegan un papel fundamental en la regulación del clima del planeta, ya que ejercen un cierto grado de influencia sobre la formación de nubes y el balance radiactivo global. El material particulado atmosférico posee la capacidad de dispersar y absorber radiación de onda larga y corta, y consecuentemente puede llegar a perturbar el balance energético del sistema Tierra-atmósfera (Arimoto, 2001).

1.8 LOS GASES VOLCÁNICOS

Los gases volcánicos fluyen desde el reservorio magmático hacia la superficie, donde se manifiestan como fumarolas, respiraderos de vapor, fuentes termales, etc., (Figura 14). En periodos de baja actividad volcánica existe un equilibrio entre los fluidos de la cámara magmática y las manifestaciones geotermales, sin embargo, al ingresar nuevo material o magma a la cámara magmática este equilibrio se rompe y se manifiesta con un aumento de presión, temperatura y/o cambio de concentración de los componentes. Estos parámetros alteran la química “normal” de las manifestaciones geotermales. (Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, 2015).

Los estudios epidemiológicos indican que la exposición poblacional a los gases volcánicos depende de la intensidad y duración de la actividad volcánica, así como de la altura del volcán, las características topográficas y los fenómenos meteorológicos. De tal suerte que la contaminación del aire en zonas habitadas y relativamente alejadas del volcán tendría efectos inflamatorios agudos reversibles en la población sana, y podría provocar dificultad respiratoria en personas con padecimientos respiratorios obstructivos crónicos. Por esta razón, se debe vigilar la dispersión atmosférica de estos gases hacia áreas habitadas, con el fin de que en caso de que las concentraciones sobrepasen los estándares establecidos de calidad del aire se realicen las acciones preventivas para este tipo de contingencias. Durante el período de actividad volcánica hay emanación de vapor de agua; pero también se han identificado gases tóxicos como el dióxido de carbono (CO_2), el dióxido y trióxido de azufre (SO_2 , SO_3), que combinados con el vapor de agua originan ácidos sulfhídrico y sulfúrico (H_2S , H_2SO_4). Las emanaciones de SO_2 del volcán Kilauea, en Hilo Hawái, se relacionaron con un aumento en los casos de asma (Sierra, 2012).

Partículas con diámetros menores a $15 \mu\text{m}$ se clasifican como inhalables, con potencial se dañan las partes altas del sistema respiratorio, mientras que las partículas menores de $4 \mu\text{m}$ se clasifican como respirables y pueden llegar hasta la región alveolar con potencial de generar problemas crónicos a largo plazo. Los volátiles son transportados en forma gaseosa o en forma de aerosol.

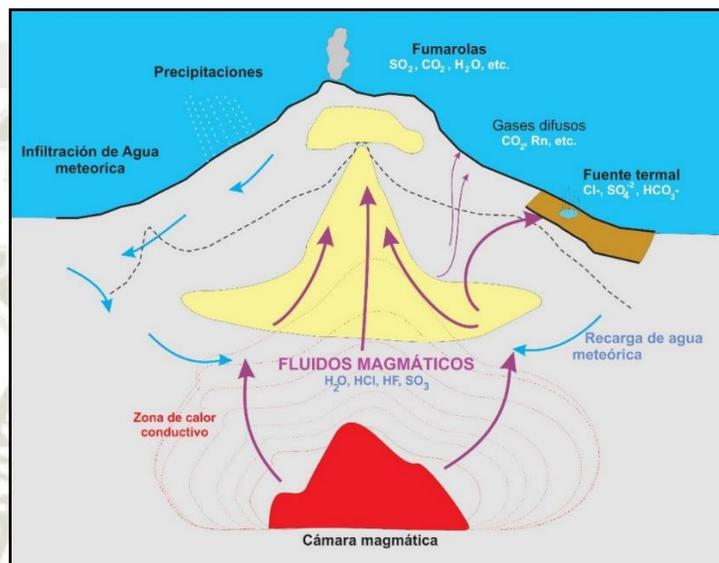


Figura 14. Modelo de un sistema hidrotermal y su interacción con los gases volcánicos (Modificado de Hochtsein & Broune, 2000).

1.8.1 EL DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)

El dióxido de azufre es uno de los gases más comúnmente liberados durante erupciones volcánicas (después de agua y dióxido carbónico), y es preocupante a escala global, debido a su potencial influencia en el clima. A escala global SO_2 es peligroso para los humanos en su forma gaseosa y también porque se oxida formando sulfato aerosol. Por procesos oxidativos y en presencia de humedad, puede dar lugar a la formación de ácido sulfúrico y originar la precipitación de lluvias ácidas. El dióxido de azufre (SO_2) es un gas incoloro con un olor irritante característico. Este olor es perceptible a diferentes niveles, dependiendo de la sensibilidad individual, pero generalmente se percibe entre 0.3-1.4 ppm y es fácilmente notable a 3 ppm (Baxter, 2000); (Wellburn, 1994).

La principal fuente antropogénica del SO_2 es la combustión de fósiles que contienen azufre usados para la calefacción doméstica, la generación de electricidad, los vehículos a motor, pero con más cantidad las erupciones volcánicas. El flujo de las partículas volcánicas de erupciones explosivas silíceas es proporcional a la magnitud de la erupción (Self, 2006); (Deligne et al., 2010).

Las erupciones volcánicas explosivas contribuyen aproximadamente con 60 wt% del flujo total de SO_2 volcánico, de las emisiones que alcanzan la atmósfera (Halmer et al., 2002).

Suponiendo que el gas tuviese media vida de 6 a 24 horas, entonces solo el 5% del gas emitido está presente en la atmósfera baja después de 1 a 4 días (Finlayson-Pitts and Pitts, 1986).

Durante una erupción volcánica se emiten a la atmósfera cantidades indeterminadas de gases y ceniza, que son impulsadas a grandes distancias por la onda de energía térmica (calor) y la presión confinada en el magma. Estos productos son depositados temporalmente en la estratósfera y tropósfera, mientras son dispersados por la acción del viento y la lluvia. (Guía de Preparativos de Salud Frente a Erupciones Volcánicas, OMS, OPS, 2005).

1.8.2 EFECTOS AMBIENTALES DE LOS GASES VOLCÁNICOS

En los lugares expuestos a la amenaza volcánica se debe prestar especial atención a los pronósticos de afectación de la población por alteración de la calidad del aire, con valores altamente tóxicos emitidos por el volcán (gas, ceniza y calor), que dependerán de su concentración, volumen y tiempo en el ambiente. Si las concentraciones en el aire en áreas habitadas exceden rápidamente los estándares de calidad del aire para el dióxido de sulfuro (SO_2) establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), las comunidades afectadas pueden necesitar informes sobre las medidas de protección respiratoria o sobre la conveniencia de la evacuación. (Guía de Preparativos de Salud Frente a Erupciones Volcánicas, OMS, OPS, 2005).

Según la Organización Panamericana de la Salud, 2005, se pueden considerar a los siguientes como los impactos con mayor incidencia sobre las zonas afectadas:

- La lluvia ácida.
- El efecto de invernadero.
- El vog (volcanic smog) o humo volcánico.
- El escudo solar.

El vapor de agua aumenta la humedad en la zona afectada y contribuye a la formación de la Lluvia ácida y del vog. El CO_2 es el principal gas de invernadero y ayuda a mantener la temperatura cálida del planeta. Las emisiones de HCl y HF se pueden disolver directamente en el agua contenida en las nubes o con el mismo vapor de agua suministrado, lo cual hace que se precipite en forma de lluvia ácida. (Guía de Preparativos de Salud Frente a Erupciones Volcánicas, OMS, OPS, 2005).

El SO_2 emitido se convierte lentamente en ácido sulfúrico (H_2SO_4), que se condensa en la atmósfera y se precipita en forma de lluvia con partículas muy finas. La concentración de estas partículas origina el llamado aerosol (Figura 15). Cuando éste se forma a partir del azufre se conoce como aerosol

de sulfato. Combinado con material particulado (polvo y ceniza), luz solar, oxígeno (O_2) y humedad reacciona recíprocamente formando el humo volcánico también conocido como vog (volcanic smog).

Longo et al., (2010), reportaron que el distrito de Ka'u en Hawaii está expuesto a azufre vog presente en el aire ambiente y derivado del incremento en la actividad del volcán Kilauea en 2008. Este hecho originó la evaluación de la calidad del aire intramuros en escuelas y hospitales, las cuales se encontraron por arriba del estándar de 24 h recomendado por la OMS de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), los gases volcánicos que imponen los peligros potenciales más importantes son el dióxido de azufre, el dióxido de carbono y el fluoruro de hidrógeno. A nivel local, el gas dióxido de carbono puede provocar lluvia ácida y contaminación del aire desde un volcán en la dirección del viento. Estos gases pueden provenir de caudales de lava y también de un volcán que entra en erupción violentamente.

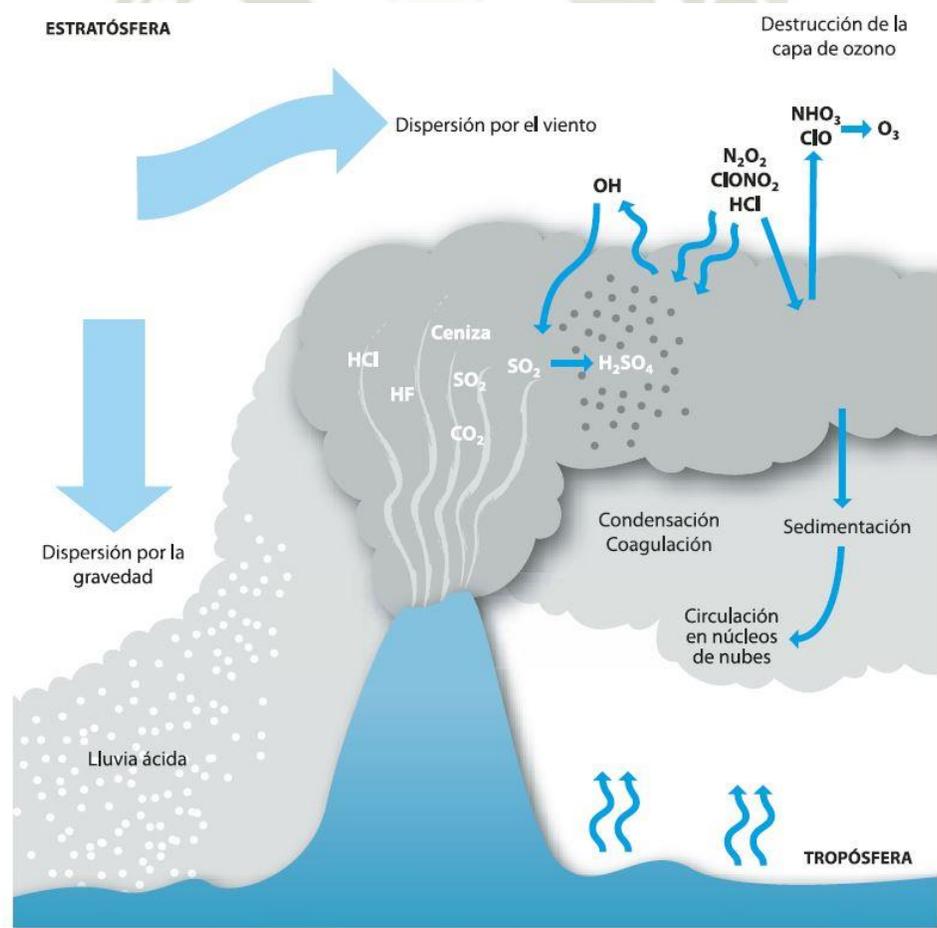


Figura 15. Alteración atmosférica por emisiones volcánicas. Tomado del informe especial: Volcanismo y cambio climático (Richard Turco, 1992).

1.8.3 EFECTO DE EXPOSICIÓN DE GASES VOLCÁNICOS EN LA SALUD

Desde el punto de vista de los efectos en la salud, los gases volcánicos pueden ser clasificados en irritantes y no irritantes.

Irritantes: pueden ejercer sus efectos a mucha menor concentración y a muchos kilómetros del volcán. Su acción irritante la efectúan a nivel del árbol respiratorio y sobre el resto de mucosas con las que entra en contacto, provocando de esta manera ojo rojo, lagrimeo, odinofagia, estornudos, etc. La afección del tracto aéreo depende del tiempo de exposición, de la concentración del gas en el aire y de la solubilidad acuosa. Así los gases poco solubles penetran con facilidad hasta los alvéolos, provocando tos, bronco espasmo, dolor torácico y fundamentalmente insuficiencia respiratoria por afectación del intercambio gaseoso, es decir, hipoxemia. La inhalación de bióxido de azufre (SO₂) provoca constricción del tracto respiratorio y aumenta las resistencias al flujo del aire, por lo que se observan cambios en los patrones normales de la función pulmonar. (Guía de Preparativos de Salud Frente a Erupciones Volcánicas, OMS, OPS, 2005).

No irritantes: la acumulación de los gases asfixiantes o no irritantes en concentraciones letales es más probable en las pendientes de un volcán, dentro de un cráter o cerca de una fisura. Actúan sin provocar lesiones a nivel local, se absorben hacia la sangre y ejercen su efecto a nivel sistémico, interfiriendo fundamentalmente la cadena respiratoria tisular. De esta manera provocan hipoxia tisular, por lo que se denominan gases asfixiantes. Los representantes más importantes de este grupo son los cianuros y el monóxido de carbono. (Guía de Preparativos de Salud Frente a Erupciones Volcánicas, OMS, OPS, 2005).

Tabla 6

Efectos sobre la salud por exposición respiratoria al dióxido de azufre (Baxter, 2000); (Nemery, 2001).

Límite de exposición (ppm)	Efectos sobre la salud
1-5	Umbral de respuesta respiratoria al ejercicio o respiración profunda en individuos sanos.
3-5	El gas es fácilmente detectable.
5	Aumento de la resistencia en individuos sanos.
6	Inmediata irritación en ojos nariz y garganta.
10	Empeora la irritación en ojos, nariz y garganta.
10-15	Umbral de toxicidad por exposición prolongada.
20+	Parálisis o muerte después de exposición prolongada.
150	Máxima concentración que puede ser resistida durante algunos minutos por individuos sanos.

1.9 NORMATIVIDAD DE LACALIDAD AMBIENTAL

1.9.1 POLÍTICA NACIONAL DEL AMBIENTE

Dentro de la gestión integral de la calidad ambiental del aire tenemos los siguientes lineamientos:

- a) Establecer medidas para prevenir y mitigar los efectos de los contaminantes del aire sobre la salud de las personas.
- b) Implementar sistemas de alerta y prevención de emergencias por contaminación del aire, privilegiando las zonas con mayor población expuesta a contaminantes críticos.
- c) Incentivar la modernización del parque automotor promoviendo instrumentos, uso de medios de transporte y combustibles que contribuyan a reducir los niveles de contaminación atmosférica.
- d) Identificar y modificar prácticas operativas y consuetudinarias inadecuadas que afectan la calidad del aire.

1.9.2 LEY GENERAL DEL AMBIENTE – LEY N° 28611 – TÍTULO I - CAPÍTULO 3

GESTIÓN AMBIENTAL - Artículo 31.- Del Estándar de Calidad Ambiental

a) El Estándar de Calidad Ambiental - ECA es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

b) El ECA es obligatorio en el diseño de las normas legales y las políticas públicas. Es un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

GESTIÓN AMBIENTAL - Artículo 33.- De la elaboración de ECA y LMP

a) La Autoridad Ambiental Nacional dirige el proceso de elaboración y revisión de ECA y LMP y, en coordinación con los sectores correspondientes, elabora o encarga, las propuestas de ECA y LMP, los que serán remitidos a la Presidencia del Consejo de Ministros para su aprobación mediante Decreto Supremo.

b) La Autoridad Ambiental Nacional, en el proceso de elaboración de los ECA, LMP y otros estándares o parámetros para el control y la protección ambiental, debe tomar en cuenta los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) o de las entidades de nivel internacional especializadas en cada uno de los temas ambientales.

1.9.3 LEY GENERAL DEL AMBIENTE – LEY N° 28611 – TÍTULO III - CAPÍTULO 3 CALIDAD AMBIENTAL - Artículo 113.- De la Calidad Ambiental

Toda persona natural o jurídica, pública o privada, tiene el deber de contribuir a prevenir, controlar y recuperar la calidad del ambiente y de sus componentes.

Son objetivos de la gestión ambiental en materia de calidad ambiental:

- a. Preservar, conservar, mejorar y restaurar, según corresponda, la calidad del aire, el agua y los suelos y demás componentes del ambiente, identificando y controlando los factores de riesgo que la afecten.
- b. Prevenir, controlar, restringir y evitar según sea el caso, actividades que generen efectos significativos, nocivos o peligrosos para el ambiente y sus componentes, en particular cuando ponen en riesgo la salud de las personas.
- g. Promover el desarrollo de la investigación científica y tecnológica, las actividades de transferencia de conocimientos y recursos, la difusión de experiencias exitosas y otros medios para el mejoramiento de la calidad ambiental.

CALIDAD AMBIENTAL - Artículo 118.- De la Protección de la calidad del aire

Las autoridades públicas, en el ejercicio de sus funciones y atribuciones, adoptan medidas para la prevención, vigilancia y control ambiental y epidemiológico, a fin de asegurar la conservación, mejoramiento y recuperación de la calidad del aire, según sea el caso, actuando prioritariamente en las zonas en las que se superen los niveles de alerta por la presencia de elementos contaminantes, debiendo aplicarse planes de contingencia para la prevención o mitigación de riesgos y daños sobre la salud y el ambiente.

DECRETO SUPREMO N Supremo N° 003-2017-MINAM: “Aprueban Estándares de Calidad Ambiental de Aire”.

1.9.4 GESTIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL

GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

La Política Nacional del Ambiente establece Lineamientos para la Calidad del Aire que orienta la gestión de la calidad del aire tanto del sector público como privado, debiendo establecer medidas para prevenir y mitigar los efectos de los contaminantes del aire en la salud de la población, sistemas de alerta

y prevención de emergencias por la contaminación del aire, con primacía de las zonas con mayor población expuesta a los contaminantes críticos; incentivando la modernización del parque automotor, los combustibles limpios, el transporte público sostenible; identificando y proponiendo la modificación de prácticas consuetudinarias inadecuadas que afectan la calidad del aire (MINAM, 2014, Informe de Calidad del Aire 2013-2014).

La evaluación de la Calidad del Aire a nivel nacional es muy importante para la adopción de toma de decisiones, y se debe relevar la tarea que cumplen las entidades como la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), entidad adscrita al MINAM, así como las Direcciones Regionales de Salud Ambiental (DIRESA) de las regiones como Arequipa, Cusco e Ilo, quienes vienen realizando esfuerzos para medir parámetros de preocupación constante en sus zonas, con las limitaciones propias de la ausencia de recursos económicos y humanos que son necesarios para la implementación de programas locales y nacionales de vigilancia de la calidad del aire (MINAM, 2014, Informe de Calidad del Aire 2013-2014).

El presente año, el MINAM realizó el Estudio de Morbilidad por efectos de la contaminación del aire en la salud de las personas que incluyó la valorización de los impactos en la salud por la presencia del material particulado (PM10) en el aire. Se utilizó el Air-Q, herramienta de software de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la evaluación del riesgo para la salud de la contaminación atmosférica.

1.9.5 INSTRUMENTOS DE GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

Estándares de la Calidad Ambiental para Aire – ECA Aire; Límites Máximos Permisibles – LMP; Otros instrumentos técnico económicos; sistemas de control de emisiones, tasas de emisión, impuestos a los combustibles más contaminantes. El ECA y el LMP son instrumentos de gestión ambiental que buscan regular y proteger la salud pública y la calidad ambiental en que vivimos.

- Hi Vol y Low Vol– Material Particulado
- Tren de muestreo – Gases - DOAS

1.10 LA CALIDAD DE AIRE

La calidad de aire es un indicador de la calidad de vida porque la exposición a los contaminantes tiene efectos adversos a la salud humana y al ambiente. A mayores niveles de contaminación, menor es la calidad del aire. Una buena calidad del aire contribuye a una mejor calidad de vida de la población; lo

cual se logra con el compromiso y la participación activa de todos los actores involucrados, Estado, empresa y población; siendo responsabilidad del Estado implementar las medidas necesarias para garantizar el cumplimiento de importantes instrumentos de gestión ambiental como Estándares de Calidad Ambiental (ECA), Límites Máximos Permisibles (LMP), Planes de Acción, entre otros. Por el contrario, la presencia de contaminantes por encima de los niveles establecidos en los ECA no solo significa una disminución de la calidad ambiental del aire, sino una disminución de la calidad de vida de la población, con efectos adversos para su salud, así como el deterioro paisajístico de la ciudad (MINAM, 2014, Informe de Calidad del Aire 2013-2014).

1.11 ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL

El Estándar de Calidad Ambiental – ECA, es la cantidad de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo como cuerpo receptor, que no representan riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente (Ley N° 28611 – MINAM). Normalmente se mide en unidades de masa sobre volumen, masa por masa o porcentaje. Los ECA sirven para comparar los niveles de concentración de sustancias o elementos químicos, físicos o biológicos presentes en un cuerpo determinado (agua, aire, suelo) sujeto a evaluación por alguna actividad determinada y así identificar si hay contaminación al encontrarse niveles mayores que el ECA durante un tiempo determinado. MINAM elabora los ECA en coordinación con la opinión del sector correspondiente y son aprobados por decreto supremo (Figura 16). La Autoridad Ambiental en coordinación con los sectores, dispone la aplicación de ECA internacionales en casos que no existan ECA aprobados en el país. Se aplica el principio de la gradualidad, en los ECA, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para la adecuación de las actividades en curso. Los ECA Aire desde la promulgación del Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM establecieron valores de tránsito y referenciales en tanto no se contaba con información suficiente para implementar a todos.

Parámetros	Periodo	Valor [µg/m ³]	Criterios de evaluación	Método de análisis ^[1]
Benceno (C ₆ H ₆)	Anual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO ₂)	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
	Anual	100	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM _{2,5})	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM ₁₀)	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	50	Media aritmética anual	
Mercurio Gaseoso Total (Hg) ^[2]	24 horas	2	No exceder	Espectrometría de absorción atómica de vapor frío (CVAAS) o Espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío (CVAFS) o Espectrometría de absorción atómica Zeeman. (Métodos automáticos)
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	
Ozono (O ₃)	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
Plomo (Pb) en PM ₁₀	Mensual	1,5	NE más de 4 veces al año	Método para PM ₁₀ (Espectrofotometría de absorción atómica)
	Anual	0,5	Media aritmética de los valores mensuales	
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)

NE: No Exceder.

^[1] o método equivalente aprobado.

^[2] El estándar de calidad ambiental para Mercurio Gaseoso Total entrará en vigencia al día siguiente de la publicación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, de conformidad con lo establecido en la Séptima Disposición Complementaria Final del presente Decreto Supremo.

Figura 16. Cuadro de estándares de Calidad Ambiental para Aire (Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM).

1.12 VALORES FIJADOS EN LAS DIRECTRICES DE LA OMS EN LA CALIDAD DE AIRE

Las guías de calidad del aire (GCA) de la OMS están destinadas a su uso en todo el mundo, pero se han elaborado para respaldar medidas orientadas a conseguir una calidad del aire que proteja la salud pública en distintas situaciones. Por otra parte, cada país establece normas de calidad del aire para proteger la salud pública de sus ciudadanos, por lo que son un componente importante de las políticas nacionales de gestión del riesgo y ambientales. Las normas nacionales varían en función del enfoque adoptado con el fin de equilibrar los riesgos para salud, la viabilidad tecnológica, los aspectos económicos y otros factores políticos y sociales de diversa índole, que a su vez dependerán, entre otras cosas, del nivel de desarrollo y la capacidad nacional en relación con la gestión de la calidad del aire. En

los valores guía recomendados por la OMS se tiene en cuenta esta heterogeneidad y se reconoce, en particular, que cuando los gobiernos fijan objetivos para sus políticas deben estudiar con cuidado las condiciones locales propias antes de adoptar las guías directamente como normas con validez jurídica (OMS, 2018).

1.12.1 MATERIAL PARTICULADO

Existe una estrecha relación cuantitativa entre la exposición a altas concentraciones de pequeñas partículas (PM10 y PM2,5) y el aumento de la mortalidad o morbilidad diaria y a largo plazo. A la inversa, cuando las concentraciones de partículas pequeñas y finas son reducidas, la mortalidad conexas también desciende, en el supuesto de que otros factores se mantengan sin cambios. La contaminación con partículas conlleva efectos sanitarios incluso en muy bajas concentraciones; de hecho, no se ha podido identificar ningún umbral por debajo del cual no se hayan observado daños para la salud (OMS, 2018).

ECA PARA MATERIAL PARTICULADO

MATERIAL PARTICULADO	Valor ECA	
	PM10: 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual)
	PM2,5: 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	
	Valor Guía OMS	
	PM10: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media 24 h)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media anual)
	PM2,5: 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media 24 h)	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media anual)

Figura 17. ECAS para material particulado según 2013-2014 OMS.

Además de los valores, las Directrices sobre la Calidad del Aire establecen metas intermedias para concentraciones de PM10 y PM2,5 destinadas a promover una reducción gradual, de concentraciones altas a otras más bajas. Si se alcanzaran esas metas intermedias se podrían esperar reducciones importantes de los riesgos de enfermedades agudas y crónicas derivadas de la contaminación del aire. No obstante, los valores establecidos en las Directrices deberían ser el objetivo final. En las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire se estima que una reducción media anual de las concentraciones de partículas (PM10) de 35 microgramos/ m^3 , común en muchas ciudades en desarrollo, a 10 microgramos/ m^3 , permitiría reducir el número de defunciones relacionadas con la contaminación en aproximadamente un 15%. Sin embargo, incluso en la Unión Europea, donde las concentraciones de

PM de muchas ciudades cumplen los niveles fijados en las Directrices, se estima que la exposición a partículas de origen antropogénico reduce la esperanza media de vida en 8,6 meses.

1.13 INDICE DE CALIDAD DEL AIRE - INCA

El Índice de Calidad del Aire (AQI, por sus siglas en inglés) es una herramienta usada por la EPA y otras agencias para proveerle al público información oportuna y fácil de comprender sobre la calidad de aire local. También indica si los niveles de polución son perjudiciales a la salud. El AQI informa al público si la condición del aire debe preocuparle por su salud.

Según la Organización Panamericana de la Salud (2005), se define como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud dentro de una región determinada. El seguimiento y monitoreo del índice de la calidad del aire se deben realizar de manera continua antes, durante y después de la erupción volcánica, mediante la ubicación de puntos estratégicos identificados para la región, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y meteorológicas.

El Ministerio del Ambiente evalúa la información sobre la calidad del aire a nivel nacional, remitida por todos los agentes generadores de dicha información, y para dar a conocer al público en general, la situación de la calidad del aire en el país requiere contar con un indicador que muestre dicha situación de manera sencilla y gráfica con números y colores. Es por ello que el MINAM ha elaborado el Índice de Calidad del Aire – INCA (adimensionales) para representar y calificar el estado de la calidad del aire tomando en cuenta los conceptos ya posicionados en la población como son los colores del semáforo y del espectro de luz como el arco iris (MINAM, 2014, Informe de Calidad del Aire 2013-2014).

1.14 RESPUESTA DE LA EPA ANTE ERUPCIONES VOLCÁNICAS

En su misión de proteger la salud de los seres humanos y el medioambiente, la EPA puede participar en el monitoreo de las condiciones ambientales, en la evaluación de posibles efectos adversos sobre la salud o en la respuesta en caso de emergencias por materiales peligrosos que pudieran surgir como resultado de una erupción.

Efectos adversos sobre la salud de los seres humanos: la EPA tiene considerable experiencia con respecto a los posibles efectos adversos sobre la salud a raíz de las cenizas o las sustancias químicas que liberan los volcanes. Puede ser necesario que toxicólogos y otros especialistas evalúen las condiciones ambientales y los efectos sobre las poblaciones que rodean a la montaña (EPA, 2021).

Respuesta ante emergencias: se podrá convocar a la EPA para que proporcione asistencia a las primeras personas o entidades que respondan a un evento de erupción. Por ejemplo: en otoño de 2004, se estableció un Comando unificado para el Monte Santa Helena, que estaba exhibiendo mayor actividad. El Comando estaba conformado por el Servicio Forestal de EE. UU. (la agencia principal), el Departamento de Topografía Geológica de EE. UU. y diversas autoridades estatales y locales. La EPA se sumó al Comando unificado en un rol de asesoramiento y asistencia, y se preparó para ofrecer su ayuda con mapeo y análisis GIS, monitoreo y modelado del aire y del agua y otros servicios con el fin de asistir en la respuesta general (EPA, 2021).

1.15 PLANES DE GESTIÓN DE CALIDAD DEL AIRE

A continuación, se presentan herramientas específicas para aplicar planes de acción.

- Medidas para prevenir y mitigar los efectos de los contaminantes del aire.
- Fortalecimiento de la gestión ambiental nacional, sectorial, regional y local.
- Fiscalización.
- Educación y Sensibilización.

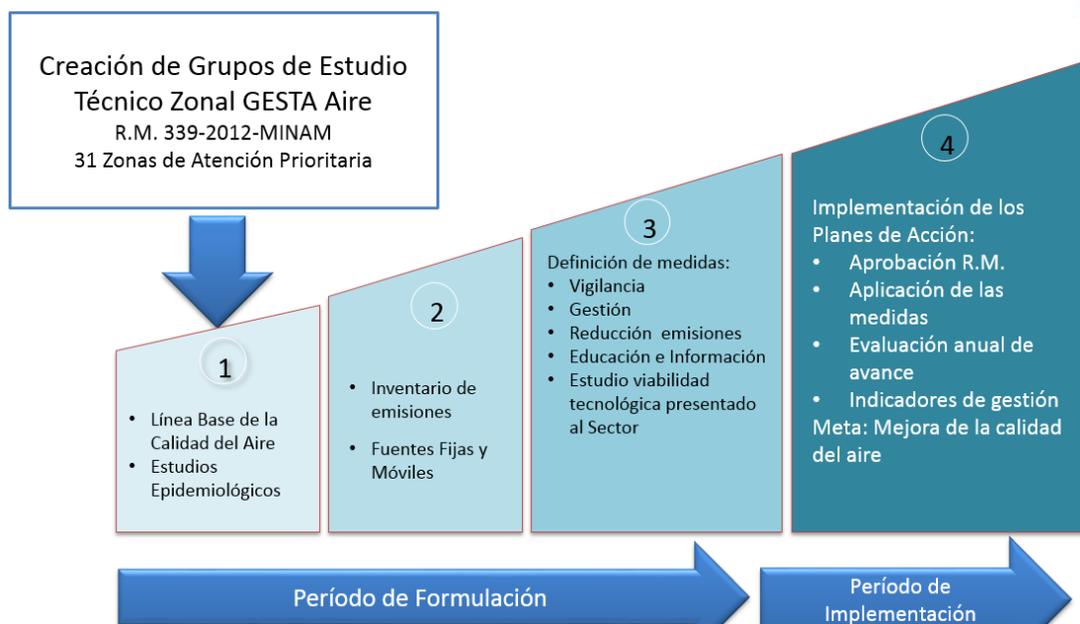


Figura 18. Plan de gestión de la calidad del aire establecido por el MINAM en el 2012.

1.15.1 ESTADOS DE ALERTA

1.15.1.1 ESTADOS DE CUIDADO

Estado en que el nivel de concentración del contaminante, puede comenzar a causar efectos en la salud de cualquier persona, especialmente en niños, ancianos, embarazadas, personas con enfermedades respiratorias (DS. N° 009-2003-SA).

1.15.1.2 ESTADO DE PELIGRO

Estado en que el nivel de concentración del contaminante, genera riesgo de causar efectos serios en la salud de cualquier persona (DS. N° 009-2003-SA).

1.15.1.3 ESTADO DE EMERGENCIA

Estado en que el nivel de concentración del contaminante, genera un alto riesgo de afectar seriamente la salud de toda la población. Con el Decreto Supremo N.° 009-2003-SA, modificado por el Decreto Supremo N.° 012-2005-SA se aprueba el Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para contaminantes del Aire, como material particulado PM10, dióxido de azufre, el monóxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno (Figura 19). En el artículo 7° de la norma se precisan las medidas a considerar en los planes de contingencias para cada una de los parámetros (DS. N° 009-2003-SA).

TIPOS DE ALERTA	Material Particulado (PM 10)	Dioxido de Azufre (SO2)	Monóxido de Carbono (CO)	Sulfuro de Hidrogeno (H2S)
Cuidado	> 250 ug/m3 promedio de 24 hrs.	>500 ug/m3 por 3 hrs.	> 15000 ug/m3 prom. de 8 hrs.	> 1500 ug/m3 para 24 hrs.
Peligro	> 350 ug/m3 promedio de 24 hrs.	> 1500 ug/m3 por 2 hrs.	> 20000 ug/m3 prom. de 8 hrs.	> 3000 ug/m3 para 24 hrs.
Emergencia	> 420 ug/m3 promedio de 24 hrs.	> 2500 ug/m3 por 90 minutos	> 35000ug/m3 prom. de 8 hrs.	> 5000 ug/m3 para 24 hrs.
Referencia	ECA Anual 50	ECA Anual 80	ECA 8 hrs. 10000	OMS 24 hrs. 150 ug/m3

Figura 19. Niveles de estado de alerta para contaminantes críticos establecidos por el MINAM (DS. N° 009-2003-SA).

CAPÍTULO II: 2 METODOLOGÍA

Se pretende relacionar la información geológica de las erupciones del volcán Huaynaputina y Sabancaya, con parámetros de monitoreo ambiental que determinen la afectación de la calidad del aire del medio ambiente circundante.

Se ha utilizado la técnica de análisis granulométrico sobre pómez y cenizas, realizado en el Laboratorio de Magmas y Volcanes en Francia, de tal manera que se pueda calcular el tamaño de grano y poder tener una idea de la afectación en la calidad del aire por parte de la erupción de 1600 d.C. del Huaynaputina.

Se ha realizado un monitoreo ambiental a efectos de medir la presencia y concentración de contaminantes en el ambiente, así como el estado de conservación de los recursos naturales, midiendo la calidad de aire en las zonas de Achoma y Maca, como consecuencia de las emisiones de cenizas por parte del volcán Sabancaya. Para ello se ha utilizado el Hivol y el Lowvol, permitiéndonos hallar la concentración de PM 10 y PM 2.5, de tal manera que se puedan comparar con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire D.S. N° 003-2017-MINAM, y que nos permita evaluar el grado de afectación de las cenizas del volcán en el aire. Posterior a ello se pretende realizar el cálculo del Índice de Calidad del Aire AQI con respecto al material particulado y poder proponer un plan de mitigación y remediación de riesgos ambientales por parte de una erupción volcánica.

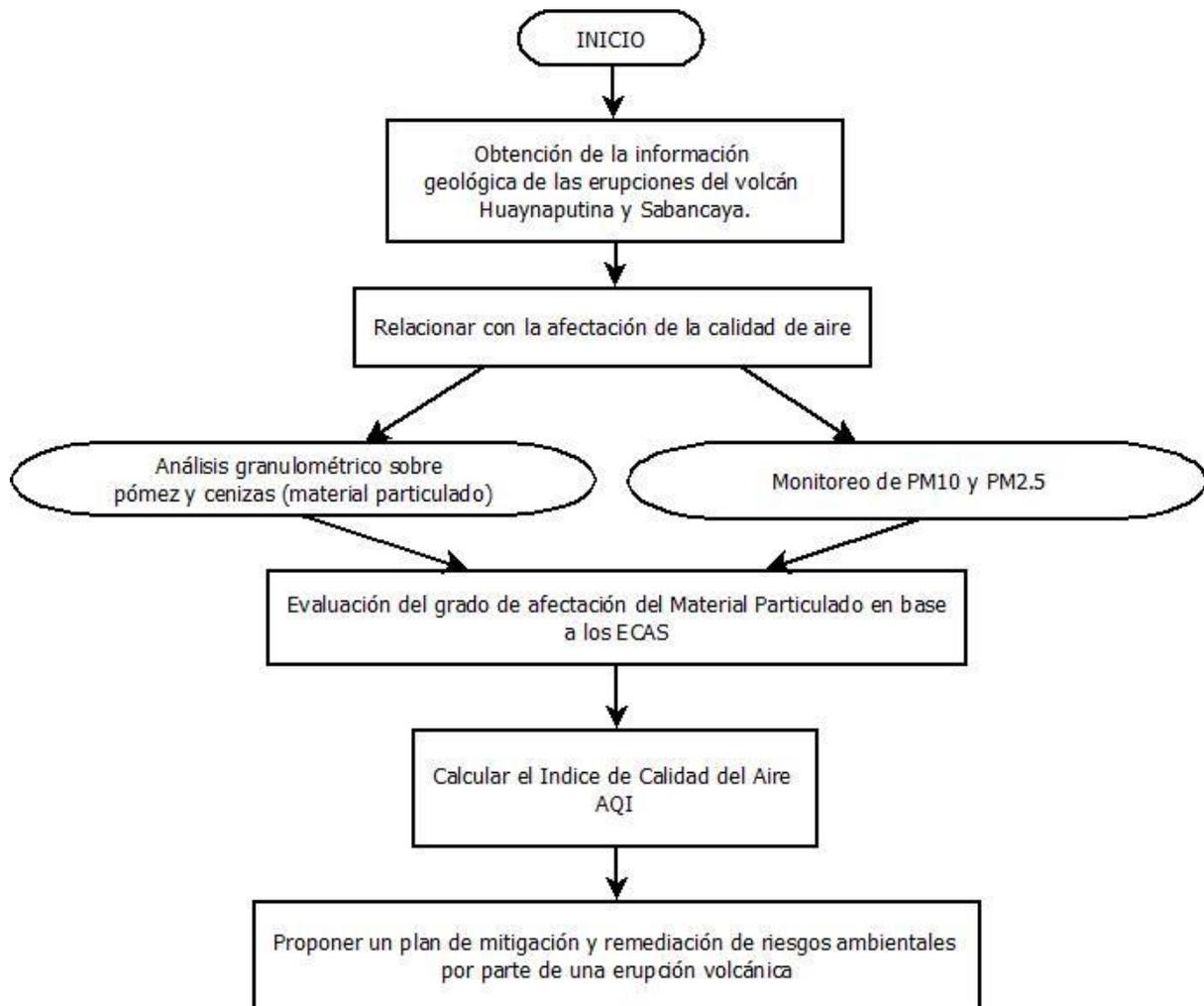


Figura 20. Diagrama de flujo para determinar la afectación de la calidad del aire de las erupciones del volcán Huaynaputina y Sabancaya.
Fuente: Elaboración Propia.

2.1 VOLCÁN HUAYNAPUTINA

2.1.1 MAPAS DE ISOPACAS

El mapa de isópacas consiste en líneas que unen puntos de igual espesor de un depósito. La medida del espesor máximo de un depósito de caída pliniana se utiliza para construir un mapa de isópacas, las cuales son indicadores significativos de: a) la superficie del depósito b) el eje mayor de dispersión y c)

el volumen del depósito. La construcción de un mapa de isópacas consiste en interpolar curvas de igual espesor del depósito, a veces sobre grandes áreas. Un mapa de un depósito de caída piroclástica histórica, generalmente muestra su distribución original modificada ya que entre puntos el depósito podría estar erosionado.

El mapa de isópacas se elaboró en base a 676 puntos de control (Figura 21). Parte de los datos fueron tomados entre el 2015 al 2017 donde se realizaron 26 calicatas ubicados en la zona proximal. Se adicionaron 650 puntos de control, obtenidas en campañas anteriores realizadas por el Dr. Jean-Claude Thouret ubicadas entre zona proximal a distal. (Dávila, 1998); (Thouret et al., 1999 - 2002).

Estos puntos de control son las medidas de espesores del depósito de caída pliniana. Estos datos fueron introducidos y trabajados en un sistema de información geográfica (ArcMap) donde se interpolaron en curvas de igual espesor. Luego los mismos fueron procesados y mostrados sobre un modelo de elevación digital (DEM). El programa calculó el área de cada isópaca y raíz cuadrada del área para después calcular el volumen.

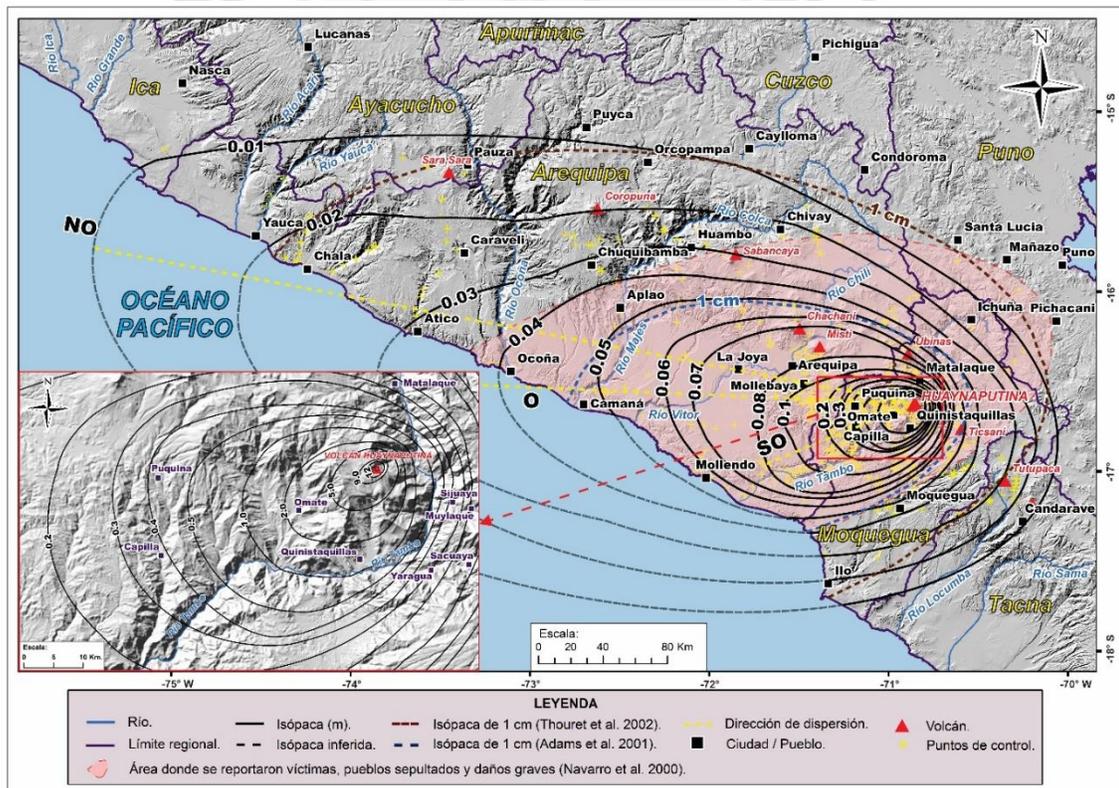


Figura 21. Mapa de isópacas del depósito de caída pliniana del volcán Huaynaputina, donde se muestra la variación del espesor (cm) con la distancia respecto al cráter, las isópacas que varían de 12 a 0.01 m de espesor (Modificado de Japura, 2018).

Desde junio hasta agosto del 2019 se han realizado medidas de espesores de caída de cenizas en el sector sureste del volcán Sabancaya determinando que entre 2 a 10 km, hay espesores de 2.2 a 1.0 mm, y a 13 km espesores de 0.3 mm. Así mismo, en el sector noroeste del volcán, se determinó que entre 5 y 9 km los espesores son de 1.0 a 0.4 mm respectivamente, y entre 10 y 18 km los espesores de caída de cenizas son menores a 0.1 mm (Valdivia, 2019).

Estos resultados han permitido elaborar un Mapa de Isópacas de la ceniza acumulada desde enero hasta el mes de agosto, el cual, indica que la dirección predominante de la dispersión y caída de ceniza es hacia el sureste (Figura 22).

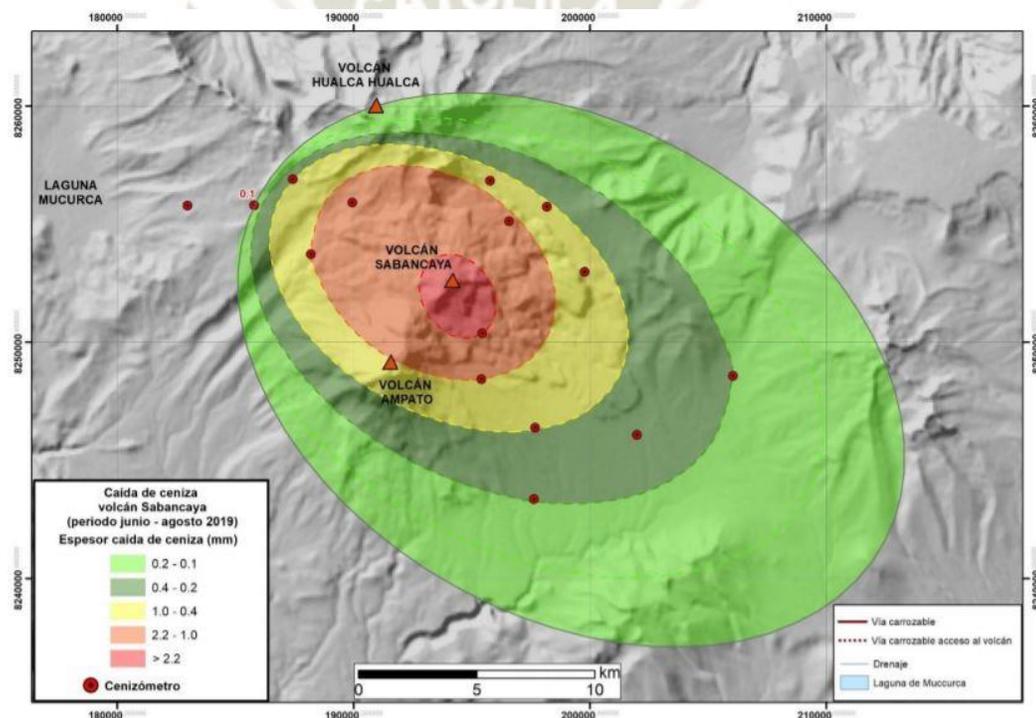


Figura 22. Mapa de isópacas para el periodo junio-agosto del 2019 del volcán Sabancaya (Valdivia, 2019).

2.1.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

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 piroclásticos no consolidados (Walker, 1971).

El análisis granulométrico de la pómez de la erupción de 1600 d.C. del volcán Huaynaputina se realizó a 38 muestras de pómez en 11 secciones, las cuales fueron muestreadas en las campañas del 2017-

2019 (Figura 25). Estas muestras fueron tamizadas hasta el tamaño de 2 mm en el Observatorio Vulcanológico de INGEMMET (Figura 23); en el Laboratorio de Magmas y Volcanes se procedió a realizar el tamizado desde 2 mm hasta 0.063 mm y la parte más fina debajo del tamiz 0.063 mm se llevó a cabo en el Laboratorio de Química de la Universidad de Clermont Auvergne-Francia (Figura 24).

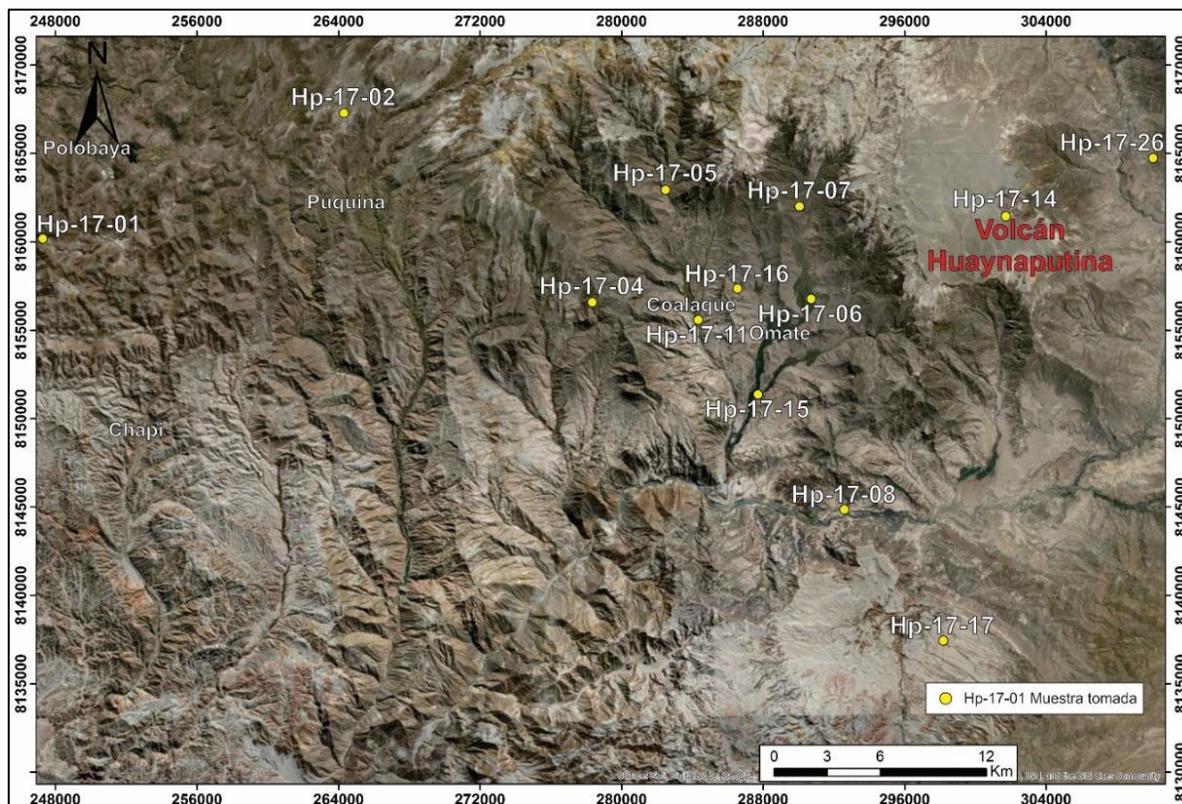


Figura 23. Mapa de ubicación de secciones de muestras para el análisis granulométrico del depósito de caída pliniana de la erupción de 1600 d.C.

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 en 1934 como el Logaritmo negativo de base 2 del tamaño de grano en milímetros:

Φ (Φ) = $-\log_2 N$, donde: N = tamaño de grano en mm ó la apertura de cada malla en mm.

El método utilizado para el análisis granulométrico, consiste en hacer pasar una muestra de caída piroclástica de 2 kg a través de una serie de mallas (tamices) con diferentes diámetros de apertura, que van desde -5ϕ (31.5 mm) hasta 5ϕ (0.032 mm). El tamizado se realizó de forma manual, con un zarandeo suave para evitar fracturas en las tefras. Las proporciones retenidas en cada malla (“refus”), son pesadas en una balanza de precisión 0.01 g y los resultados son anotados en una libreta. Luego del tamizado, los tamices son limpiados cuidadosamente con un limpiador ultrasónico modelo Advantage –

Lab, para evitar contaminaciones entre muestras. El análisis ha sido realizado en base a 17 muestras ubicadas en el sector proximal.



Figura 24. *Proceso de tamizado y cuarteo de la pómez y cenizas para posterior tratamiento granulométrico.*



Figura 25. *Laboratorio de tamizaje (en Laboratorio de Geotecnia del LMV), donde se desarrolló el análisis granulométrico de las pómez del volcán Huaynaputina. Se usaron una batería de tamices y el limpiador ultrasónico.*

Según Folk and Ward (1957), se realizó un análisis estadístico con el fin de estudiar el modo de emplazamiento y sus relaciones con el dinamismo eruptivo pliniano, a partir de las características sedimentológicas del depósito de caída. Los datos obtenidos son representados gráficamente en histogramas para visualizar de una manera simple la distribución granulométrica. En el eje Y van los diámetros de las partículas que están expresadas en unidades (Φ), mientras en que el eje X van los pesos en cada fracción retenida expresadas en porcentaje (%). Las partículas más grandes corresponden a valores negativos de Φ y estas se representan a la izquierda del diagrama. Para graficar los histogramas se utilizó el software SFT Kware (K. Wohletz, 1989).

2.2 VOLCÁN SABANCAYA

Se presenta a continuación un mapa de ubicación del Sabancaya donde se muestra todas las redes de monitoreo del Observatorio Vulcanológico de INGEMMET que controla el comportamiento del macizo volcánico ahora en erupción.

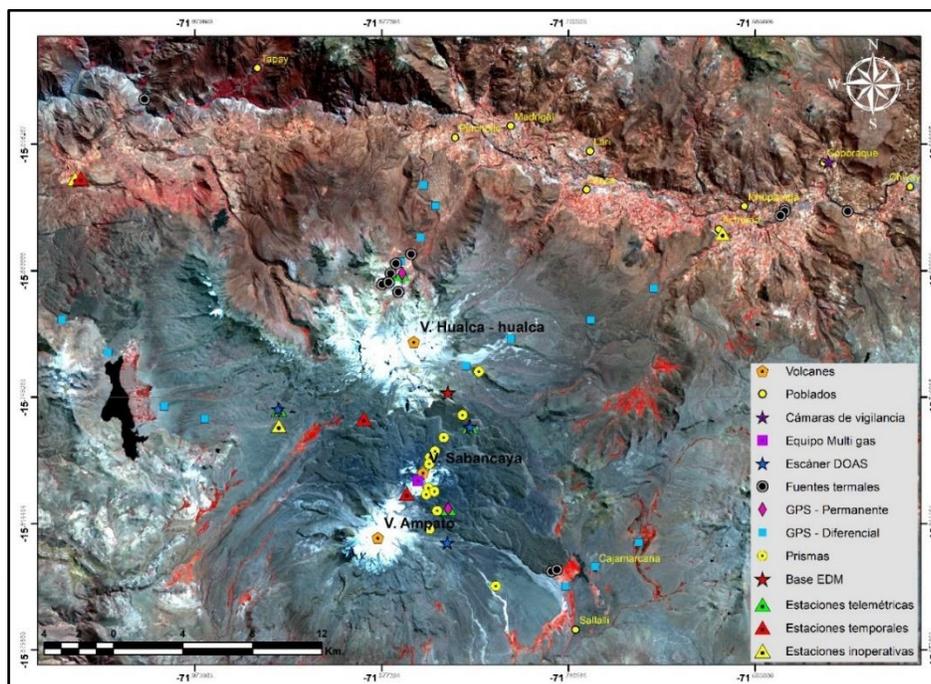


Figura 26. Red de estaciones de monitoreo de la actividad del volcán Sabancaya.

2.2.1 MONITOREO DE GASES VOLCÁNICOS

El monitoreo volcánico mediante el método geoquímico, consiste en la medición sistemática de los parámetros físico-químicos de los gases volcánicos emitidos por el volcán Sabancaya y el análisis de las fuentes termales asociadas a dicho volcán, las cuales, están generalmente ligadas a un sistema hidrotermal activo (Hochtein & Broune, 2000).

Desde el año 2009 el INGEMMET viene realizando el monitoreo geoquímico periódico del volcán Sabancaya, empleando diferentes técnicas para el monitoreo de fuentes termales y fumarolas. El monitoreo geoquímico del volcán Sabancaya durante el 2016-2019, se realizó con las medidas del flujo de SO_2 en las plumas volcánicas, para ello se empleó una red de escáner DOAS y móvil DOAS.

Este monitoreo se realizó aplicando 2 métodos: (1) la red NOVAC de escáner DOAS y (2) móvil DOAS y se describen a continuación:

1. Red NOVAC de escáner DOAS: esta red está conformada por 3 escáneres instalados alrededor del cráter del Sabancaya: SAD1 a 4 km al SE del cráter activo; SAD3 a 3.5 km al NE del cráter activo y SAD5.1 a 9 km al NO del cráter activo. Estos equipos escanean el cielo buscando las plumas volcánicas que pasan encima de ellas, midiendo el SO_2 , información que es transmitida a INGEMMET para su procesamiento.

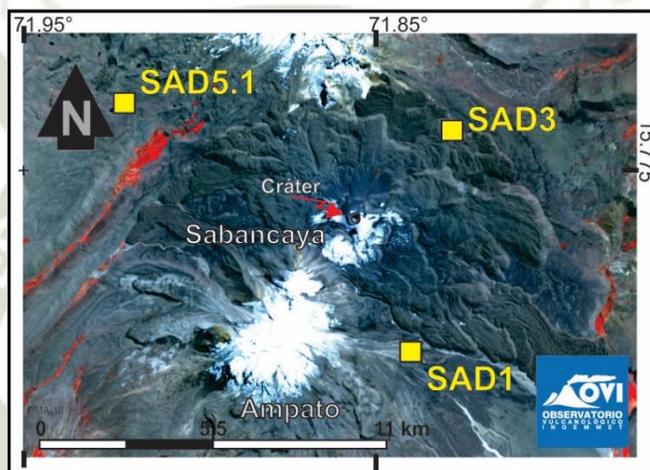


Figura 27. Red de sistemas escáner DOAS para el monitoreo de gas de azufre SO_2 en la pluma volcánica del Sabancaya. Equipos donados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos a través de VDAP.

2. Móvil DOAS: Este equipo es utilizado en el Sabancaya desde 2013, las mediciones se realizan pasando por debajo de la pluma volcánica, por lo general, en un vehículo. Durante el 2018 se realizó una campaña exitosa y esto se debió a que el viento cambió rápidamente de dirección y la pluma no siempre se encontró en la zona que se programó trabajar.

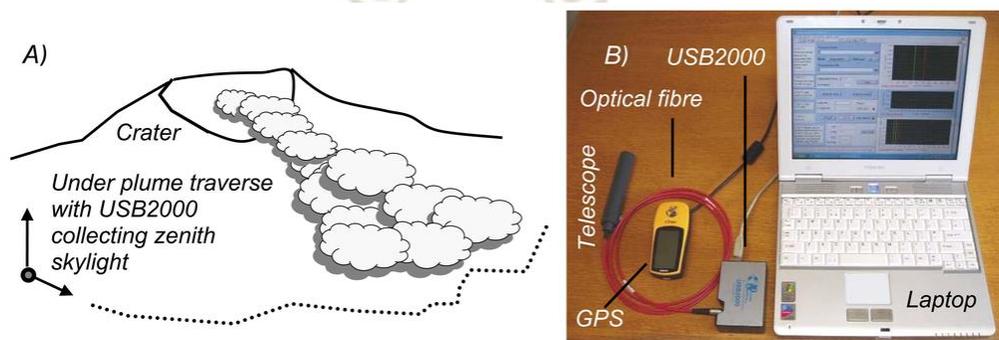


Figura 28. Equipo móvil DOAS, usado para cuantificar la tasa de SO_2 emitida por una erupción volcánica.

2.2.1.1 MONITOREO DE FLUJO DE DIÓXIDO DE AZUFRE

La técnica emplea la radiación UV dentro de un rango establecido para el SO_2 que mide la absorción de esta sustancia y calcula la cantidad de este gas presente en la pluma volcánica, utiliza como principio la ley de Lambert Beer. Esta ley menciona la absorbancia de una muestra a determinada longitud de onda depende de la cantidad de especie absorbente con la que se encuentra la luz al pasar por la muestra.

Desde abril del 2013, el OVI realiza mediciones del gas magmático SO_2 empleando una técnica basada en espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS, Differential Optical Absortion Spectroscopy), que trabaja principalmente en las regiones UV/ visible del espectro electromagnético y que funciona mediante la medición de la intensidad de luz radiante del sol, midiendo la diferencia de la luz fuera de la pluma volcánica de gas y luego en la pluma o fumarola volcánica donde se encuentra el SO_2 que cubre el espectro de 280 a 420 nm con una resolución de 0.6 nm. Este equipo escáner DOAS está compuesto por un mini-espectrómetro tipo USB2000, un escáner, un GPS, un panel solar, baterías y radio, conectados a un computador. El software de adquisición y procesamiento de datos usado fue el NOVAC Program Versión 2011, Suecia. El flujo de SO_2 se expresa en toneladas por día (Tn/d).

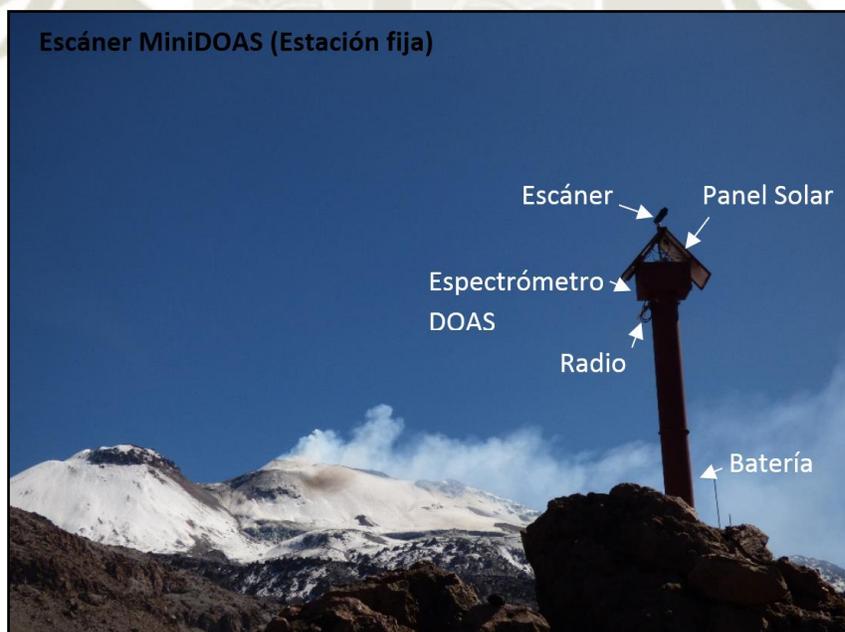


Figura 29. Partes del sistema DOAS para el monitoreo de gas de azufre SO_2 en la pluma volcánica.

2.2.2 MONITOREO VISUAL Y DISPERSIÓN DE CENIZA

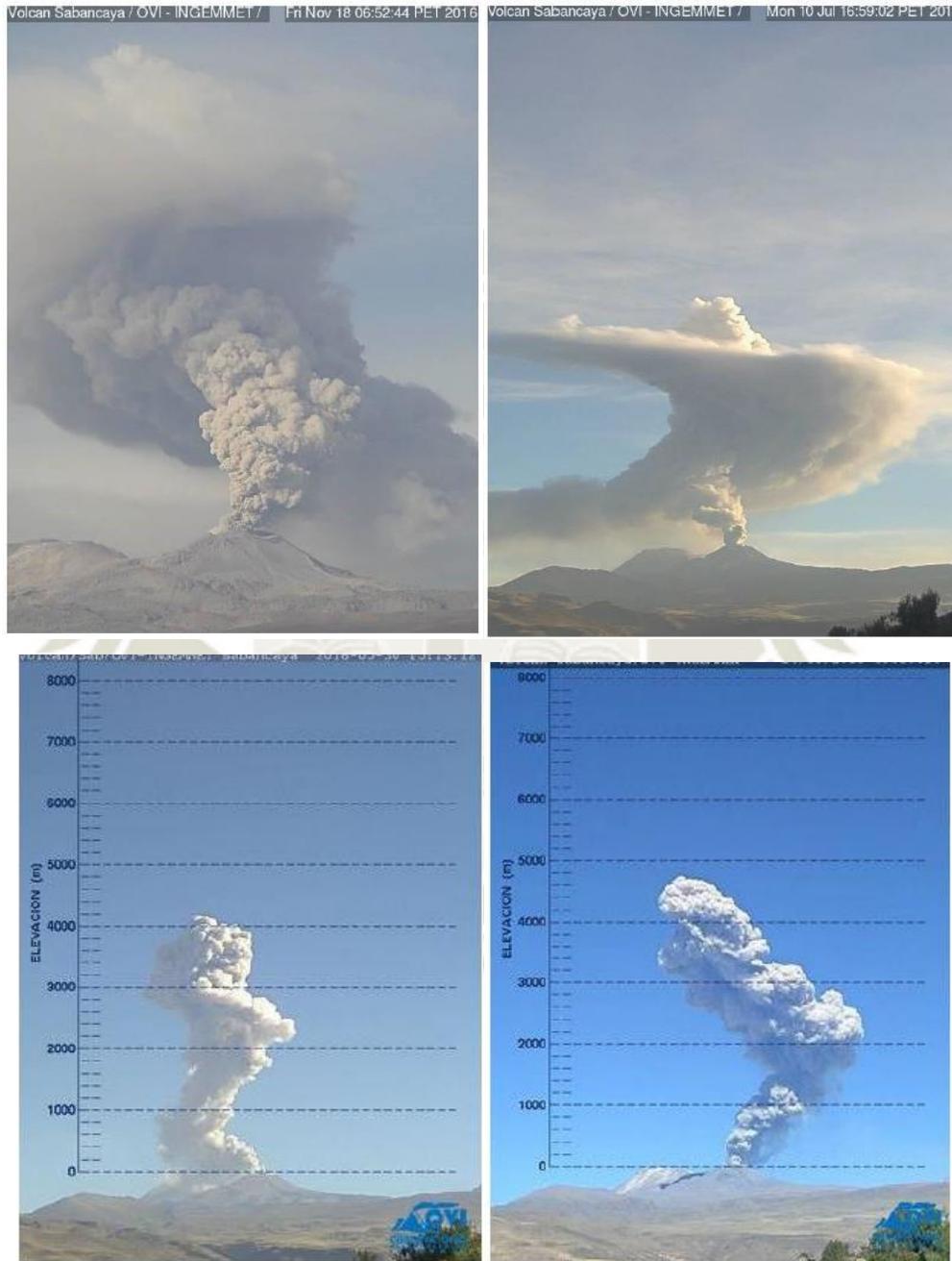


Figura 30. Alturas de columnas eruptivas en Noviembre del 2016, Agosto del 2017, Mayo 2018, Agosto 2019. (Informe especial A6969 – Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, 2019).

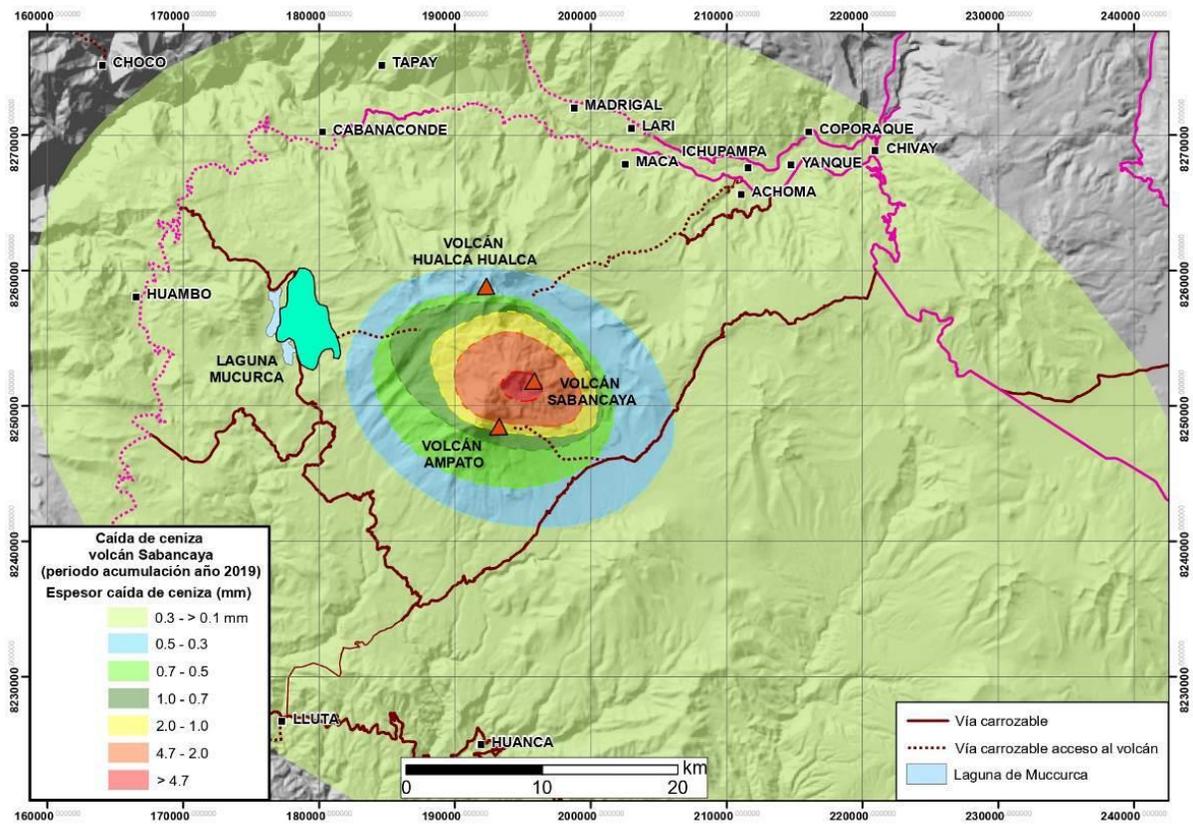


Figura 31. Mapa de isópacas de la caída de ceniza producidas por el volcán Sabancaya durante el 2019; las elipses representan los espesores del depósito de cenizas medidos en los cenizómetros. (Informe especial A6969 – Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, 2019).

2.2.3 MONITOREO Y ANÁLISIS DE LA CENIZA

Debido a la actividad actual del Sabancaya, el OVI implementó el monitoreo de cenizas, con la finalidad de estimar la cantidad de cenizas que vienen cayendo en áreas aledañas al volcán, así como realizar análisis mineralógicos, granulométricos, petrográficos y geoquímicos con el fin de hacer el seguimiento del proceso eruptivo.

Según Bernard (2013), el OVI también ha implementado una red de cenizómetros, dispositivos que se utilizan para medir espesores, densidad de área y densidad total de cenizas (< 20 mm). El propósito principal de este dispositivo es coleccionar caídas de pequeños volúmenes y de nubes distales de la erupción. Para realizar la red de instalación de cenizómetros, el OVI ha elaborado estos dispositivos, utilizando

materiales de bajo costo. La instalación de los cenizómetros debe realizarse en áreas abiertas sin árboles para evitar los efectos de la sombra o de acumulación secundaria, de forma vertical y fijado a una valla o poste. Con el objetivo de obtener un muestreo sistemático, se estableció la instalación de una serie de colectores de cenizas alrededor del volcán. Para realizar las mediciones de espesores en los cenizómetros se han capacitado a pobladores y profesionales del área de salud para enviar la información al OVI.



Figura 32. *Instalación de cenizómetros en el sector de Collpa, suroeste del volcán Sabancaya, 2017.*

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) tiene una red de monitoreo y muestreo de ceniza con cenizómetros ubicados en los alrededores del volcán Sabancaya. La instalación de los cenizómetros debe se realizó en 2 sectores puntuales del área circundante del volcán Sabancaya: sector medial-distal por los pueblos del valle del Colca y sector proximal a 4 y 6 km del macizo. Actualmente se cuenta con 32 cenizómetros instalados, los cuales nos brindan información acerca de los espesores de ceniza acumulada por semana emitida por el volcán. La implementación y construcción de los cenizómetros se realizó en conjunto con el COER – Gobierno Regional – Arequipa.

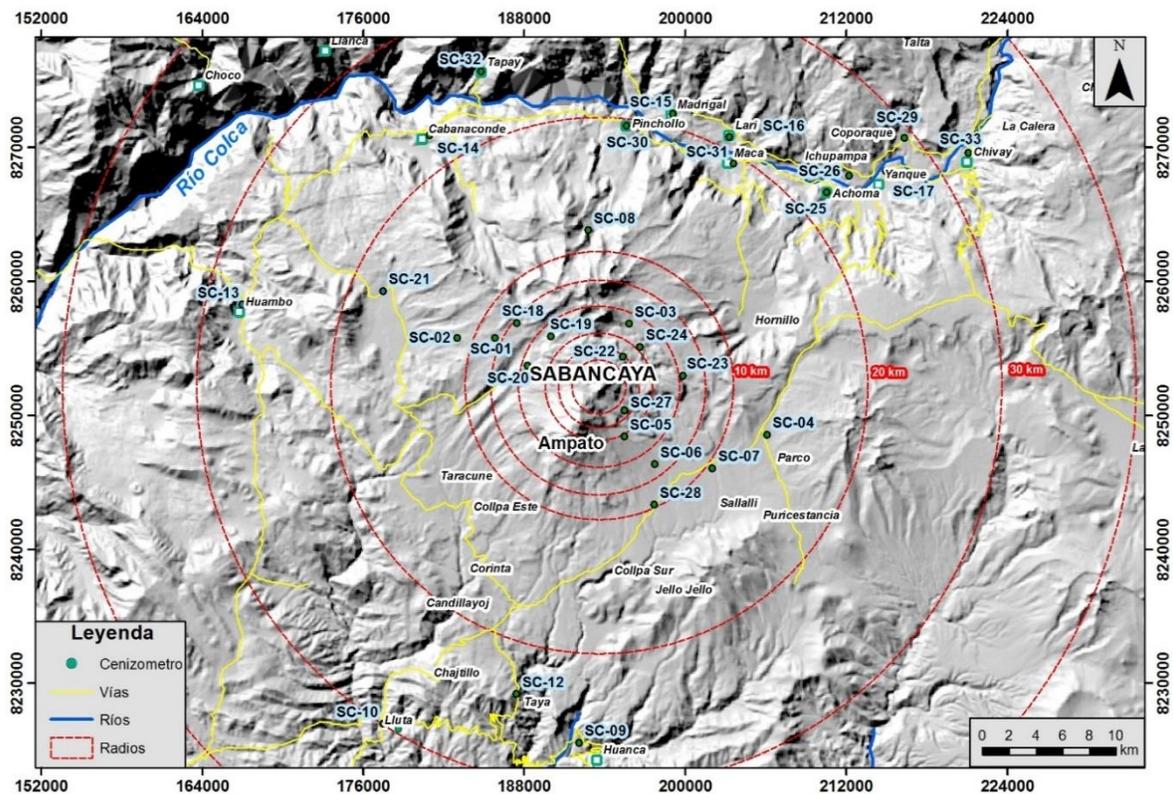


Figura 33. Mapa de ubicación actual de los cenizómetros en los alrededores del volcán Sabancaya, ubicados en sectores proximales, mediales y distales del macizo volcánico. Actualización hasta el 2018.

2.2.4 MINERALOGÍA Y GRANULOMETRÍA GENERAL DE LA CENIZA

El tamaño de los componentes de la ceniza alcanza hasta $600\ \mu\text{m}$. Durante este periodo se observa que el porcentaje de los fragmentos finos ($32\ \mu\text{m}$) es mayor que los componentes gruesos ($250 - 500\ \mu\text{m}$). Mientras que las cenizas emitidas desde febrero del 2017 contienen principalmente líticos juveniles, vidrio, cristales de plagioclasa, biotitas, olivinos, piroxenos y una pequeña cantidad de partículas oxidadas e hidrotermalizadas. En este periodo se observa un incremento de tamaño de los componentes que alcanzan a medir hasta $1\ \text{mm}$. También se observó una variación con respecto al tamaño de grano. En efecto, durante los meses de junio y julio el porcentaje de componentes gruesos ($250 - 500\ \mu\text{m}$) fue superior al porcentaje de componentes finos ($32\ \mu\text{m}$). En este periodo, la ceniza caída en los pueblos de Maca y Huanca fueron mucho más finas (Figura 34), con tamaños inferiores a $500\ \mu\text{m}$. Aquí predominaron cristales de plagioclasa, líticos juveniles y vidrio.

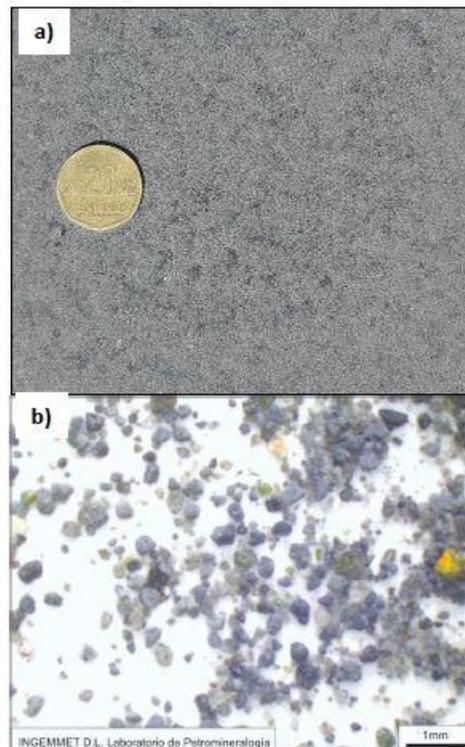


Figura 34. a) Ceniza fina acumulada en el techo del centro de salud de Huanca. B) Ceniza correspondiente al periodo inicial (diciembre 2016).

2.2.5 MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE PM10 Y PM2.5

Para el estudio de la calidad del aire en la zona de Chivay, a consecuencia de las emisiones de ceniza emitidas por el volcán Sabancaya, se ha realizado un monitoreo en coordinación con Bioterra Consultores Asociados S.A.C. Se realizó las medidas de PM10 y PM2.5, con el propósito de comparar los resultados obtenidos con los ECAS vigentes en el Perú.

2.2.5.1 DATOS GENERALES

Se han establecido 2 puntos de muestreo AIR-01 y AIR-02 en el distrito de Achoma y Maca respectivamente, ubicados en la Provincia de Caylloma, Región de Arequipa. Estos puntos están ubicados a 22 y 18 km al Noreste del volcán Sabancaya, respectivamente.

2.2.5.2 ESTACIÓN METEREOLÓGICA

La metodología utilizada obedece a los Procedimientos y Recomendaciones de la OMS “Guide to Meteorological Instrument and Observing Practice”. Se utilizó dos estaciones meteorológicas cuyas características son las siguientes:

- ✓ Marca: Davis Instruments
- ✓ Modelo: Vantage Vue
- ✓ Componentes: Temperatura Ambiente; Presión Barométrica.
- ✓ Marca: Davis Instruments
- ✓ Modelo: Vantage Pro 2
- ✓ Componentes: Temperatura Ambiente; Presión Barométrica.

En las estaciones meteorológicas la TEMPERATURA AMBIENTAL promedio fue de 10,31 °C y 10,73 °C, la PRECIPITACIÓN promedio de 0,22 mm y 0.075 mm, la HUMEDAD RELATIVA promedio de 64,6 % y 62,25 %; mientras que la PRESIÓN ATMOSFÉRICA de 508,45 mmHg y 518,49 mmHg. En la estación meteorológica y según la escala de Beaufort, la VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO se encuentra en el rango de Ventolina (1,43 m/s y 1,35 m/s), brisa moderada. La rosa de viento indica la predominancia de la dirección del viento, donde los círculos concéntricos representan el incremento de la frecuencia. El viento viene en predominancia del SUR-SUR-OESTE hacia el NOR-NOR-ESTE. (Ver Anexos).

2.2.5.3 MATERIAL PARTICULADO MENOR A 10 MICRAS

El monitoreo de calidad de aire considera la evaluación de dos (02) estaciones de monitoreo, cuya ubicación y características son las siguientes:

Tabla 7
Coordenadas de los puntos de monitoreo de Aire.

Estación	Descripción	Coordenadas UTM Datum WGS 84		Altitud (msnm)
		Norte	Este	
AIR-01	Techo de la municipalidad de Achoma	8 266691	210510	3450
AIR-02	Techo de la municipalidad de Maca	8268799	203172	3262

Los parámetros medidos en el monitoreo de calidad ambiental del aire fueron:

- ✓ Determinación de Peso: PM-10 Alto Volumen
- ✓ Determinación de Peso: PM-2.5 Bajo Volumen

METODOLOGÍA DE MUESTREO MATERIAL PARTICULADO PM10 Y PM2.5

Para la medición de las concentraciones de material particulado en suspensión, se pueden emplear equipos para la medición de partículas respirables o medidores de alto volumen PM10 y de bajo volumen PM 2.5. Estos equipos miden exclusivamente todo el material respirable establecido con tamaño de partícula menor que PM10 μ o PM 2.5 μ ; las partículas respirables, son aquellas que logran pasar el tracto respiratorio penetrando en los alvéolos pulmonares (Saldarriaga, Echeverri & Molina, 2004). Estos equipos arrastran aire ambiente a una velocidad de flujo constante hacia una entrada de forma especial, donde el material particulado se separa por inercia en una o más fracciones, dentro del intervalo de tamaño de PM10 o PM 2.5. Cada fracción dentro del intervalo de tamaño de PM10 o PM 2.5 se recolecta en un filtro separado en un periodo de muestreo específico. Cada filtro se pesa (después de equilibrar la humedad), antes y después de usarlo, para determinar el peso neto (masa) ganado debido al PM10 o PM 2.5 colectado. El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones de referencia (25°C; 101,3 kPa), se determina a partir de la velocidad de flujo medida y el tiempo de muestreo. La concentración de las partículas suspendidas se calcula determinando el peso de la masa recolectada y el volumen de aire muestreado. Las unidades de Partículas Menores a 10 micras se expresan en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Huanca, 2016).

METODOLOGÍA DE ENSAYOS

Tabla 8

Metodología de ensayo para los parámetros. Fuente: Ensayo de laboratorio acreditado "CERPER S.A."

Ensayo	Métodos	Unidades
Determinación de Peso: PM-10 Alto Volumen	CERPER LE-ME-MP. 2015. Determinación de Peso de Material particulado y Peso de Filtros (método validado)	$\mu\text{g}/\text{filtro}$
Determinación de Peso PM-2.5 Bajo Volumen	CERPER LE-ME-MP. 2015. Determinación de Peso de Material particulado y Peso de Filtros (método validado)	$\mu\text{g}/\text{filtro}$

EQUIPOS DE MEDICIÓN

Tabla 9

Equipos utilizados para monitoreo. Elaborado por: Bioterra Consultores Asociados S.A.C.

Parámetros	Equipo	Serie/Código	Fecha de calibración
PM ₁₀	Hi Vol	EL/MPA/01	2020-01-20
	Manómetro	EL/MA/04	2019-12-07
PM _{2.5}	Low Vol	EL/MPB/06	2020-08-17
PM ₁₀	Hi Vol	EL/MPA/09	2019-12-03
	Manómetro	EL/MA/04	2019-12-07
PM _{2.5}	Low Vol	EL/MPB/07	2020-08-17



Figura 35. *Muestreador de alto volumen para partículas en suspensión menores a 10 micras (Hi Vol – PM 10).*



Figura 36. *Instalación del muestreador de alto volumen para PM10 en la Municipalidad de Achoma.*



Figura 37. *Instalación del muestreador de alto volumen para PM10 en la Municipalidad de Maca.*

ESTÁNDARES DE COMPARACIÓN

Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. - Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.

Tabla 10
Estándares de Calidad Ambiental para Aire.

Parámetros	Período	Valor	Criterios de evaluación	Método de Análisis
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM _{2.5})	24 horas	50 µg/m ³	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimétrico)
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM ₁₀)	24 horas	100 µg/m ³	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimétrico)

Fuente: D.S. N° 003-2017-MINAM "Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias"

2.2.6 INDICE DE CALIDAD DE AIRE

Considerando los Estándares de Calidad Ambiental del Aire (ECA) vigentes y los Niveles de Estado de Alerta, el INCA se divide en 4 categorías (MINAM, 2014, Informe de Calidad del Aire 2013-2014).

La banda de color verde significa que la calidad del aire es buena, la banda de color amarillo indica una calidad moderada del aire, la banda de color anaranjado indica que la calidad del aire es mala, finalmente el color rojo de la cuarta banda indica que la calidad del aire se encuentra en el umbral de cuidado, el cual corresponde a la aplicación de los estados de alerta por parte de la autoridad de Salud. Cada categoría corresponde a los diferentes niveles de cuidado que se deben tener en cuenta para la protección de la salud (RM. 181-2016-MINAM). A continuación, se describen los cuidados y las recomendaciones para cada una de ellas:

Tabla 11

Valores INCA en base a los ECAS, según MINAM 2017.

Material particulado (PM10) promedio 24 horas		
Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecuación
0-50	0-75	$I(\text{PM}_{10}) = [\text{PM}_{10}] * 100/150$
51-100	76-150	
101-167	151-250	
> 167	> 250	

Material particulado (PM2,5) promedio 24 horas		
Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecuación
0-50	0 -12,5	$I(\text{PM}_{2,5}) = [\text{PM}_{2,5}] * 100/25$
51-100	12,6-25	
101-500	25,1-125	
> 500	>1 25	

Tabla 12

Cuidados y recomendaciones según categoría de Calidad del Aire, según MINAM 2017.

CATEGORÍA	CUIDADOS	RECOMENDACIONES
Buena	La calidad del aire es satisfactoria y no representa un riesgo para la salud.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de Aire. Puede realizar actividades al aire libre.
Moderada	La población sensible (niños, tercera edad, madres gestantes, personas con enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares) podría experimentar algunos problemas de salud.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de Aire. Puede realizar actividades al aire libre con ciertas restricciones para la población sensible.
Mala	La población sensible podría experimentar problemas de salud. La población en general podría sentirse afectada.	Mantenerse atento a los informes de calidad del aire. Evitar realizar ejercicio y actividades al aire libre.
Umbral de cuidado	Toda la población puede verse afectada gravemente en la salud.	Implementar estados de alerta.

Los valores del INCA fueron calculados tomando como referencia los ECA y como rango final, el valor umbral de aplicación de los estados de alerta, por lo que estos varían dependiendo del contaminante evaluado.

CAPÍTULO III

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La mayor erupción registrada en época histórica en los Andes la produjo el volcán Huaynaputina (1600), ubicado en la región de Moquegua. Se ha realizado un estudio de la granulometría de 33 muestras de pómez y ceniza, estudios realizados en el Laboratorio de Magmas y Volcanes de Francia, obteniendo mayormente tamaños entre 5.6, 4 y 2.8 mm. Cabe resaltar que también se pudo medir el acumulado de cenizas finas por debajo de 65 μm . El nivel de afectación de ceniza de dicha erupción fue muy grande, ya que a pesar de que hubo fragmentos centimétricos que cayeron, la ceniza fina quedó suspendida en el aire por varias semanas, provocando enfermedades y problemas crónicos de Salud. Actualmente el mencionado volcán se encuentra en estado de inactividad, con algunas emanaciones fumarólicas de poca importancia, pero no se descarta que pueda reactivarse, por ello el Observatorio Vulcanológico de INGEMMET lo monitorea constantemente. Este tipo de erupciones muy explosivas afectan considerablemente la calidad del aire.

El volcán Sabancaya actualmente se encuentra en un periodo eruptivo desde el 2016 emitiendo cenizas a la atmósfera constantemente, que van dirigidas a los sectores sur este y noreste del macizo volcánico, donde se encuentran los poblados de Chivay, Achoma, Maca, Cabanaconde, pertenecientes al valle del Colca en la región de Arequipa. Los materiales que emite constantemente el volcán Sabancaya son cenizas y gases volcánicos.

La ceniza arrojada dentro de la atmósfera puede causar enfermedades en poblaciones humanas a través de la caída de partículas provenientes de las columnas eruptivas. Se ha empleado la técnica de granulometría para poder hallar el tamaño de la ceniza que cae alrededor del volcán Sabancaya. El contenido de ceniza no es abundante, pero sí es perjudicial para los principales cultivos de la zona. Para poder evaluar la afectación de la calidad del aire en los pueblos del valle del Colca, por parte de la erupción del volcán, se ha realizado un monitoreo ambiental PM 10 y PM 2.5; 13.40 y 15.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM 10; 8.92 y 2.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las estaciones de Achoma AIR-01 y Maca AIR-02 respectivamente. Los valores vigentes de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de Aire para material particulado PM 10 son 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor promedio de 24 horas; mientras que el Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) es de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que es el mismo valor promedio anual del ECA nacional. Para el material particulado PM 2.5 el valor es 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) es de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En base a estos resultados se puede apreciar que los valores obtenidos no superan los valores establecidos por el Estándar Nacional de la Calidad Ambiental de Aire según el D.S. N° 003-2017-MINAM., no considerando un riesgo significativo para la calidad de aire y de la salud

de las personas. Se debe considerar que las concentraciones de material particulado en los puntos de monitoreo se vieron influenciados por ráfagas de viento y precipitaciones bajas de 2 a 4 horas.

Se ha calculado los valores INCA con respecto a los cálculos obtenidos del PM10 y PM2.5 de las cenizas del volcán Sabancaya, obteniendo de 8.93, 35.68 para Achoma y 10.39, 9.64 para Maca, respectivamente. Según los valores INCA en base a los ECAS del monitoreo de calidad del aire, se encuentran en una categoría de BUENA, donde la calidad de aire es satisfactoria y no representa un riesgo para la salud. La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA del aire.

3.1 VOLCAN HUAYNPUTINA

3.1.1 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

Tabla 13

Datos de peso de acuerdo a cada malla de la granulometría, para las pómez y cenizas de las zonas proximales del Huaynaputina.

Fuente: Elaboración propia.

Malla	Hp-17-06A	Hp-17-06B	Hp-17-06C	Hp-17-06D	Hp-17-06E	Hp-17-06F	Hp-17-07A	Hp-17-07B	Hp-17-07C										
Sieve (mm)	Phi	Peso (g)	Acumulado (%)	Peso (g)	Acumulado (%)	Peso (g)	Acumulado (%)	Peso (g)	Acumulado (%)	Peso (g)	Acumulado (%)								
31.5	-5			34.1	4.15	72.5	9.1	20.1	2.7	17.7	2.7			0.0	62.1	9.5	37.2	6.0	
22.4	-5			61.0	7.43	16.8	2.1	34.7	4.6	8.5	1.3			0.0	35.3	5.4	10.2	1.6	
16	-4	5.4	0.56	87.7	10.67	46.8	5.9	32.6	4.4	13.3	2.0			2.2	0.6	16.6	2.5	18.9	3.1
11.2	-4	25.6	2.65	63.8	7.76	66.6	8.4	41.2	5.5	28.8	4.3			9.1	2.5	40.1	6.1	47.9	7.8
8	-3	26.1	2.70	69.6	8.47	73.2	9.2	56.3	7.5	57.5	8.7			12.2	3.4	56.3	8.6	44.7	7.2
5.6	-3	56.5	5.86	84.4	10.27	89.5	11.2	76.0	10.2	67.9	10.2			31.7	8.7	58.9	9.0	58.7	9.5
4	-2	78.7	8.16	68.2	8.30	55.4	6.9	64.9	8.7	74.5	11.2			45.1	12.4	62.2	9.5	57.4	9.3
2.8	-2	110.1	11.42	69.4	8.44	58.1	7.3	68.7	9.2	78.5	11.8	1.2	0.3	61.6	17.0	63.8	9.7	68.0	11.0
2	-1	116.6	12.09	52.1	6.35	45.1	5.6	57.2	7.7	62.2	9.4	2.5	0.7	47.6	13.1	58.8	9.0	58.9	9.5
1.4	-1	140.4	14.56	55.5	6.75	51.5	6.5	60.2	8.1	65.6	9.9	16.1	4.5	47.3	13.1	57.7	8.8	55.1	8.9
1	0	111.4	11.55	38.8	4.72	44.5	5.6	49.8	6.7	46.5	7.0	26.6	7.5	35.6	9.8	39.9	6.1	37.1	6.0
0.71	0.5	133.0	13.79	50.2	6.11	69.6	8.7	74.3	9.9	60.6	9.1	60.2	17.0	42.4	11.7	53.2	8.1	56.7	9.2
0.5	1	96.9	10.05	38.9	4.73	50.5	6.3	53.1	7.1	40.9	6.2	85.5	24.1	21.3	5.9	33.0	5.0	29.5	4.8
0.25	2	52.7	5.46	37.7	4.59	49.6	6.2	49.7	6.6	36.9	5.6	136.2	38.5	4.8	1.3	16.0	2.4	33.5	5.4
0.125	3	5.3	0.55	6.4	0.78	6.0	0.8	6.3	0.8	4.2	0.6	23.8	6.7	0.9	0.2	0.7	0.1	2.6	0.4
0.063	4	3.8	0.39	2.4	0.29	1.4	0.2	1.4	0.2	0.6	0.1	1.4	0.4	0.4	0.1	0.2	0.0	0.2	0.0
<0.063	5	2.0	0.21	1.5	0.18	1.0	0.1	1.0	0.1	0.3	0.0	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Total		964.5	100.0	821.7	100.0	798.1	100.0	747.5	100.0	664.6	100.0	354.2	100.0	362.3	100.0	654.7	100.0	616.6	100.0

Malla		Hp-17-07D		Hp-17-07E		Hp-17-07F		Hp-17-14A		Hp-17-14B		Hp-17-14C		Hp-17-14D		Hp-17-14E	
Sieve (mm)	Phi	Peso (g)	Acumulado (%)														
31.5	-5							206.9	16.9	341.0	27.2	313.4	26.5	472.0	38.9		
22.4	-5	55.5	6.5	12.5	2.6			222.6	18.2	201.2	16.0	204.7	17.3	305.2	25.1	395.6	33.4
16	-4	75.1	8.7	27.7	5.7			238.6	19.5	193.7	15.4	217.9	18.4	201.7	16.6	230.0	19.4
11.2	-4	83.8	9.8	25.3	5.2			168.9	13.8	83.3	6.6	165.1	13.9	95.4	7.9	120.9	10.2
8	-3	77.4	9.0	30.0	6.2			99.7	8.2	39.5	3.2	63.6	5.4	34.9	2.9	90.2	7.6
5.6	-3	82.4	9.6	33.7	6.9	1.0	0.2	66.2	5.4	35.1	2.8	44.1	3.7	24.5	2.0	66.2	5.6
4	-2	80.7	9.4	46.0	9.5	2.0	0.4	42.1	3.4	28.7	2.3	25.8	2.2	9.8	0.8	43.5	3.7
2.8	-2	86.7	10.1	46.7	9.6	4.2	0.8	35.4	2.9	25.5	2.0	18.0	1.5	7.0	0.6	39.4	3.3
2	-1	59.7	6.9	42.1	8.7	9.2	1.8	23.4	1.9	20.6	1.6	16.5	1.4	4.8	0.4	29.8	2.5
1.4	-1	74.6	8.7	46.3	9.5	22.2	4.5	23.9	2.0	24.2	1.9	15.5	1.3	5.1	0.4	28.3	2.4
1	0	36.8	4.3	43.2	8.9	29.9	6.0	13.9	1.1	16.6	1.3	9.8	0.8	3.3	0.3	17.5	1.5
0.71	0.5	64.4	7.5	76.2	15.7	164.4	33.0	16.1	1.3	21.9	1.7	11.6	1.0	4.4	0.4	23.7	2.0
0.5	1	38.2	4.4	25.4	5.2	121.3	24.3	11.4	0.9	17.1	1.4	7.8	0.7	4.6	0.4	19.5	1.6
0.25	2	39.9	4.6	28.9	5.9	112.0	22.5	35.5	2.9	61.0	4.9	16.0	1.4	14.4	1.2	45.8	3.9
0.125	3	3.5	0.4	2.2	0.5	27.8	5.6	10.0	0.8	107.2	8.5	30.3	2.6	18.7	1.5	23.2	2.0
0.063	4	0.5	0.1	0.2	0.0	2.7	0.5	6.3	0.5	29.8	2.4	19.2	1.6	6.7	0.6	8.2	0.7
<0.063	5		0.0		0.0	1.7	0.3	1.3	0.1	7.6	0.6	4.7	0.4	2.4	0.2	3.4	0.3
Total		859.1	100.0	486.4	100.0	498.4	100.0	1222.2	100.0	1254.0	100.0	1184.1	100.0	1214.8	100.0	1185.3	100.0

3.1.1.1 ZONA PROXIMAL:

Para las muestras correspondientes a la zona proximal se calcularon 5 parámetros estadísticos conformado por 17 muestras. Los resultados obtenidos muestran una distribución bimodal y unimodal del depósito. El valor de la mediana (Md) del depósito de caída pliniana muestran valores entre -4.80 a 0.85 Ø. El tamaño promedio de grano (Mz) se encuentra entre -4.75 a 0.85 Ø. El depósito consiste de material muy mal sorteado a moderadamente sorteado (σ), con curvas casi simétricas a asimétricas muy positivas (Sk1), que indica un exceso de partículas de granos finos en la muestra. La angulosidad gráfica (KG) en la zona proximal, presentan curvas con poca concentración de datos en la media, presentando una forma achatada (platicúrtica) a curvas con distribución normal (mesocúrtica).

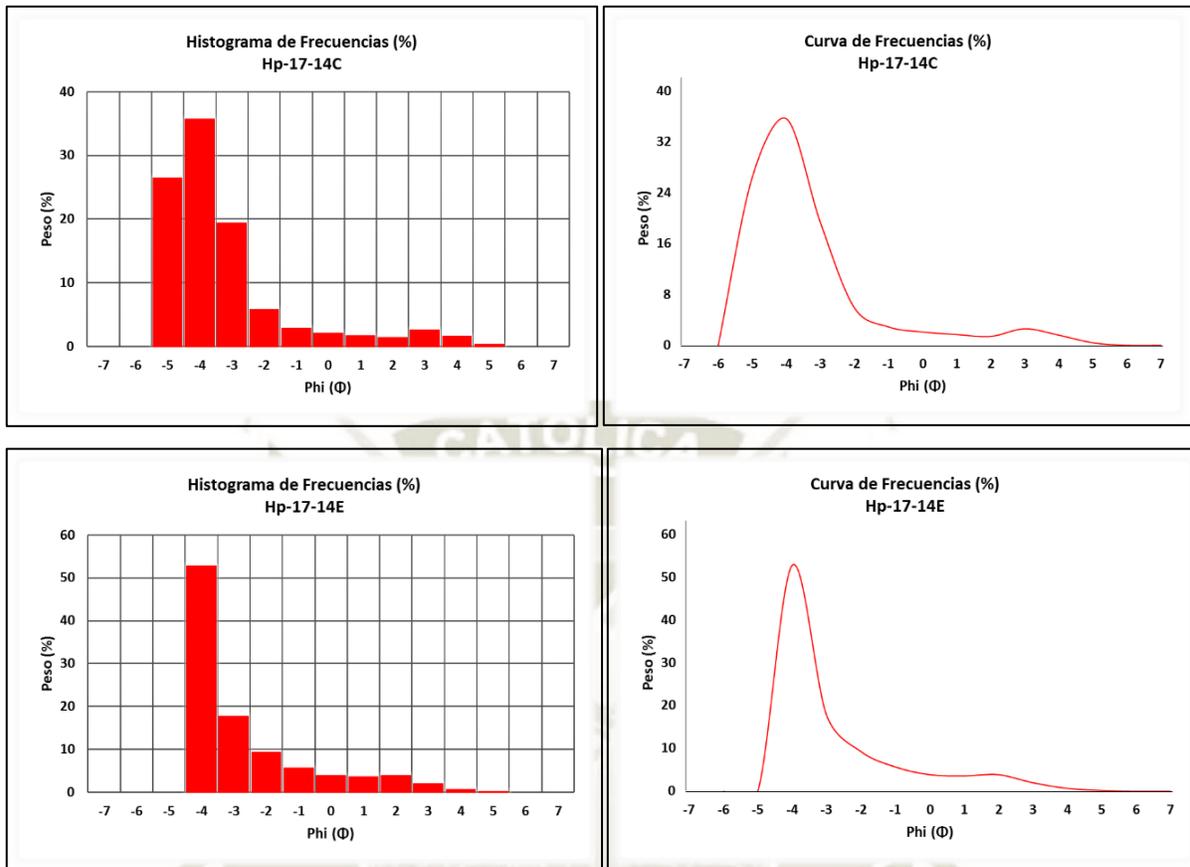


Figura 38. Gráficos de histograma de frecuencia y curva granulométrica cumulativa (Folk e Inman) de muestras representativas del sector proximal correspondiente a la primera fase (caída Pliniana) de la erupción del volcán Huaynaputina en 1600 d.C.

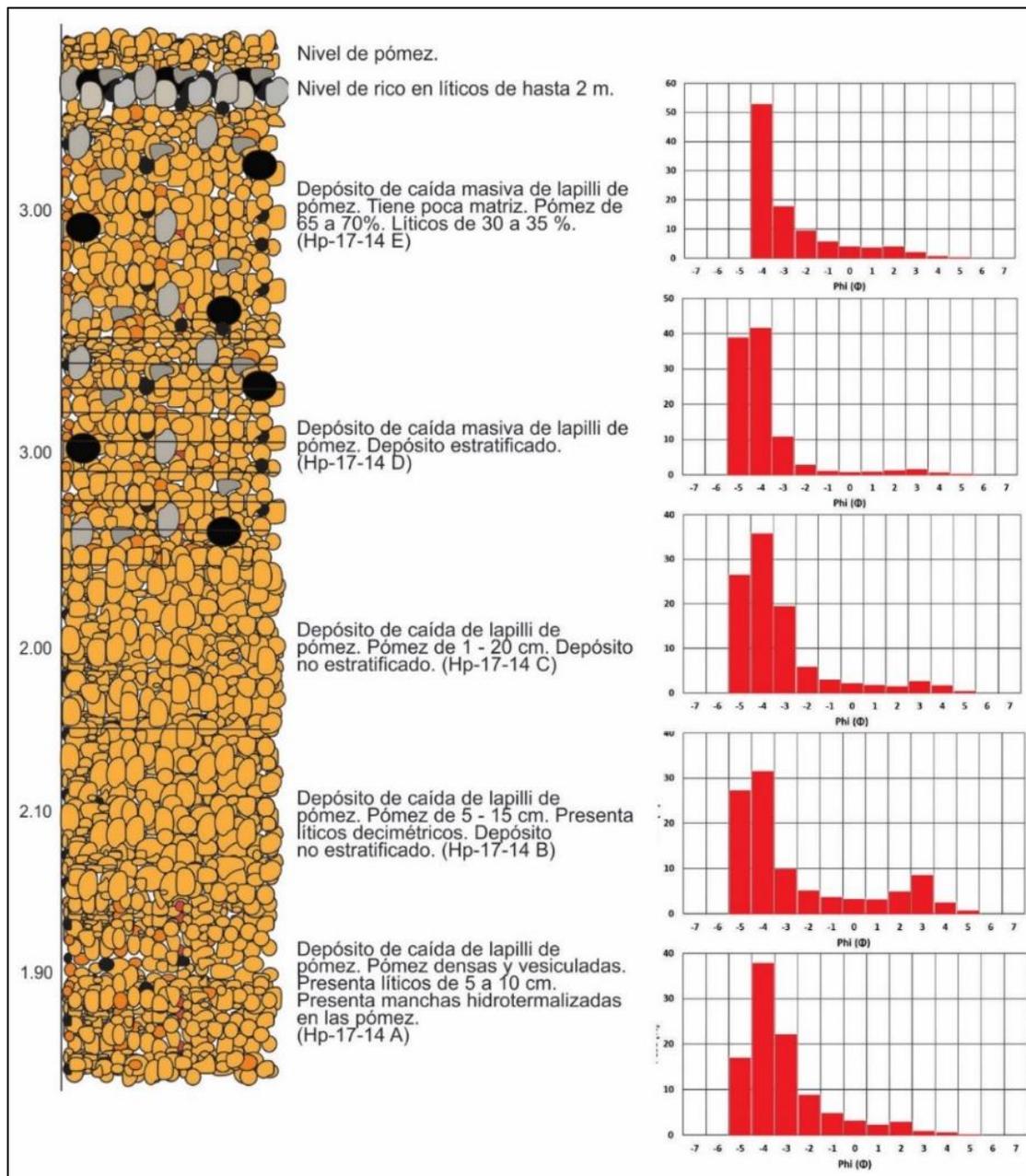


Figura 39. Gráficos de la columna estratigráfica representativa de la zona proximal, junto con los histogramas de granulometría de cada sección.

Tabla 14

Datos de peso de acuerdo a cada malla de la granulometría, para las pómez y cenizas de las zonas mediales del Huaynaputina.

Malla		Hp-17-02A		Hp-17-02B		Hp-17-04A		Hp-17-04B		Hp-17-04C		Hp-17-05A		Hp-17-05B		Hp-17-05C		Hp-17-08A		Hp-17-08B			
Sieve (mm)	Phi	Peso (g)	Acumulado (%)																				
31.5	-5																				51.6	7.0	
22.4	-4.5													27.2	3.6							36.5	4.9
16	-4													13.5	1.8							31.3	4.2
11.2	-3.5						4.9	1.0				0.9	0.3	29.8	4.0				0.8	0.2	52.9	7.1	
8	-3			0.5	0.2	2.5	0.6	7.6	1.6				4.9	1.7	40.4	5.4			3.2	0.9	51.4	6.9	
5.6	-2.5			0.3	0.1	4.3	1.0	13.1	2.7	0.9	0.2	13.1	4.5	55.6	7.4	3.1	0.9	5.6	1.6	69.9	9.4		
4	-2			1.1	0.3	11.6	2.8	19.6	4.1	2.9	0.6	18.5	6.3	62.1	8.3	4.2	1.2	14.3	4.0	57.2	7.7		
2.8	-1.5	0.6	0.2	5.3	1.6	5.7	1.4	39.1	8.2	8.0	1.6	30.0	10.2	91.9	12.3	11.2	3.2	26.4	7.4	85.6	11.5		
2	-1	4.2	1.4	13.3	4.1	31.5	7.6	48.9	10.2	20.5	4.0	32.0	10.9	79.1	10.6	19.2	5.5	32.3	9.1	36.4	4.9		
1.4	-0.5	17.7	5.9	28.4	8.8	58.3	14.0	59.4	12.4	41.5	8.1	31.9	10.9	72.7	9.7	30.3	8.7	45.9	12.9	58.6	7.9		
1	0	31.7	10.6	33.3	10.3	54.3	13.0	49.8	10.4	50.0	9.8	26.7	9.1	52.6	7.0	32.9	9.5	41.6	11.7	47.2	6.4		
0.71	0.5	62.4	20.9	59.7	18.4	91.5	22.0	67.8	14.2	106.5	20.8	41.9	14.3	80.1	10.7	62.0	17.8	66.4	18.7	56.1	7.6		
0.5	1	99.3	33.2	75.7	23.4	71.4	17.2	70.2	14.7	99.8	19.5	38.9	13.3	63.3	8.4	61.0	17.5	52.5	14.8	60.4	8.1		
0.25	2	77.5	25.9	92.4	28.6	79.2	19.0	82.1	17.2	148.8	29.0	48.9	16.7	71.3	9.5	97.3	28.0	31.8	9.0	40.1	5.4		
0.125	3	5.4	1.8	13.3	4.1	4.9	1.2	14.7	3.1	32.7	6.4	5.0	1.7	9.2	1.2	25.0	7.2	32.5	9.2	5.1	0.7		
0.063	4	0.3	0.1	0.3	0.1	0.7	0.2	0.7	0.1	1.0	0.2	0.1	0.0	0.4	0.1	1.2	0.3	1.0	0.3	2.0	0.3		
<0.063	5		0.0	0.1	0.0	0.4	0.1	0.4	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.6	0.2	0.6	0.2	0.5	0.1		
Total		299.1	100.0	323.6	100.0	416.3	100.0	478.2	100.0	512.8	100.0	292.9	100.0	749.4	100.0	348.0	100.0	354.9	100.0	742.9	100.0		

Malla		Hp-17-08C		Hp-17-08D		Hp-17-08E		Hp-17-15A		Hp-17-15B		Hp-17-15C		Hp-17-15D		Hp-17-15E		Hp-17-16	
Sieve (mm)	Phi	Peso (g)	Acumulado (%)	Peso (g)	Acumulado (%)														
31.5	-5											63.9	7.6						
22.4	-4.5	17.2	3.2							29.6	5.2	69.3	8.2						
16	-4	40.0	7.5							3.9	0.7	39.4	4.7						
11.2	-3.5	38.2	7.2	6.5	1.0			2.0	0.4	17.2	3.0	29.5	3.5	8.6	1.5				
8	-3	54.5	10.2	12.8	1.9			3.7	0.7	26.8	4.7	51.1	6.1	13.9	2.5				
5.6	-2.5	60.8	11.4	29.9	4.5	0.1		12.8	2.3	37.8	6.6	54.6	6.5	20.4	3.7				
4	-2	63.4	11.9	48.0	7.3	0.5	0.1	27.1	4.8	44.4	7.8	54.8	6.5	36.9	6.6				
2.8	-1.5	63.8	11.9	70.6	10.7	2.4	0.4	47.2	8.4	55.5	9.7	62.4	7.4	73.6	13.2	1.6	0.6	0.9	0.4
2	-1	22.6	4.2	72.4	11.0	6.2	1.1	57.3	10.2	56.5	9.9	51.0	6.1	59.2	10.6	0.8	0.3	3.8	1.5
1.4	-0.5	50.4	9.4	85.5	13.0	13.6	2.5	30.2	5.4	65.6	11.5	59.7	7.1	63.8	11.4	3.5	1.2	6.9	2.7
1	0	31.4	5.9	68.3	10.4	23.9	4.3	75.0	13.3	56.1	9.9	47.7	5.7	54.6	9.8	7.6	2.7	16.3	6.4
0.71	0.5	42.5	8.0	97.9	14.9	91.2	16.6	137.9	24.5	85.0	14.9	84.4	10.0	84.2	15.1	31.5	11.1	43.5	17.0
0.5	1	25.9	4.8	76.0	11.5	140.7	25.6	88.1	15.7	53.3	9.4	73.5	8.7	62.0	11.1	67.5	23.7	58.3	22.8
0.25	2	20.0	3.7	77.7	11.8	230.1	41.8	76.9	13.7	34.9	6.1	87.2	10.4	68.5	12.3	146.7	51.5	102.7	40.2
0.125	3	1.9	0.4	9.3	1.4	40.1	7.3	3.0	0.5	1.9	0.3	10.7	1.3	10.4	1.9	23.5	8.3	22.0	8.6
0.063	4	1.2	0.2	1.8	0.3	1.6	0.3	0.7	0.1	0.5	0.1	2.1	0.2	1.1	0.2	1.5	0.5	0.9	0.4
<0.063	5	0.3	0.1	1.6	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.3	0.1	0.4	0.0	0.4	0.1	0.5	0.2	0.2	0.1
Total		534.0	100.0	658.1	100.0	550.5	100.0	562.1	100.0	569.3	100.0	841.8	100.0	557.6	100.0	284.7	100.0	255.5	100.0

3.1.1.2 ZONA MEDIAL:

Para las muestras correspondientes a la zona medial se calcularon 5 parámetros estadísticos conformado por 19 muestras. Los resultados obtenidos muestran una distribución bimodal y unimodal del depósito.

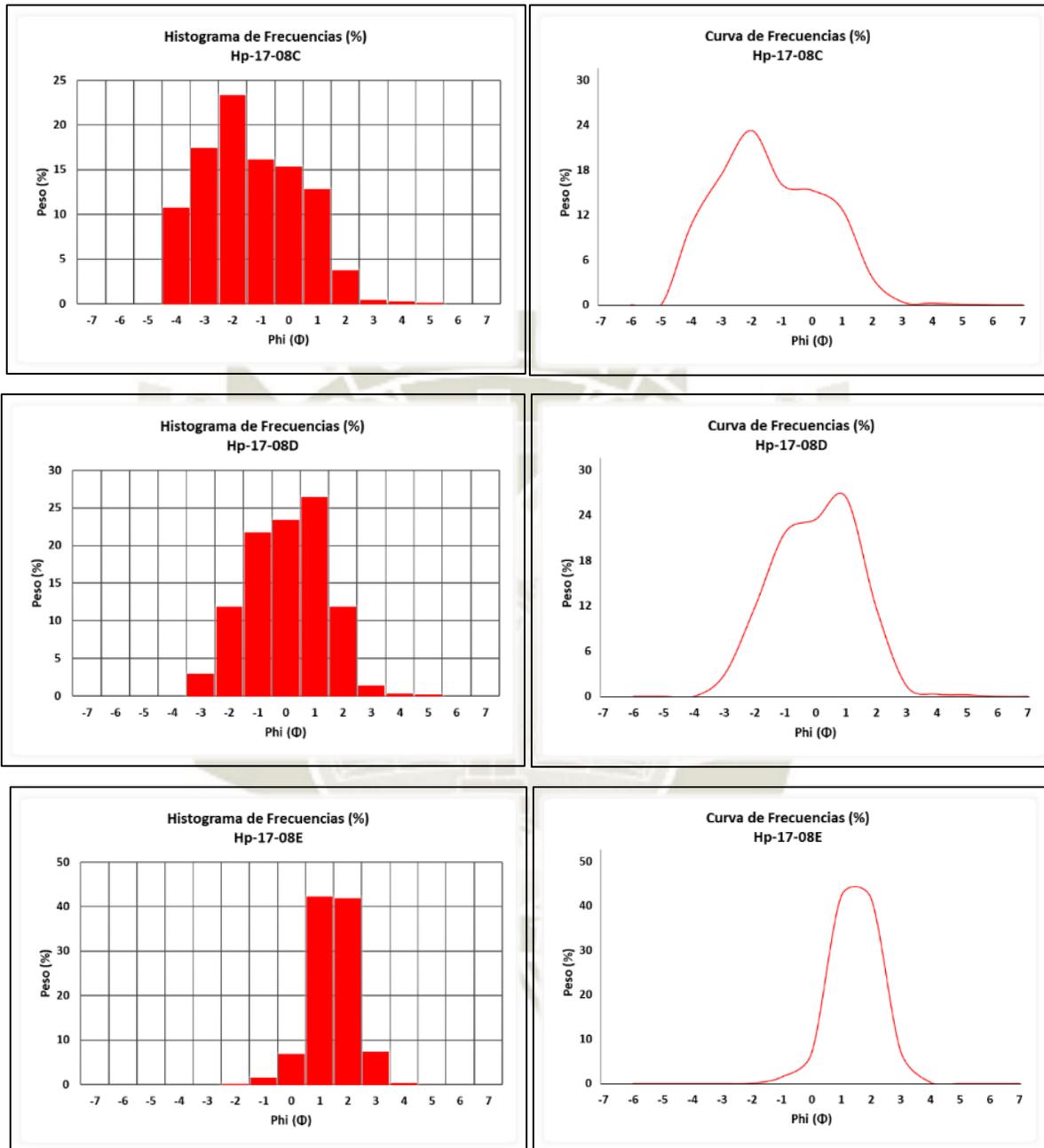


Figura 40. Gráficos de histograma de frecuencia y curva granulométrica cumulativa (Folk e Inman) de muestras representativas del sector medial correspondiente a la primera fase (caída Pliniana) de la erupción del volcán Huaynaputina en 1600 d.C.

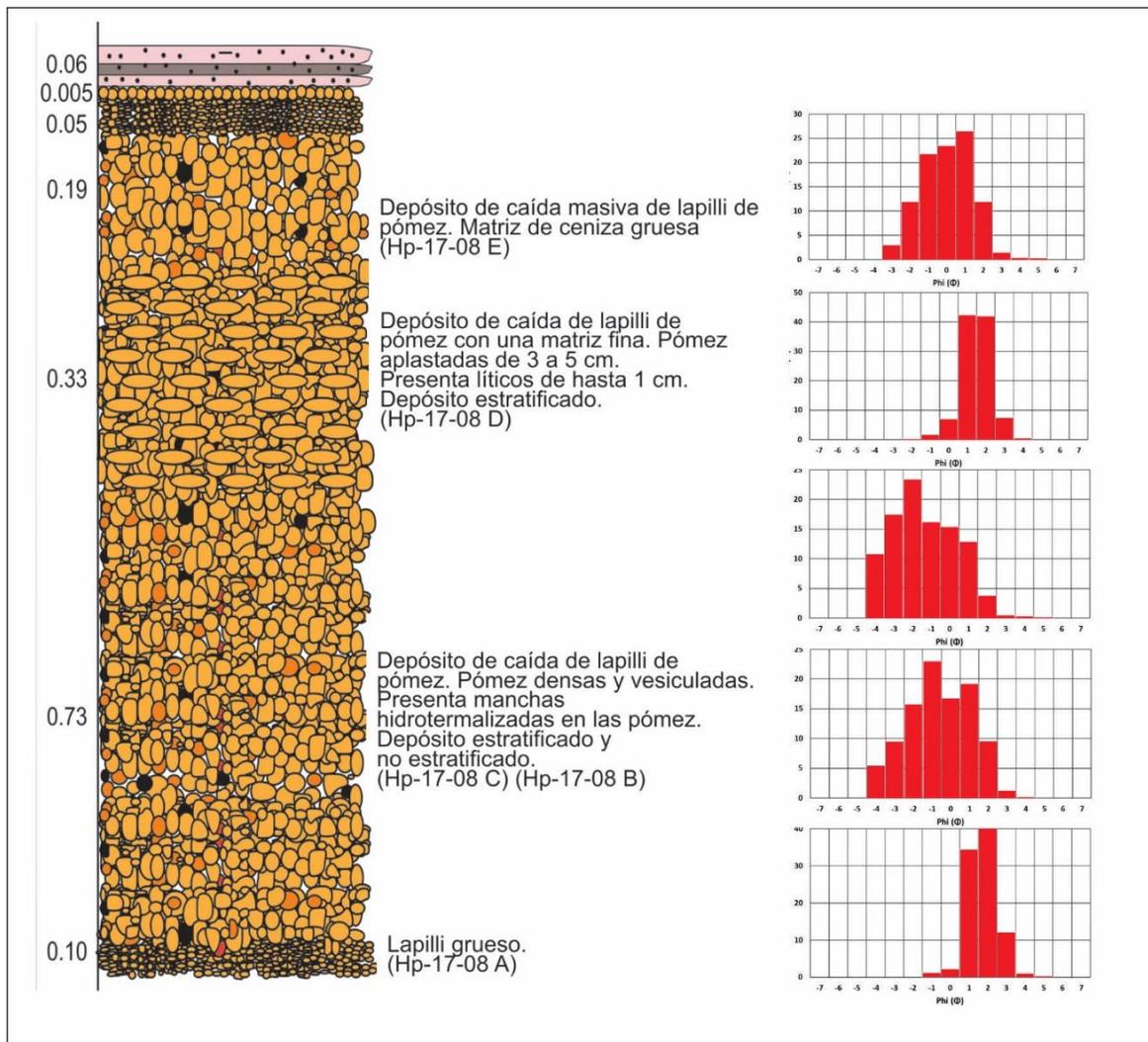


Figura 41. Gráficos de la columna estratigráfica representativa de la zona medial, junto con los histogramas de granulometría de cada sección.

Tabla 15

Datos de peso de acuerdo a cada malla de la granulometría, para las pómez y cenizas de las zonas distales del Huaynaputina.

Malla		Hp-17-01		Hp-17-17	
Sieve (mm)	Phi	Peso (g)	Acumulado (%)	Peso (g)	Acumulado (%)
31.5	-5				
22.4	-4.5				
16	-4				
11.2	-3.5				
8	-3				
5.6	-2.5				
4	-2				
2.8	-1.5				
2	-1			3.4	1.1
1.4	-0.5	2.1	0.5	1.4	0.4
1	0	6.6	1.7	5.4	1.7
0.71	0.5	73.6	18.6	41.5	13.0
0.5	1	149.7	37.8	68.1	21.3
0.25	2	137.9	34.8	158.3	49.5
0.125	3	24.8	6.3	38.3	12.0
0.063	4	1.2	0.3	2.9	0.9
<0.063	5	0.4	0.1	0.6	0.2
Total		396.3	100.0	319.9	100.0

3.1.1.3 ZONA DISTAL:

Para las muestras correspondientes a la zona distal se calcularon 5 parámetros estadísticos conformado por 2 muestras. Los resultados obtenidos muestran una distribución unimodal del depósito (Figura 4.44). El valor de la mediana (Md) del depósito de caída pliniana muestra valores entre 0.8 a 1.2 \emptyset . El tamaño promedio de grano (Mz) se encuentra entre 0.88 a 1.17 \emptyset . El depósito consiste de material moderadamente sorteado (σ), con curvas casi simétricas a asimétricas positivas (Sk1), que indica un exceso de partículas de granos finos en la muestra. La angulosidad gráfica (KG) en la zona proximal, presentan curvas con poca concentración de datos en la media, presentando curvas con distribución normal (mesocúrtica).

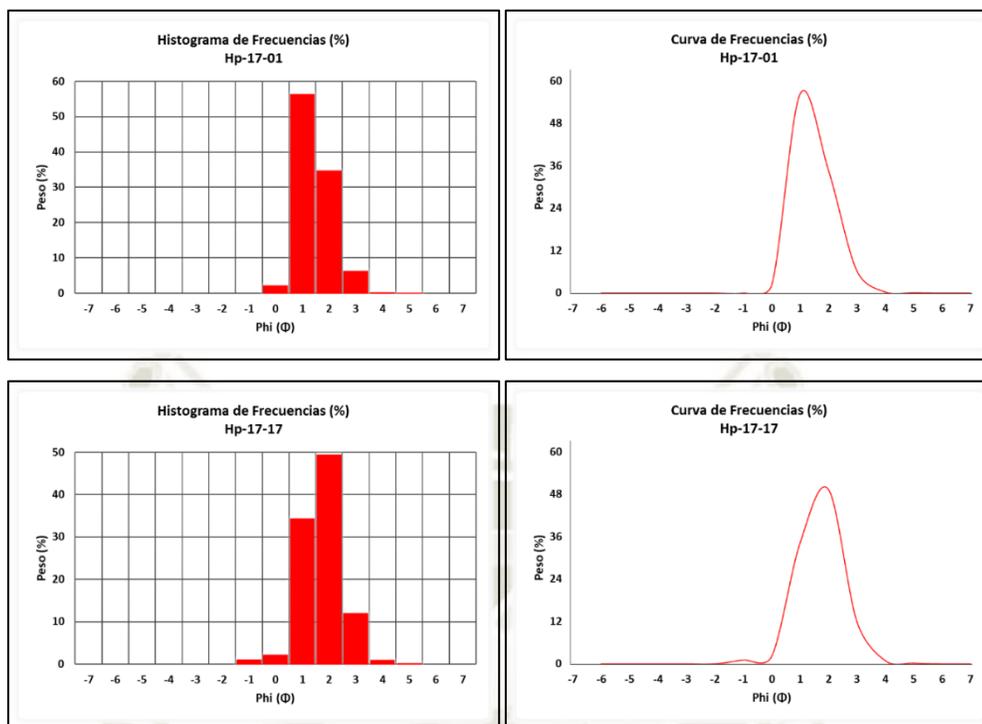


Figura 42. Gráficos de histograma de frecuencia y curva granulométrica cumulativa (Folk e Inman) de muestras representativas del sector distal correspondiente a la primera fase (caída Pliniana) de la erupción del volcán Huaynaputina en 1600 d.C.

3.1.2 INTERPRETACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Los resultados del estudio granulométrico muestran que la distribución del depósito varía según las zonas. En la zona proximal y medial el depósito de caída pliniana presenta una distribución bimodal y unimodal a diferencia de la zona distal que presenta una distribución únicamente unimodal. Esto indica que la sedimentación del tamaño de partículas es variable según la distancia al cráter, influenciada por la dirección del viento (sotavento).

Según el análisis granulométrico la mediana varía respecto a la distancia al cráter. En la zona proximal el depósito tiene valores de -4.80 a 0.85 Ø , mientras que en la zona medial se tiene -4.05 a 1.15 Ø y en la zona distal se tiene valores de 0.80 a 1.20 Ø . Esto indica que mientras más alejado se encuentre el depósito la mediana 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).

La media (M_z) del depósito varía según la distancia al cráter. En la zona proximal se tiene un rango entre -4.75 a 0.85 Ø , en caso de la zona medial se tiene una media entre -3.43 a 1.10 Ø . Esto indica que los valores se acercan a las partículas finas (valores positivos), mientras que en la zona distal los

valores de la media (0.88 a 1.17 \emptyset) se aleja más de la zona de partículas gruesas. Esto se debe a la dispersión de las partículas según el eje de dispersión (sotavento).

El sorteo (σ), en la zona proximal el depósito está muy mal sorteado a moderadamente sorteado, debido al flujo turbulento donde las partículas que se mueven de forma desordenada y forman pequeños remolinos en las zonas cercanas al cráter. Esto es conocido como el número de Reynolds que generalmente se presentan en zonas proximales con valores de 500 – 200000 (Biss and Bonadonna, 2011). En la zona medial y distal el depósito está moderadamente sorteado a mal sorteado, lo que indica un mejor ordenamiento de las partículas por acción del viento (sotavento) generando una sedimentación de partículas de forma homogénea, así también influenciada por el cambio de dirección del viento ocurrida en zona distal.

La asimetría (Sk_l) en los depósitos proximales donde los histogramas muestran predominancia de partículas gruesas, se representa en curvas casi simétricas a asimétricas muy positivas, presentando un exceso hacia partículas finas, mientras que en la zona medial las partículas presentan un ligero equilibrio entre partículas finas y gruesas, con una asimetría casi simétrica a asimetrías negativas, con una tendencia hacia los gruesos. Finalmente, en las zonas distales es casi simétrica a asimetría negativa con tendencia hacia las partículas finas. En los 3 sectores mayormente se presentan curvas gaussianas, mostrando un ligero equilibrio, correspondiendo a muestras con una asimetría (skewed) casi simétrica, donde los cambios se dan debido a la densidad de las partículas, fuerza e influencia seleccionadora del viento paralela al eje de dispersión.

3.1.3 TOTAL GRAIN SIZE DISTRIBUTION – TGSD

Los cálculos de distribución de tamaño de grano total pueden ser usados para inferir los estilos de fragmentación y de erupción al vincular el tamaño de partícula al contenido inicial de gas y los procesos de interacción agua – magma (Houghton y Wilson 1998).

La distribución total de tamaño de grano (TGSD) de los depósitos de tefra es crucial para la evaluación de riesgos y proporciona información fundamental de la dinámica de la erupción. Controla la distribución de masa dentro de la pluma eruptiva, así como los procesos de sedimentación que proporcionan información esencial de los mecanismos de fragmentación.

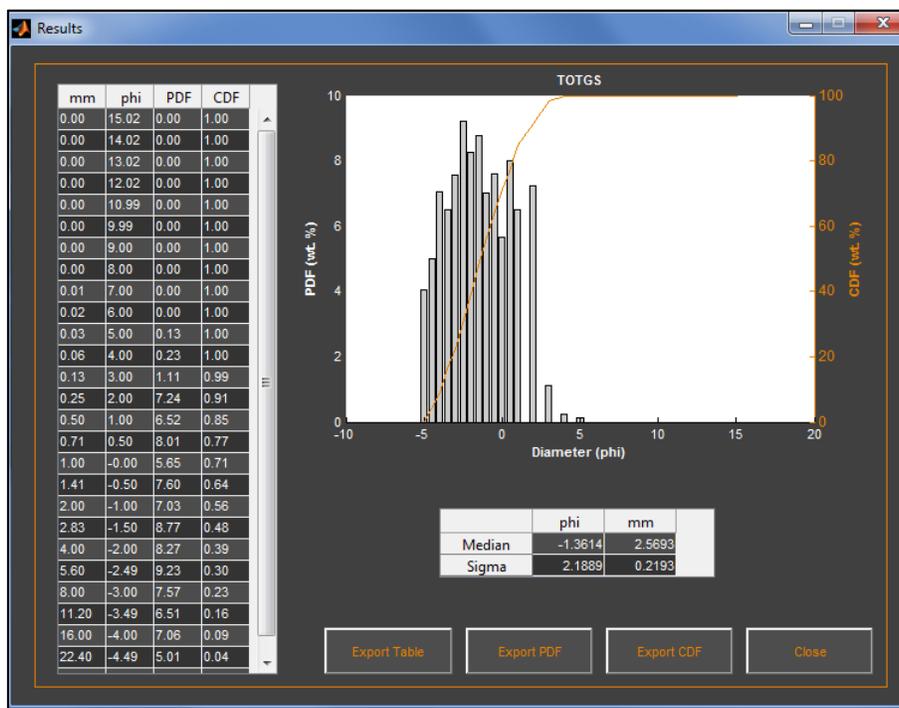


Figura 43. Tabla de resultados de la Distribución Total de tamaño de grano, usando el software TOTGS. Se puede apreciar que el promedio de tamaño de grano de la erupción de 1600 d.C. se encuentra entre -5 a 2, los cuales corresponden a tamaños entre 31.5 mm a 0.25 mm. Según la distribución granulométrica 2.8, 4 y 5.6 mm.

3.2 VOLCAN SABANCAYA 2017-2019

3.2.1 MEDIDAS DE DIÓXIDO DE AZUFRE SO₂

Se cuenta con mediciones se efectuaron durante el periodo de enero a diciembre del 2017, haciendo un total de 50 530 lecturas durante este tiempo.



Figura 44. Mediciones de los flujos máximos diarios con el equipo NOVAC escáner de las lecturas diarias (color azul), registradas en la estación SADI para el monitoreo de gases de azufre SO₂ en la pluma volcánica del Sabancaya durante el 2017.

Fuente: Observatorio Vulcanológico de INGEMMET.

Se registraron flujos importantes antes del periodo de erupción del volcán Sabancaya, los cuales, eran claros indicadores del ascenso de un cuerpo magmático desde el interior del volcán hacia la superficie, esta desgasificación continua y está ligada a la actividad volcánica presente, mediante la emisión de grandes columnas de gases volcánicos emitidas por el cráter del volcán.

El flujo de SO_2 , por lo general, se mantuvo por debajo de las 6000 toneladas/día, salvo en 2 ocasiones, en febrero, donde el día 15 alcanzó las 9270 toneladas/día y en reiteradas ocasiones durante el mes de julio, el 13 de julio alcanzó un máximo de 14860 toneladas/día, el flujo más alto registrado durante todo el proceso eruptivo. Estos flujos de gases volcánicos SO_2 , es normal para un volcán en proceso eruptivo, con un sistema abierto (Observatorio Vulcanológico de INGEMMET).

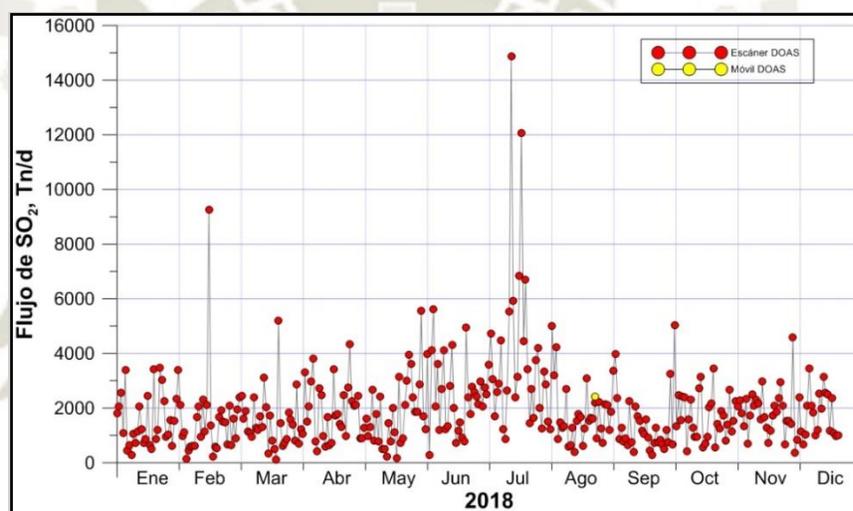


Figura 45. Mediciones de los flujos máximos diarios con el equipo NOVAC, escáner de las lecturas diarias (color rojo), Mediciones realizadas con el móvil DOAS (color amarillo) para el monitoreo del gas volcánico dióxido de azufre SO_2 , en la pluma volcánica del Sabancaya, durante el 2018.

Fuente: Observatorio Vulcanológico de INGEMMET.

El flujo de SO_2 , por lo general, se mantuvo por debajo de las 10000 toneladas/día (flujo grande) hasta mayo, a partir de esta fecha se registró un incremento superando este nivel (flujos muy grandes) en los meses de mayo, junio, julio, septiembre y diciembre. Alcanzando un flujo máximo de hasta las 12800 Ton/día el 23 de julio (Figura 48).

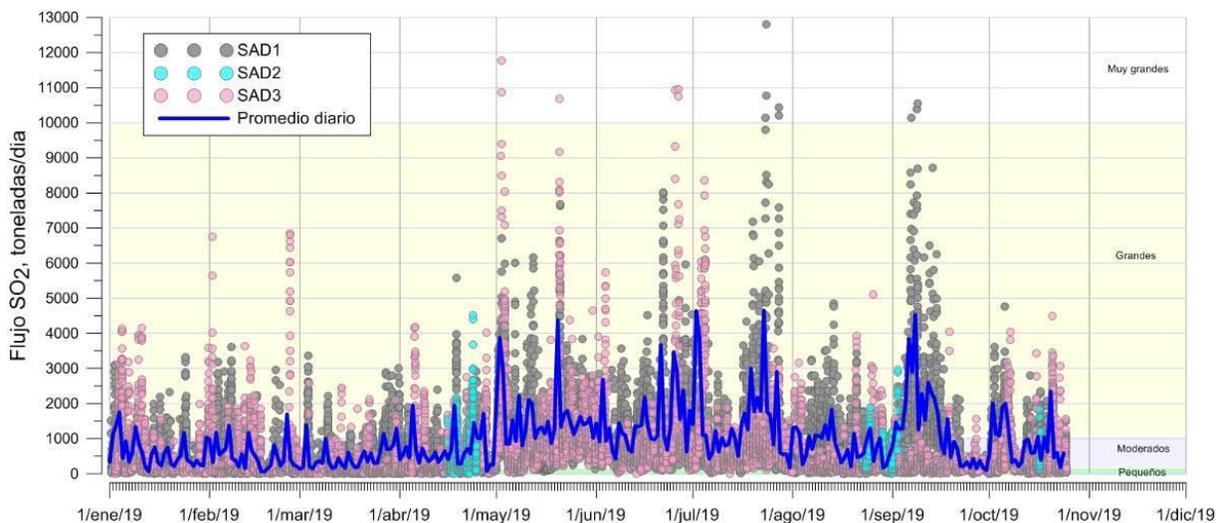


Figura 46. Mediciones de los flujos máximos diarios con el equipo NOVAC, escáner de las lecturas diarias (color rojo), registradas en las estaciones SAD1, SAD2, SAD3 y SAD5. Mediciones realizadas con el móvil DOAS (Color amarillo) para el monitoreo del gas volcánico dióxido de azufre SO_2 , en la pluma volcánica del Sabancaya, durante el 2019. (Informe especial A6969 – Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, 2019).

3.2.2 GRANULOMETRÍA DE LA CENIZA

La ceniza volcánica es de color gris claro, compuesta por partículas pulverizadas (menos de 2 mm de diámetro) de roca, minerales y vidrio volcánico, las cuales son eyectadas a través del cráter del volcán durante erupciones explosivas. Vistas al detalle (a través de un binocular y al microscopio) tienen una apariencia uniforme y no se aprecian arcillas u otros minerales de alteración. Estas características sugieren que la formación de la ceniza se debe a una vesiculación explosiva de magma juvenil que asciende hacia la superficie.

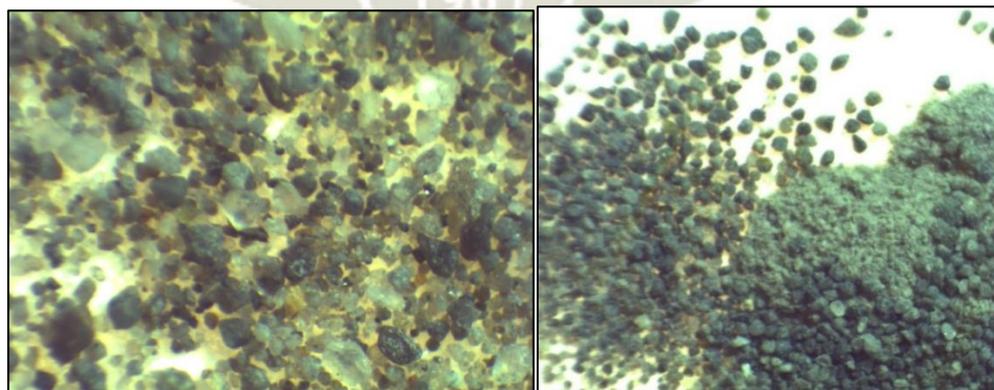


Figura 47. Vista de las cenizas a escala microscópica (5x-10x). Se puede apreciar cristales de Plagioclasa, Vidrio volcánico, minerales oscuros y óxidos (2017).

En la estación Hornillos, al noreste del volcán Sabancaya, las cenizas depositadas a inicios de noviembre de 2016 son angulares y ligeramente redondeadas e incluyen líticos juveniles, vidrio, cristales de plagioclasa, olivino, biotita y líticos hidrotermalizados y oxidados. El tamaño de los componentes de la ceniza alcanza hasta 600 μm . Durante este periodo se observa que el porcentaje de los fragmentos finos (32 μm) es mayor que los componentes gruesos (250 – 500 μm). Mientras que las cenizas emitidas desde febrero del 2017 contienen principalmente líticos juveniles, vidrio, cristales de plagioclasa, biotitas, olivinos, piroxenos. En este periodo se observa un incremento de tamaño de los componentes que alcanzan a medir hasta 1 mm. También se observó una variación con respecto al tamaño de grano. En efecto, durante los meses de junio y julio el porcentaje de componentes gruesos (250 – 500 μm) fue superior al porcentaje de componentes finos (32 μm).

En este periodo, la ceniza caída en los pueblos de Maca y Huanca fueron mucho más finas, con tamaños inferiores a 500 μm . Aquí predominaron cristales de plagioclasa, líticos juveniles y vidrio.

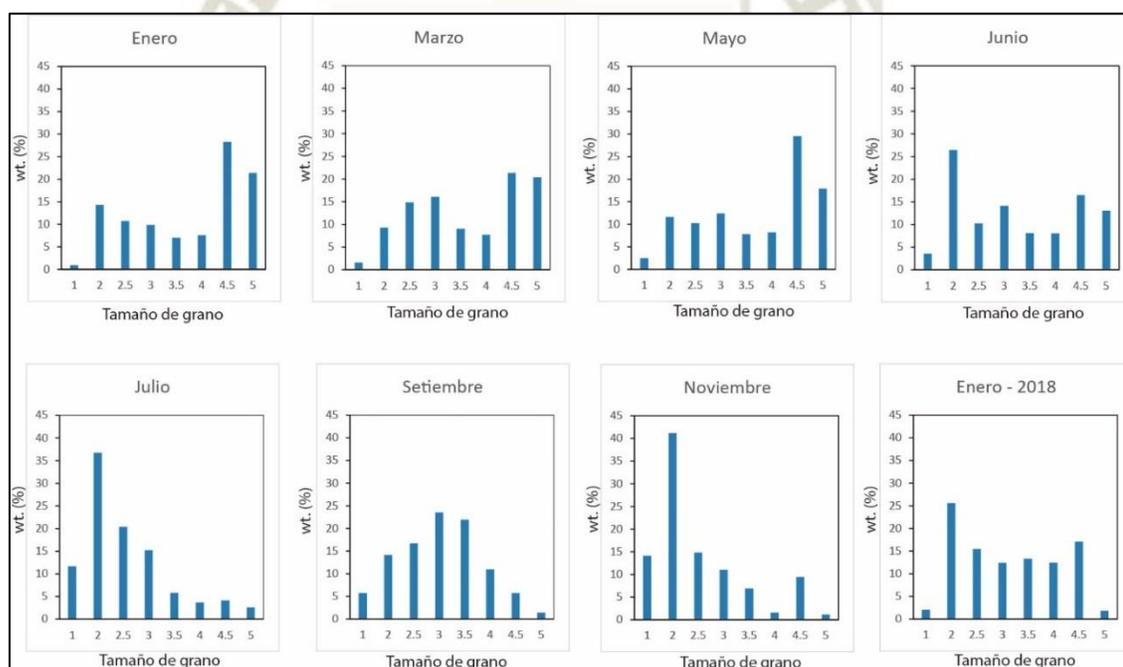


Figura 48. Gráficos de barras que representan el porcentaje de peso vs el tamaño de grano de las cenizas del volcán Sabancaya durante el 2017, desde la estación Hornillos al noreste del volcán. Se puede apreciar que desde enero a mayo se presentó tamaños medios a muy finos de ceniza, mientras que a partir de setiembre a diciembre la ceniza es fina.

Las muestras de ceniza tomadas en el mes de diciembre del 2018, presentan partículas menores a 2 mm de diámetro, compuestas de fragmentos muy finos de vidrio volcánico. Cuando se hizo el lavado de las cenizas se pudo observar cristales finos de biotita y olivino, algo inusual, pero que se puede

interpretar posiblemente como o una inyección de magma de diferente composición al reservorio. La presencia de los cristales de color negruzco y la carencia de cristales alterados y oxidados, se puede interpretar como la inyección de material juvenil (magma), corroborando la fuerte actividad eruptiva del volcán Sabancaya.

3.2.3 MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE

Los resultados se expresan en microgramos por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), el punto AIR-01 a condiciones ambientales de temperatura y presión 10,31°C y 508,45 mmHg respectivamente, el punto AIR-02 a condiciones ambientales de temperatura y presión 10,73°C y 518,49 mmHg respectivamente.

Tabla 16
Resultados del monitoreo ambiental de aire en la zona de Achoma.

Matriz analizada		Aire
Fecha de muestreo		2020-10-08
Hora de inicio de muestreo		10:45 am
Coordenadas UTM WGS 84 / 19K		8266691 N
		0210510 E
Altitud (msnm)		3450
Código de la estación de monitoreo		AIR-01
Código del Laboratorio		2-01890/20
Parámetros	Unidades	Resultados
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras PM 10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	13,40
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras PM 2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	8,92

GRÁFICAS COMPARATIVAS DE RESULTADOS

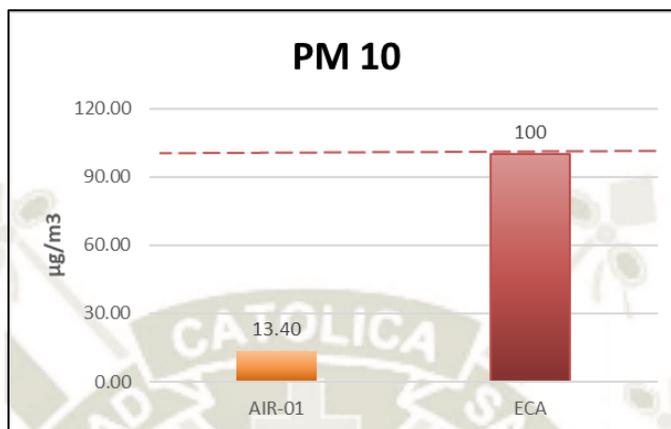


Figura 49. Gráfica de comparación del PM10 con el ECA en la zona de Achoma.

En el gráfico se observa que la concentración de **MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀)**, registrada en la estación de monitoreo **AIR-01**, fue de 13,40 µg/m³; valor que se encuentra por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (100 µg/m³), por lo tanto, **CUMPLE** con lo establecido en el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.

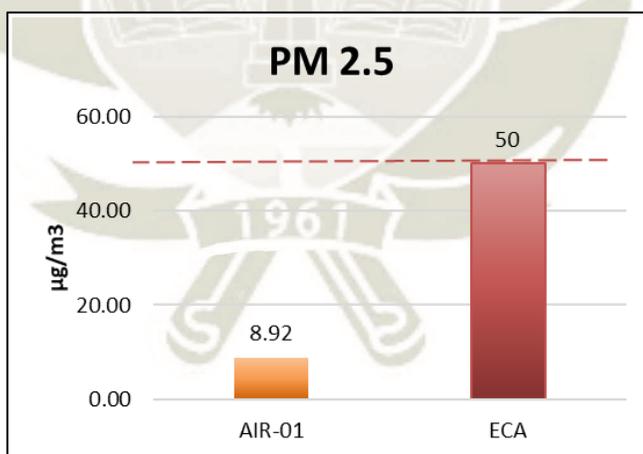


Figura 50. Gráfica de comparación del PM2.5 con el ECA en la zona de Achoma.

En el gráfico se observa que la concentración de **MATERIAL PARTICULADO (PM_{2.5})**, registrada en la estación de monitoreo **AIR-01**, fue de 8,92 µg/m³; valor que se encuentra por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (50 µg/m³), por lo tanto, **CUMPLE** con

lo establecido en el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.

Tabla 17
Resultados del monitoreo ambiental de aire en la zona de Maca.

Matriz analizada		Aire
Fecha de muestreo		2020-10-08
Hora de inicio de muestreo		12:20 pm
Coordenadas UTM WGS 84 / 19K		8268799 N 0203172 E
Altitud (msnm)		2280
Código de la estación de monitoreo		AIR-02
Código del Laboratorio		2-01890/20
Parámetros	Unidades	Resultados
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras PM 10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	15,58
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras PM 2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,42

GRÁFICAS COMPARATIVAS DE RESULTADOS

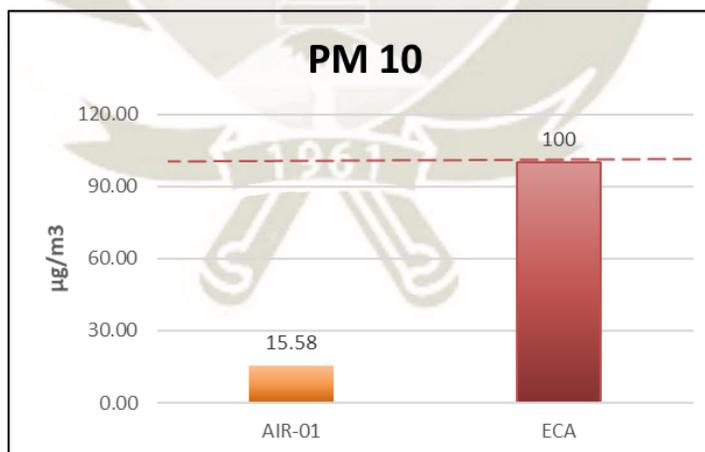


Figura 51. Gráfica de comparación del PM10 con el ECA en la zona de Maca.

En el gráfico se observa que la concentración de **MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀)**, registrada en la estación de monitoreo **AIR-02**, fue de 15,58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; valor que se encuentra por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), por lo tanto, **CUMPLE**

con lo establecido en el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.

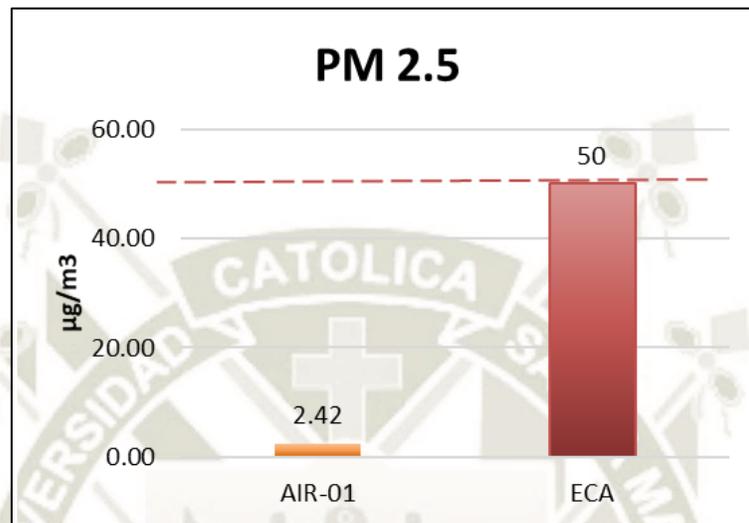


Figura 52. Gráfica de comparación del PM10 con el ECA en la zona de Maca.

En el gráfico se observa que la concentración de **MATERIAL PARTICULADO (PM_{2.5})**, registrada en la estación de monitoreo **AIR-02**, fue de 2,42 µg/m³; valor que se encuentra por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (50 µg/m³), por lo tanto, **CUMPLE** con lo establecido en el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.

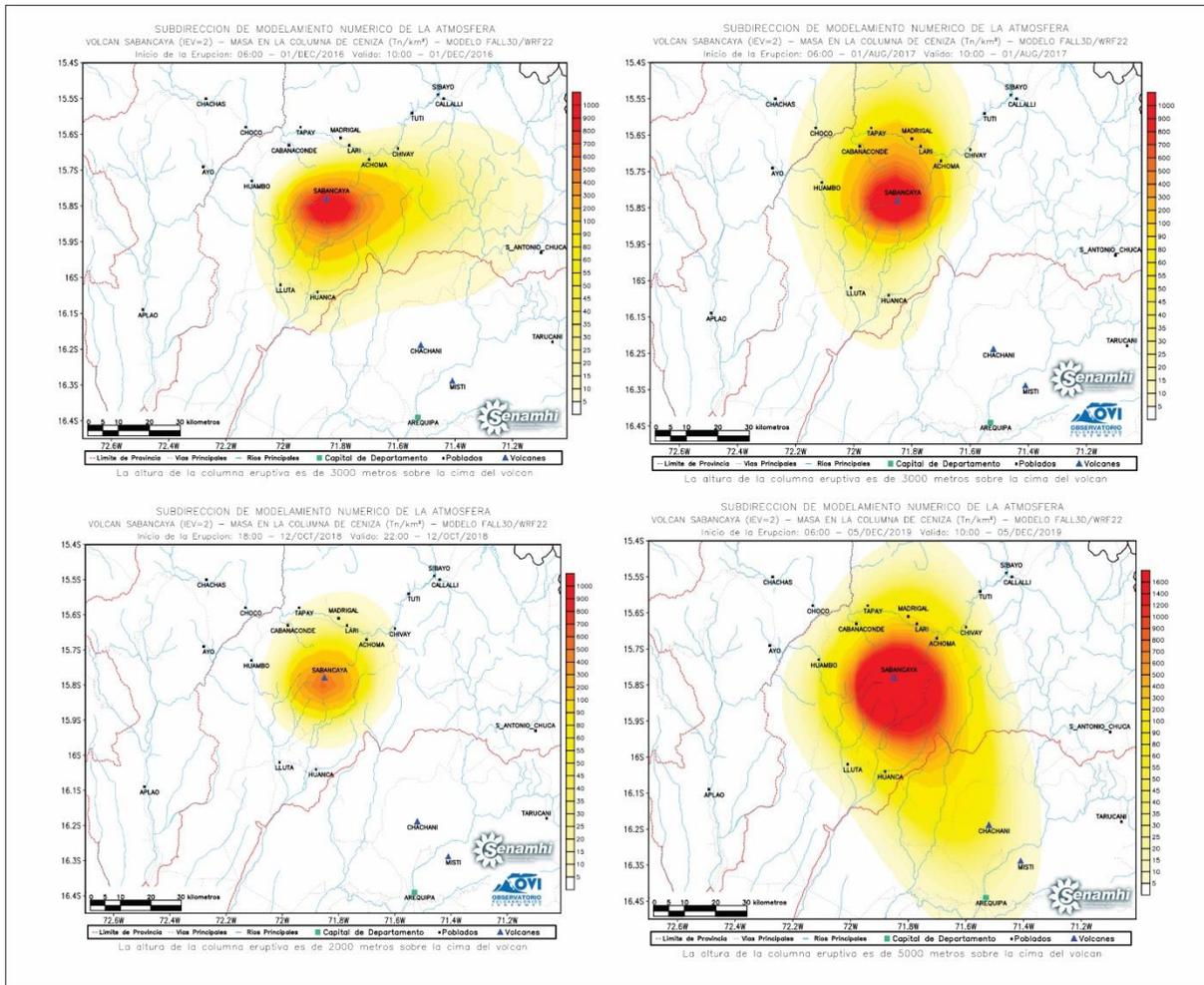


Figura 53. Mapa de dispersión de cenizas del volcán Sabancaya correspondiente a los años 2016, 2017, 2018 y 2019, donde se puede notar que el eje de dispersión es en dirección al NO, N, SE. Datos obtenidos del SENAMHI y el OVI.

3.2.6 INDICE DE CALIDAD DE AIRE

Con los datos obtenidos por parte del monitoreo de calidad del aire en los sectores de Achoma y Maca, se procedió a realizar los cálculos del INCA; para ello se utilizaron las ecuaciones:

$$I(\text{PM}_{10}) = \{\text{PM}_{10}\} * 100/150$$

$$I(\text{PM}_{2,5}) = \{\text{PM}_{2,5}\} * 100/25$$

Tabla 18
Resultados de INCA para un periodo de 24 horas.

Punto de muestreo/INCA	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	I(PM10)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	I(PM2.5)	Categoría
Achoma	13.4	8.93	8.92	35.68	BUENA
Maca	15.58	10.39	2.41	9.64	BUENA

Según los valores INCA en base a los ECAS del monitoreo de calidad del aire, se encuentran en una categoría de BUENA, donde la calidad de aire es satisfactoria y no representa un riesgo para la salud. La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA del aire, a pesar de las cenizas percibidas ocasionalmente emitidas por el volcán Sabancaya, lo cual aclararemos en la discusión.

3.3 MEDIDAS DE GESTIÓN AMBIENTAL

Planificación para emergencias volcánicas:

A diferencia de otros desastres, los desastres volcánicos no son de corta duración. Es necesario repararse, planificar la respuesta concibiendo diferentes escenarios, y tratando de reducir los daños y problemas. Pero es necesario poner los riesgos en perspectiva, y concentrarse en los que de verdad suponen un grave reto para la salud pública y el medio ambiente. El sector salud tiene una gran responsabilidad en la planificación para emergencias volcánicas. Se debe comenzar por recopilar información vital acerca de zonas que tienen volcanes activos o inactivos (OPS, 2002).

Obtener la información adecuada

Conocer dónde se encuentran las zonas de problemas potenciales permite planificar para afrontar posibles desastres; en este caso es el valle del Colca por parte del volcán Sabancaya. Se debe hablar con la defensa civil local o con miembros del comité de emergencias sobre la situación y el potencial de actividad volcánica en la zona. Se debe preguntar a los vulcanólogos acerca de los antecedentes locales de erupciones y si conocen la existencia de mapas de riesgo (OPS, 2002).

Actualmente el Observatorio Vulcanológico de INGEMMET es el ente oficial de estudio y monitoreo de volcanes del sur del Perú. Contamos con un mapa de peligros del volcán Sabancaya, donde se muestran las zonas de peligros volcánicos. A continuación, se presenta el mapa de peligros por caídas

de ceniza. En estos mapas se pueden identificar las poblaciones que se encuentran a mayor riesgo y por ello expuesta a mayor afectación de la calidad del aire.

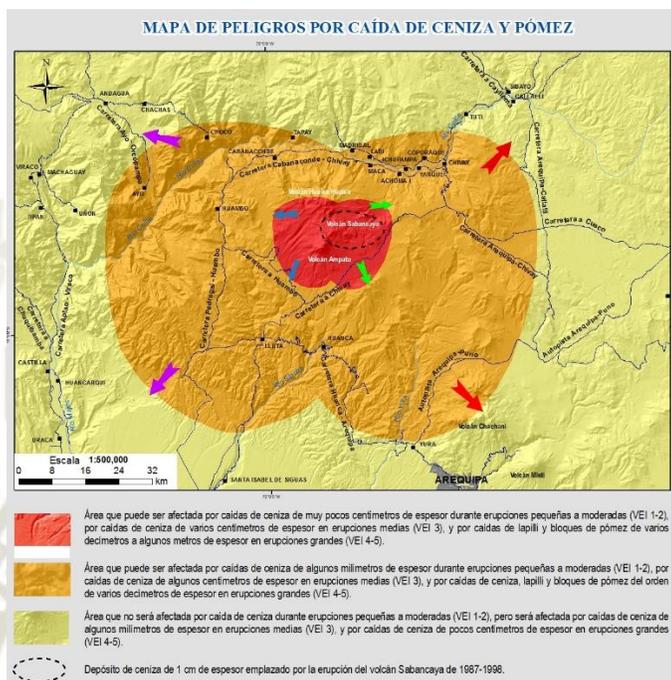


Figura 54. Mapa de peligros por caída de ceniza y pómez del volcán Sabancaya, elaborado por el OVI.

Las medidas de gestión ambiental involucran programas de salud ambiental, Los programas de salud ambiental deben estar enfocados al abastecimiento del agua potable, disposición de excretas y aguas residuales, disposición de residuos sólidos y cadáveres, control de vectores, sanidad animal y zoonosis, manipulación y consumo de alimentos.

Durante la planificación, no debe olvidarse considerar que:

Efectos en el aire:

- La lluvia de cenizas, que a veces se prolonga muchas horas, puede bloquear todos los caminos y reducir la visibilidad durante días hasta que la lluvia viene a eliminar las cenizas del aire (OPS, 2002).

Tal vez haya interrupciones en las telecomunicaciones, incluso por radio y por satélite, a la vez que afecta seriamente al campo de la aviación como ocurrió con la erupción de Eyjafjallajokull (Petersen et al., 2012).

Para ello la población debe estar capacitada para saber manejar estas situaciones. Se recomienda evacuar la zona habitable si la ceniza es bastante. En el caso del volcán Sabancaya, afortunadamente las

partículas volcánicas no causan un mayor impacto en los pueblos alrededor del macizo debido a su lejanía del cráter.

Abastecimiento de agua:

Durante una emergencia volcánica es muy probable que los sistemas de abastecimiento de agua colapsen, bien sea por el impacto de los residuos volcánicos en las estructuras de los sistemas o por la contaminación de los cuerpos de agua de los cuales se abastecen. Esta situación impide utilizar el agua para el consumo humano y uso doméstico (Plan de Emergencia en Caso de Erupción Volcánica, 2005).

Una medida de mitigación para ello es el abastecimiento del agua como medida de la salud ambiental.

Manipulación y consumo de alimentos:

La erupción volcánica puede perjudicar el estado nutricional de la población debido a su impacto sobre uno o varios de los componentes de la cadena alimentaria. Los cultivos pueden quedar quemados, defoliados o enterrados bajo las cenizas. En ocasiones las reservas de alimentos pueden quedar inaccesibles debido a la interrupción de sistemas de distribución (Plan de Emergencia en Caso de Erupción Volcánica, 2005).

Se debe lavar con bastante agua los alimentos recuperados de la afectación de caída de cenizas. Hay algunas variedades de papas que crecen frente a las adversidades de las caídas de cenizas.

Residuos volcánicos:

La ceniza debe ser removida de manera periódica y su manejo requiere procedimientos adecuados ya que puede ocasionar molestias, daños y accidentes.

Por ello, hay que tener presente las características de la ceniza volcánica: puede ser fácilmente transportada por acción del viento, afectando así a comunidades vecinas o fuentes de agua, causar inconvenientes en techos, cañerías, etc. Si entra en contacto con agua y con cemento forma una pasta que puede afectar cañerías, desagües, ocasionando daños severos (Plan de Emergencia en Caso de Erupción Volcánica, 2005).

Luego de una erupción volcánica se debe contar con un sitio adecuado para la disposición de basuras, escombros de edificaciones, árboles y animales muertos, y los residuos volcánicos como cenizas y lodo.

Planificación territorial:

Es importante considerar que el hecho que los pueblos que se encuentran alejados del volcán Sabancaya tienen una mejor planificación territorial en base a la exposición con respecto a las zonas de peligro volcánico; por consiguiente, no representa un riesgo de calidad del aire en el ambiente. No se debe permitir a las comunidades ni a los establecimientos de salud instalarse cerca de volcanes ayudará a evitar defunciones y lesiones y ahorrará dinero a los gobiernos.

Cuando los asentamientos ya se encuentran cerca de un volcán que muestra signos de actividad, es evidente que el mejor plan es la evacuación temprana de las poblaciones a sitios alejados de las zonas expuestas (OPS, 2002).

Participación ciudadana:

La contribución de la comunidad en la planificación de equipos de emergencia antes, durante e inmediatamente después de una erupción es imprescindible; para ello la población debe tener en cuenta a los especialistas que estudian los volcanes, como la principal fuente verídica en caso de una erupción volcánica. En el caso del volcán Sabancaya, se tiene bien capacitada a la población, municipalidad y sectores de salud, con respecto al proceso eruptivo desde el 2016 (OPS, 2002).

Recomendaciones para pobladores:

- Permanezca dentro de su casa. Cierre las puertas, ventanas. Coloque toallas húmedas en los umbrales de las puertas y otras fuentes de corriente de aire.
- Si usted está en el trabajo cuando comienza a caer ceniza, permanezca bajo techo hasta que la ceniza se haya asentado.
- Escuche las emisoras locales de radio por información acerca de la caída de cenizas y planes de limpieza.
- Quítese la ropa que usó en el exterior antes de entrar a casa puede ingresar ceniza con metales a la casa.
- Utilice gafas con protección lateral cuando se encuentre en ambientes al aire libre.

- Si ha estado expuesto a la ceniza y presenta sensación de cuerpo extraño en sus ojos, lávelos con abundante agua. Es preferible utilizar agua potable y hervida. Lávese las manos antes del procedimiento.
- En caso de abundante ceniza, las personas con enfermedades crónicas (asma), adultos mayores y niños deben permanecer en sus viviendas. Solicite la atención médica.
- Lave las verduras y legumbres del jardín antes de comerlas verifique que no haya residuos de ceniza.
- Proteja los dispositivos electrónicos son sensibles al polvo.
- Asegure una buena ventilación abriendo todas las ventanas y puertas antes de iniciar la limpieza de interiores.
- La limpieza de los techos implica graves riesgos en caso de caídas. Infórmese y adopte todas las normas de seguridad y siga todas las recomendaciones para la limpieza y eliminación de la ceniza.
- Si tiene ganado ubíquelo en un lugar seguro donde pueda estar protegido y mantenga una reserva de agua y forraje.

Recomendaciones para autoridades:

- Elaborar modelos de dispersión de la ceniza volcánica del volcán Sabancaya.
- Elaborar un mapa de riesgo ambiental.
- Elaborar y señalizar las rutas de acceso y de evacuación deben estar visibles a la población.
- Implementar una estrategia de comunicación dirigida a la población afectada por la caída de ceniza volcánica.
- Elaboración de material impreso y audiovisual, educativo e informativo de acuerdo a las necesidades que se presentan, en lenguaje claro, sencillo y directo y de excelente calidad, la elaboración debe ser de acuerdo a la competencia de cada sector para no distraer presupuesto.
- Se debe levantar una lista de todos los medios de comunicación existentes y seleccionar aquellos de audiencia en las zonas afectas y los de mayor audiencia a nivel Local.

DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los volcanes en estudio corresponden a la erupción de 1600 d.C. del Huaynaputina y el periodo eruptivo de 2016-2019 del volcán Sabancaya.

En un primer caso la erupción del volcán Huaynaputina afectó en gran medida a las poblaciones circundantes como el poblado de Omate y Quinistaquillas, entre otros. Se ha realizado el estudio de granulometría de las pómez y cenizas del volcán Huaynaputina en coordinación con el Observatorio vulcanológico de INGEMMET y el Laboratorio de Magmas y Volcanes de Francia, obteniendo mayormente tamaños entre 5.6, 4 y 2.8 mm. Esto indica una gran afectación a la población de la época. Muestra de ello son las decenas de pueblos sepultados. Lamentablemente el volcán actualmente se encuentra inactivo, por ello no se puede hacer un monitoreo de calidad del aire, aunque si se lograra, tendríamos resultados positivos y sin afectación al medio ambiente.

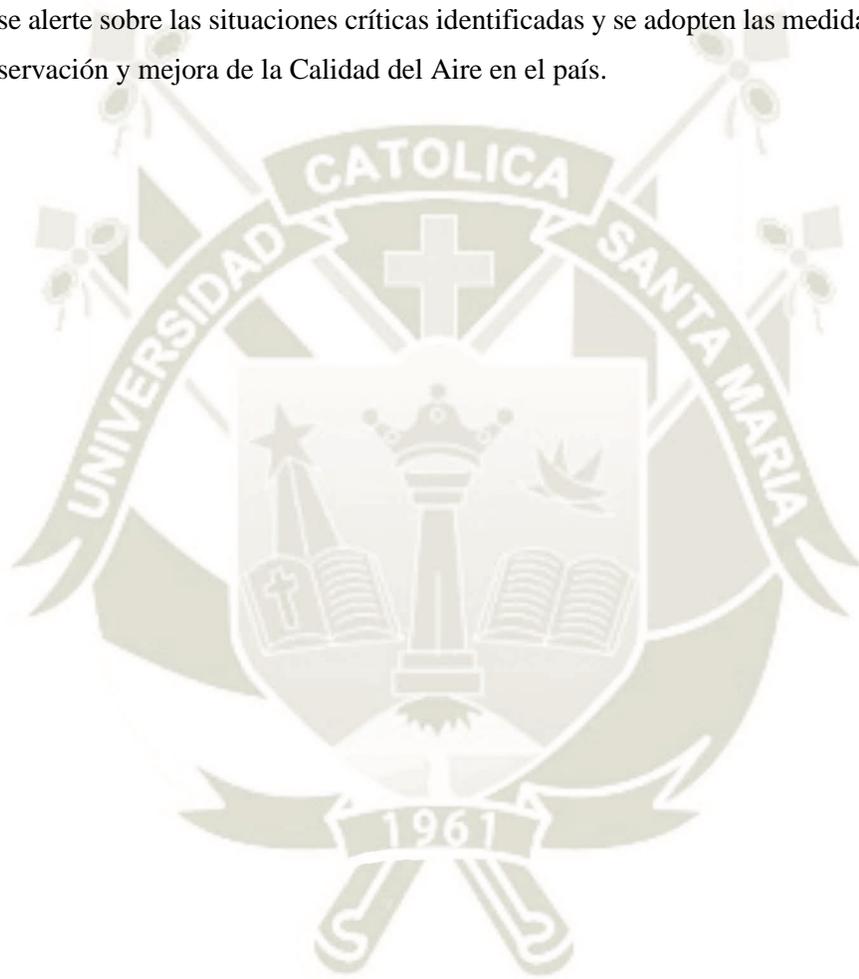
De acuerdo a los resultados obtenidos gracias a un monitoreo de calidad de aire realizado en el valle del Colca, tenemos valores de $13.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10) y $8.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM2.5) para la estación de Achoma; mientras que $15.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10) y $2.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM2.5) para la estación de Maca. Estos datos de concentraciones se encuentran por debajo del valor establecido por el Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire según el D.S. N° 003-2017-MINAM. Cabe considerar que estos datos tienen un margen de error debido a las condiciones climáticas severas presentes alrededor de un volcán.

El programa de Vigilancia de la Calidad de Aire de la Dirección Regional de Salud Moquegua, realizó el diagnóstico de la calidad de aire en la zona circundante al volcán Ubinas en junio del 2014 en Moquegua. Durante el 2006 en los puntos de monitoreo de E-1 Ubinas, E-2 Escacha y E-3 Anascapa, la DIGESA registró una concentración para 24 horas mínima de $18.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una máxima de $49.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no superando los ECAs establecidos en el D.S.074-2001-PCM de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el 2016, las concentraciones para 24 horas de PM10 fueron inferiores a los determinados al año 2014, considerando que fue un periodo muy explosivo (Informe de EVAR – volcán Ubinas – 2014 – Gobierno Regional Moquegua).

Como se puede observar, al realizar una comparación general se puede apreciar que los datos de ECAs del volcán Sabancaya 2020 y Ubinas 2006, los valores no superan los ECAs los estándares del MINAM, considerando que fueron erupciones con emisiones y cenizas leves. Considerar también que un punto favorable para la afectación de las personas asentadas en el valle del Colca por parte del volcán Sabancaya, es su lejanía al cráter del volcán. La topografía de la zona ejerce una gran influencia sobre la

dirección y velocidad de los vientos generando una variabilidad de zonas. El Sabancaya es un volcán que se caracteriza por emitir cenizas constantemente, pero en pocas proporciones de volumen, lo que permite que no afecte radicalmente la calidad del aire de la zona de estudio.

Se observa avances importantes, pero muchos retos por enfrentar. Se espera que la información que se presenta en este primer informe sirva para el conocimiento de la situación de la calidad del aire en el país, se alerte sobre las situaciones críticas identificadas y se adopten las medidas correspondientes para la preservación y mejora de la Calidad del Aire en el país.



CONCLUSIONES

Se ha podido usar la información geológica en temas de estudio de tefro-estratigrafía, granulometría de la erupción del volcán Huaynaputina de 1600 A.C., del periodo actual del volcán Sabancaya, correlacionable con los efectos ambientales de un evento volcánico. Se ha realizado un estudio de la granulometría de 33 muestras de pómez y ceniza obteniendo mayormente tamaños entre 5.6, 4 y 2.8 mm. El nivel de afectación de ceniza de dicha erupción fue muy grande, ya que a pesar de que hubo fragmentos centimétricos que cayeron, la ceniza fina quedó suspendida en el aire por varias semanas, provocando enfermedades y problemas crónicos de Salud.

En la estación de Achoma, al N del volcán Sabancaya, se han obtenido los valores de 13.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10) y 8.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM2.5); mientras que 15.58 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10) y 2.42 92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM2.5) para la estación de Maca, al N-NE del volcán Sabancaya, ambos por debajo de los ECA de Aire. En base a estos resultados se puede apreciar que los valores obtenidos no superan los valores establecidos por el Estándar Nacional de la Calidad Ambiental de Aire según el D.S. N° 003-2017-MINAM, no considerando un riesgo significativo para la calidad de aire y de la salud de las personas.

Se ha calculado los valores INCA con respecto a los cálculos obtenidos del PM 10 y PM 2,5 de las cenizas del volcán Sabancaya, obteniendo de 8.93, 10.39 y 35.68, 9.64 respectivamente. En base de los ECAS de monitoreo de calidad de aire, los valores INCA se encuentran en categoría BUENA, donde no representa un riesgo alto para la salud y el ambiente.

Se ha elaborado medidas de planificación de la calidad del aire para emergencias volcánicas, como medio de remediación del impacto generado en la zona de estudio en los alrededores del volcán Sabancaya, donde se basa en las medidas para convivir con las cenizas del volcán, ya que este tipo de erupciones como el Sabancaya, presentan periodos de duración de varios años.

La Gestión de la Calidad del Aire en el Perú cuenta con una institucionalidad establecida en los niveles nacionales (MINAM, DIGESA, SENAMHI, OEFA, sectores), regional y local, así como la participación del sector privado y sociedad civil, cada día más conscientes de la importancia de la calidad del aire para la salud. Se observa avances importantes, pero muchos retos por enfrentar. Se espera que la información que se presenta en este primer informe sirva para el conocimiento de la situación de la calidad del aire en el país, se alerte sobre las situaciones críticas identificadas y se adopten las medidas correspondientes para la preservación y mejora de la Calidad del Aire en el país.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Adams, N.K.; De Silva, S.L.; Self, S.; Salas, G.; Schubring, S., et al., 2001. The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, Southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 62 (8): 493-518.
- Alfaro S. C., Gaudichet A., Gomes L. and Maillé M., 1998. Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle sizes and binding energies. *Geophysical Research Letters*, 25, 991-994.
- Arciniégas, C., 2011. Diagnóstico y control de material particulado: Partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. *Luna Azul* ISSN 1909-2474.
- Arimoto, R., Nottingham, A.S., Webb, J., 2001. Non-sea salt sulfate and other aerosol constituents at the South Pole during ISCAT. *Geophysical Research Letters / Volume 28, Issue 19*.
- Barriga, V., 1952. *Memorias para la historia de Arequipa*. Imp. Portugal, Arequipa.
- Baxter, P.J., 2000. Gases. In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.-C. Aw, A. Cockcroft and J.M.
- Brasseur, G.P., Orlando, J.J. and Tyndall, G.S., 1999. *Atmospheric Chemistry and Global Change*. Oxford University Press, Oxford. 654.
- CENSO 2017. Perú: Crecimiento y distribución de la población total. XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.
- Concepción J., 2014. *Informe Nacional de la Calidad de Aire 2013 – 2014*. Ministerio del Ambiente del Perú.
- Costa, F. and Scaillet, B., 2003. Massive atmospheric sulfur loading of the AD 1600 Huaynaputina eruption and implications for petrologic sulfur estimates. *Geophysical Research Letters*, 30 (2): 1068.
- Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM – NORMAS LEGALES - EL PERUANO
- Decreto Supremo DS. N° 009-2003-SA – Aprueban el reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminante del Aire.
- Delgado R. 2012. Tesis: Estudio geológico, petrográfico y geoquímico del complejo volcánico Ampato – Sabancaya. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Deligne NI, Coles SG, Sparks RSJ., 2010. Recurrence rates of large explosive volcanic eruptions. *Journal of Geophysical Research* 115: B06203, doi:10.1029/2009JB006554.
- Enriquez, A, 2012. Impacto de las erupciones volcánicas sobre el sistema respiratorio – Revisión de la literatura. Trabajo de fin de Máster en Análisis y Gestión de Emergencias y Desastres. Universidad de Oviedo.
- Elmer Ticona Paucara. 2014. Diagnóstico de la calidad de aire en la zona circundante al volcán San Pedro del distrito de Ubinas. Programa de Vigilancia de la Calidad de Aire. Dirección Regional de Salud Moquegua.
- EPA -Environmental Protection Agency. 1996. *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. EPA. Vol. 1.
- EPA -Environmental Protection Agency. 2004. *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. Volume I of II. EPA/600/P-99/002Af.
- EPA – Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2021). *Volcanes*. <https://espanol.epa.gov/espanol/volcanes#para>.
- Fei, J.; Zhang, D. and Lee, H., 2015. 1600 AD Huaynaputina Eruption (Peru), Abrupt Cooling, and Epidemics in China and Korea. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology* Article ID 958295, p. 13.
- Finlayson-Piits y Pitts, 2000. *Chemistry of the Upper and lower atmosphere: Theory, Experiments, and applications*.
- Folk and Wart 1957. A study in the significance of grain size parameters. *J. Sedim. Petrol.* 27 (1): 3-26.
- 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.

- Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Organización Mundial de la Salud. Resumen de evaluación de los riesgos. Actualización mundial 2005.
- Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales. 2010. Dirección de General de Calidad Ambiental.
- Halmer MM, Schmincke H-U, Graf H-F., 2002. The annual volcanic gas input into the atmosphere, in particular into the stratosphere: a global data set for the past 100 years. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 115: 511-528.
- Gobierno Regional Moquegua, 2014. Informe de evaluación de riesgos en el area de influencia del volcán Ubinas.
- Hochstein, M., & Browne, P., 2000. Surface Manifestations of Geothermal Systems with volcanic heat Sources. En S. e. al (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes* (págs. 835-855). San Diego: Academic press.
- Huanca, 2016. Concentración de material particulado menores a 2.5 micrómetros para la gestión de áreas verdes en la ciudad de Juliaca. Tesis de Pregado – Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- IVHHN., 2002. Guía sobre gases volcánicos y aerosoles.
- Japura, S., 2018. Estudio estratigráfico y sedimentológico del depósito de caída pliniana de la erupción del año 1600 D.C. del volcán Huaynaputina. Tesis de ingeniero, Universidad Nacional del Altiplano.
- Ley General del Ambiente – Ley N° 28611 – Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental – Ley N° 28245 – Reglamento de la Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental – Decreto Supremo N° 008-2005-PCM – Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente- Decreto Legislativo N°1013. Ministerio del Ambiente. Octubre 2005.
- Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómeno volcánico., 2014. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres – CENEPRED.
- MINAM, 2014. Informe Nacional de la calidad del aire 2014 – 2015.
- Navarro, R., 1994. Antología del Valle de Omate. Centro de Publicaciones de la Facultad de Cs. Biológicas Y Agropecuarias UNSA, p. 72.
- Navarro Oviedo R, Jara LA, Thouret J-C, Siebe C, Dávila J, 2000. The AD 1600 eruption of Huaynaputina as described in early Spanish chronicles. *Bol Soc Geol Perú* 90:121–132.
- Nemery, B., Hoet, P.H.M. and Nemmar, A., 2001. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *The Lancet* 357(9257), 704-708.
- Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, 2015. Monitoreo de los volcanes Coropuna, Ticsani y Tutupaca, 2015. Informe técnico.
- Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, 2017. Evaluación del proceso eruptivo del volcán Sabancaya, Arequipa. Informe técnico N° A 6771.
- Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, 2019. Informe técnico anual del volcán Sabancaya periodo 2018, Arequipa. Informe técnico N° A 6951.
- Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, 2019. Informe Técnico N° A6969. Erupción del volcán Sabancaya 2016-2019: Emplazamiento de domo de lava en el cráter.
- Organización Panamericana de la Salud – OPS, 2002. Los volcanes y la protección de la salud. Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud.
- Organización Panamericana de la Salud, 2005. Guía de preparativos de salud frente a erupciones volcánicas. Módulo 4: Salud ambiental y el riesgo volcánico. Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Quito, Ecuador.
- OMS, 2018. Organización Mundial de la Salud, calidad del aire y salud.
- Petersen G. N., Bjornsson H., Arason P., 2012. The impact of the atmosphere on the Eyjafjallajokull 2010 eruption plume. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117.
- Plan de Emergencia en Caso de Erupción Volcánica, 2005. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social – República de el Salvador en la América Central.
- Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire. 2019. Ministerio del Ambiente.

- Rodríguez M., 2003. Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Tesis del Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica de la Universidad de Barcelona.
- 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.
- Seinfeld, J., y Pandis, S., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1323p.
- Self S., 2006. The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 364: 2073-2097.
- Sierra, M., 2012. Las cenizas, gases volcánicos y la salud respiratoria. *Neumol Cir Torax*.
- Spence, J. 2005. The effect of exercise on Global Self-Esteem: A quantitative review. *Journal of Sport and Excercise Psychology* 27(3):311-334.
- Stoffel, M.; Khodri M.; Corona, C.; Guillet, S.; Poulain, V.; Bekki, S.; Guiot, J.; Luckman, B.; Oppenheimer, C.; Lebas, N.; Beniston, M.; Masson-Delmotte, V, 2015. Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1,500 years. *Nature Geoscience*.
- Thouret J. C., Gourgaud A., Uribe M., Guillaude y R., Salas G., 1994. publicaron un estudio sobre “La actividad eruptiva actual del volcán nevado Sabancaya (Sur del Perú): reconocimiento geológico, evaluación y cartografiado de las amenazas volcánicas” en el Boletín de la Sociedad Geológica de Francia N° 165, Vol. 1, 49-63.
- Thouret J. C., Jasmine Davila, and Jean-Philippe Eissen., 1999. Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina Volcano, A.D. 1600, southern Peru. *Geology*. v. 27; no. 5; p. 435-438.
- Thouret, J. -C.; Juvigné, E.; Gourgaud, A. and Boivin, P. & Dávila, J., 2002. Reconstruction of the AD 1600 explosive eruption at Huaynaputina volcano, Peru, based on geologic evidence and 85spanish chronicles. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, (3-4): 529-570.
- Valdivia, 2019. Muestreo de cenizas en los alrededores del volcán Sabancaya. Informe Técnico N° A6954. INGEMMET.
- Walker, G., 1971. Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *J. Geol.*, 79, 696-714 p.
- Warneck, P., 1988. *Chemistry of the natural atmosphere*. International Geophysics Series. Vol. 41. Wiley & Sons. Academy Press. 757p.
- Who, 2002. *The world health report 2002: Reducing risks, promoting healthy life*, World Health Organization, Geneva.
- Wohletz, K. H., 1983. Mechanisms of hydrovolcanic pyroclast formation: grain-size, scanning electron microscopy, and experimental studies. *J. Volcanol. Geotherm. Res*, 17, 31-63.
- Zimanowsky B., Wohletz K., Dellino P., Buttner R. 2003. The volcanic ash problem. *Journal of Volcanology and Geothermal Rsearch*. 122. 1-5.

ANEXOS

RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE ESTACIÓN METEREOLÓGICA AIR-01

Tabla N°1: Datos meteorológicos de la estación AIR-01

DATOS METEREOLÓGICOS AIR-01								
08/10/2020			AL			09/10/2020		
Estación de Monitoreo					Barlovento			
N°	Fecha de Muestreo	Hora de Muestreo	Temperatura Ambiental (°C)	Precipitación (mm)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	Dirección del Viento	Presión Atmosférica (mmHg)
1	08/10/2020	11	15,1	0	15	0,9	SW	506,6
2	08/10/2020	12	13,7	0.6	53	4,5	S	506,7
3	08/10/2020	13	17,4	0	40	1,8	WNW	506,1
4	08/10/2020	14	15,3	0	49	3,6	WNW	506
5	08/10/2020	15	14,7	0	49	4	W	506,3
6	08/10/2020	16	14,2	0	54	3,6	W	506
7	08/10/2020	17	12,9	0	55	2,7	WNW	506,1
8	08/10/2020	18	11,4	0.2	68	2,2	NW	507,8
9	08/10/2020	19	8,3	2.4	83	2,2	W	508,1
10	08/10/2020	20	7,8	2	86	1,8	W	508,6
11	08/10/2020	21	7,7	0	83	0,9	NW	510,2
12	08/10/2020	22	7,5	0	88	0,9	WNW	510,6
13	08/10/2020	23	7,6	0	87	0	ESE	510,3
14	09/10/2020	0	7,2	0	86	0	ESE	510
15	09/10/2020	1	7,3	0	86	0,9	SSE	509,8
16	09/10/2020	2	7,4	0	85	0	SSE	509,3
17	09/10/2020	3	6,7	0	85	0,4	SSE	509,1
18	09/10/2020	4	6,4	0	82	0,9	SE	509,5
19	09/10/2020	5	6,2	0	82	0,9	SE	511,1
20	09/10/2020	6	7	0	80	0,4	SE	511,7
21	09/10/2020	7	8,3	0	68	0,4	SSE	509,5
22	09/10/2020	8	11,1	0	44	1,7	S	508,3
23	09/10/2020	9	13,1	0	23	0	SW	507,6
24	09/10/2020	10	13,3	0	20	0,9	SW	507,5
PROMEDIO			10,31	0,22	64,62	1,43	SSW	508,45
VALOR MAXIMO			17,4	2,4	88	4,5		511,7
VALOR MINIMO			6,2	0	15	0		506

Nota:

"N": Norte; "NE": Nor-Este; "NNE": Nor-Nor-Este; "NW": Nor-Oeste; "NNW": Nor-Nor-Oeste;
 "S": Sur; "SE": Sur-Este; "SSE": Sur-Sur-Este; "SW": Sur -Oeste; "SSW": Sur-Sur-Oeste;
 "E": Este; "ENE": Este-Nor-Este; "ESE": Este-Sur-Este;
 "W": Oeste; "WNW": Oeste-Nor-Oeste; "WSW": Oeste-Sur-Oeste

CALMA: Velocidad del viento de 0 a 0.2 m/s
VENTOLINA: Velocidad del viento de 0.3 a 1,5 m/s
 Elaborado por: Bioterra Consultores Asociados S.A.C

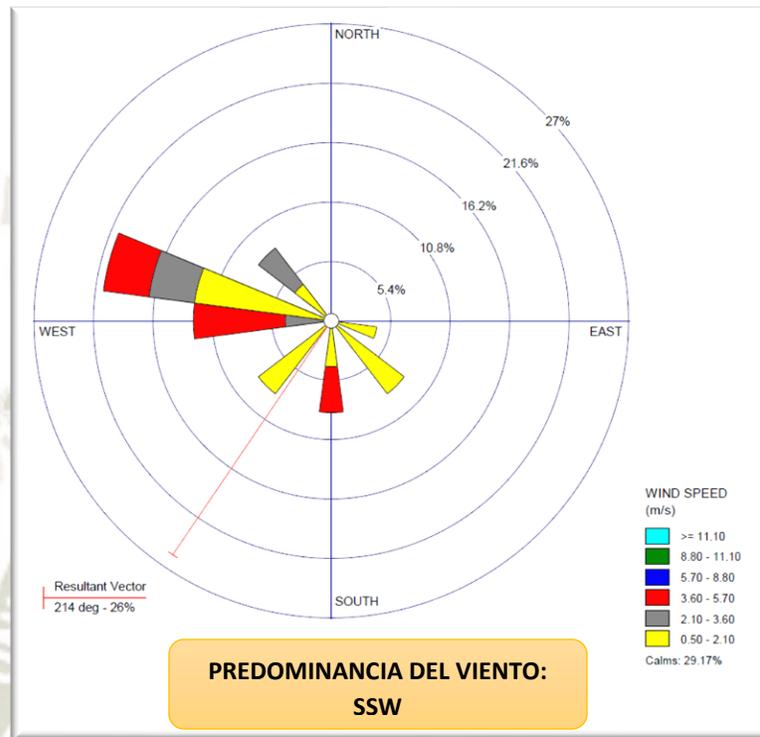


Figura N°1: Rosa de Viento

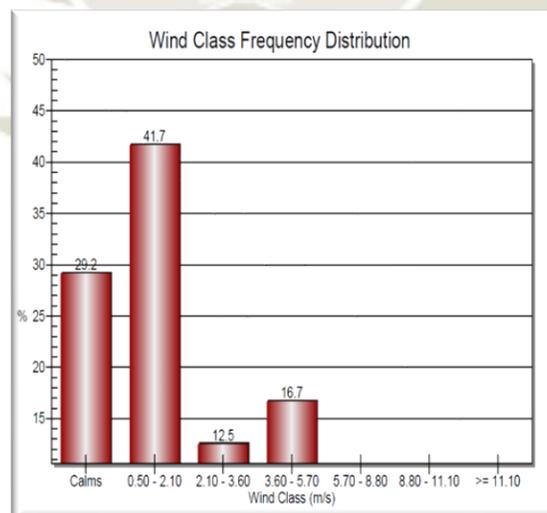


Figura N°2: Distribución de frecuencia de vientos

Tabla N°2: Datos meteorológicos de la estación AIR-02

DATOS METEREOLÓGICOS AIR-02								
08/10/2020			AL			09/10/2020		
Estación de Monitoreo					Barlovento			
N°	Fecha de Muestreo	Hora de Muestreo	Temperatura Ambiental (°C)	Precipitación (mm)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	Dirección del Viento	Presión Atmosférica (mmHg)
1	08/10/2020	12	15,7	0	29	2,2	W	516,6
2	08/10/2020	13	20,1	0	32	2,7	WNW	517,5
3	08/10/2020	14	16,6	0	40	4,9	WNW	517,4
4	08/10/2020	15	16,1	0	43	4,9	WNW	517,3
5	08/10/2020	16	15,6	0,2	47	3,1	WNW	517,3
6	08/10/2020	17	14,8	0	48	2,7	NW	517,7
7	08/10/2020	18	13,7	0,6	63	3,1	WNW	518,6
8	08/10/2020	19	10,2	0,8	81	3,1	WNW	519,8
9	08/10/2020	20	8,7	0,2	85	0,4	WSW	520,2
10	08/10/2020	21	8,6	0	84	0,9	W	520,2
11	08/10/2020	22	8,4	0	84	0	NE	520,3
12	08/10/2020	23	8,3	0	83	0	ESE	519,9
13	09/10/2020	0	8	0	86	0	SSE	519,6
14	09/10/2020	1	6,8	0	86	0	SSE	519,3
15	09/10/2020	2	7,2	0	87	0	SSW	519
16	09/10/2020	3	6,3	0	84	0	S	518,7
17	09/10/2020	4	4,9	0	85	0,4	SSE	518,5
18	09/10/2020	5	3,9	0	88	0	SSE	518,7
19	09/10/2020	6	3,3	0	89	0	SSW	518,9
20	09/10/2020	7	8,4	0	71	0	SE	519,2
21	09/10/2020	8	11,8	0	56	0,9	S	519,3
22	09/10/2020	9	12,5	0	44	0,9	SSW	516,5
23	09/10/2020	10	13,3	0	38	1,3	SSW	517
24	09/10/2020	11	14,4	0	33	1,8	SSW	516,3
PROMEDIO			10,73	0,075	10,73	1,35		518,49
VALOR MAXIMO			20,1	0,8	20,1	4,9	SW	520,3
VALOR MINIMO			3,3	0	3,3	0		516,3

Nota:

"N": Norte; "NE": Nor-Este; "NNE": Nor-Nor-Este; "NW": Nor-Oeste; "NNW": Nor-Nor-Oeste;

"S": Sur; "SE": Sur-Este; "SSE": Sur-Sur-Este; "SW": Sur -Oeste; "SSW": Sur-Sur-Oeste;

"E": Este; "ENE": Este-Nor-Este; "ESE": Este-Sur-Este;

"W": Oeste; "WNW": Oeste-Nor-Oeste; "WSW": Oeste-Sur-Oeste

CALMA: Velocidad del viento de 0 a 0,2 m/s

VENTOLINA: Velocidad del viento de 0,3 a 1,5 m/s

Elaborado por: Bioterra Consultores Asociados S.A.C



Figura N°3: Rosa de Viento

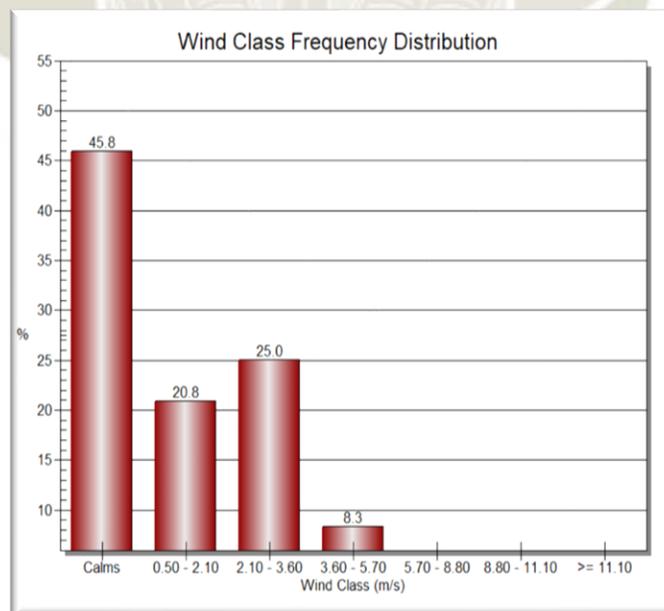


Figura N°4: Distribución de frecuencia de vientos