

Análisis de las Caídas Piroclásticas "Sandwich" Originadas por Erupciones Plinianas del Volcán Misti en el Pleistoceno Superior, para evaluar el Peligro Volcánico en la Ciudad de Arequipa

Gian Escobar¹

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú - gm.escobar7@gmail.com

Palabras clave: Misti, caída piroclástica, mapa de peligros.

El volcán Misti, clasificado como volcán activo y considerado el más peligroso del sur peruano, está ubicado a 17 km al noreste de la ciudad de Arequipa. En los últimos 33.7 mil años este volcán ha tenido por lo menos 11 erupciones sub-plinianas a plinianas, de las cuales la octava y novena erupción están ligados a los depósitos de caída piroclástica denominados "Sandwich Inferior" (SI) y "Sandwich Superior" (SS) de una edad aproximada de ~ 9 y ~8.5 ka respectivamente.

Los depósitos SI y SS tienen un alcance de 15.1 y 15.3 km distribuidos en un área semielíptica de 197.7 km² y 202.07 km² en el flanco suroeste del Misti.

Debido a la peligrosidad que este volcán representa para la ciudad de Arequipa (con más de un millón de habitantes), se hicieron cálculos de los parámetros eruptivos de las erupciones ligados a los depósitos mencionados, con el objetivo de caracterizarlos, modelarlos y finalmente determinar el posible alcance areal.

TRABAJOS DE CAMPO

Los trabajos de campo en depósitos de caída piroclástica involucran la exploración de capas en cortes de quebrada, carretera, calicatas, bofedales.

Las zonas exploradas por depósitos de SI y SS están basadas en la información de estudios previos de depósitos guía como "Sacarosa", "2 ka", "Autopista". Estos depósitos de caída del Misti se encuentran en su mayor parte en un área semielíptica (eje mayor -15 km) al suroeste del cráter, sin embargo, no se descartó la exploración en zonas complementarias.

Los datos obtenidos fueron: descripción estratigráfica, sedimentológica, petrográfica, máximo pómez (MP), máximos líticos (ML), espesor de capa, coordenadas UTM, registro fotográfico. Las muestras procesadas fueron: muestra completa (bulk), muestra de MP y ML, muestras de geoquímica (de tefra fresca, no alterada).

Caracterización sedimentológica, petrográfica, granulométrica y geoquímica

Los depósitos de caída SI y SS han sido descritos anteriormente como un solo depósito de caída al cual denominaron "Sandwich" (Mariño et al., 2016), estos se encuentran divididos por una capa de material retrabajado de pómez subredondeadas dentro de una matriz limosa o paleosuelo. Generalmente en los afloramientos se encuentran ambos.

En ambos depósitos se tienen tefras con "mingling" las cuales muestran bandas blancas finas intercaladas con marrones (indicador de la mezcla de dos magmas).

El depósito de caída de lapilli SI, está constituido por pómez (20%), escorias (67%), "mingling" (1%), líticos cogenéticos (11%) y líticos xenolíticos (1%) como se observa en la Fig. 1. Los espesores de capa encontrados varían de 64 cm (6.2 km del cráter) a 8 cm (14.3 km del cráter) generalmente muy bien preservados y con buena clasificación.

Las pómez (59.05 % de SiO₂) y escorias (58.97 % de SiO₂) son de una composición andesítica calcoalcalina (2.1% de K₂O para pómez y 1.86% de K₂O para escorias) de mediana a fuertemente potásico.

Las escorias son de color marrón, presentan vesículas subredondeadas (37.2%) y cristales de: plagioclasas (19%), anfíboles (1%), clinopiroxenos (16%), óxidos de Fe-Ti (16%) y ortopiroxenos (1%).

Las pómez son de color blanco, presentan textura microvesicular (35.6%) y cristales de: plagioclasas (20%), anfíboles (2%), clinopiroxenos (15%) y óxidos de Fe-Ti (3%). Estas pómez están distribuidas en toda la capa, pero tienen cierta concentración en la parte inferior de ella (característica más visible en aquellos afloramientos más cercanos al cráter del Misti).

El tamaño máximo del eje mayor de escoria y/o pómez encontrada es de 8.2 cm.

Las escorias con "mingling" se localizan en toda la capa, pero tienen cierta abundancia en la parte intermedia y superior de ella.

Los líticos presentes son grises oscuros (11%) angulares a subangulares y pardos grisáceos (1%) subangulares.

Las pómez (60.19 % de SiO₂) y escorias (58.74 % de SiO₂) son de una composición andesítica calcoalcalina (2.28% de K₂O para pómez y 2.08% de K₂O para escorias) de mediana a fuertemente potásico.

Las escorias son de color marrón a marrón oscuro, presentan vesículas subredondeadas a irregulares (32.2%) y cristales de: plagioclasas (18%), anfíboles (3%), clinopiroxenos (17%), óxidos de Fe-Ti (4%) de y ortopiroxenos (1%).

Las pómez son de color blanco grisáceo, presentan una textura microvesicular (27.5%) y cristales de: plagioclasas (23%), anfíboles (1%), clinopiroxenos (19%) y óxidos de Fe-Ti (4%). Estas pómez están distribuidas en toda la capa, pero tienen cierta concentración en la parte inferior (a comparación del SI es más escasa), en afloramientos proximales esta característica es más evidente y en los distales raramente lo es.

El tamaño máximo del eje mayor de escoria y/o pómez encontrada es de 9.8 cm.

Los líticos presentes son grises oscuros (11%), grises claros (2%) y rojizos (1%) sub angulares. Los líticos rojizos podrían indicar del contacto del magma en su ascenso con una zona hidrotermalizada.

El depósito de caída SS casi siempre sobreyace inmediatamente la capa intermedia que lo separa del "Sandwich Inferior", en el resto de ocasiones sobreyace depósitos como el "Rosado" y "Autopista" con capas intermedias de paleosuelo o material retrabajado.



► Fig. 1 - Componentes litológicos de la caída del "Sandwich Inferior" (malla 4 mm). a). Escoria. b). Pómez. c). Líticos cogenéticos. d). Líticos no juveniles pardos grisáceos.

En caso del depósito de caída de lapilli SS, está constituido por pómez (13%), escorias (72%), "mingling" (1%), líticos cogenéticos (11%), líticos xenolíticos o accesorios (2%) y líticos oxidados (1%) como se observa en la Fig. 2. Los espesores de capa encontrados varían desde 31 cm (zona proximal) a 8 cm (zona distal). Regularmente la parte superior de la capa tiene una preservación incompleta y/o retrabajada y/o alterada (patina rojizas y blancas); sin embargo, toda la capa tiene una buena clasificación.



► Fig. 2 - Componentes litológicos de la caída del "Sandwich Superior" (mallas 8 y 4 mm). a). Escoria. b). Pómez (vesículas menos densas que el "Sandwich Inferior". c). Líticos cogenéticos. d). Líticos no juveniles grisáceos claros. e). Líticos no juveniles rojizos.

CORRELACIÓN TEFRO-ESTRATIGRÁFICA

Los depósitos del "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior" estratigráficamente corresponden a dos de los doce depósitos de caída con mayor presencia en los afloramientos en el flanco suroeste del Misti, cada uno de ellos está ligado a una erupción subpliniana o pliniana de este volcán en por lo menos los últimos 33.7 ka ("Sacarosa").

Caracterizados y nombrados del más antiguo al más reciente en la siguiente secuencia tenemos las caídas piroclásticas de: "Fibroso I", "Sacarosa" (Cuno, 2019), "Fibroso II", "Blanco", "La Zebra", "Autopista" (Cacya, 2006), "Espuma gris", "Espuma iridiscente" (Harpel et al, 2018), "Sandwich Inferior", "Sandwich Superior", "Rosado" y "2 ka" (Harpel et al., 2011).

Cada uno de los depósitos mencionados tuvo el potencial de emitir caídas piroclásticas, corrientes de densidad piroclástica (CDP) y lahares. De los estudios realizados aún no se tiene un registro completo de todos los eventos eruptivos del Misti, es por ello que, relacionar caídas, CDP y lahares a un solo evento eruptivo (mediante geoquímica, petrografía, datación, etc.) ayudara a comprender mejor el peligro que representa la erupción de este volcán para la ciudad de Arequipa y sus alrededores.

PARÁMETROS Y MODELAMIENTO ERUPTIVO

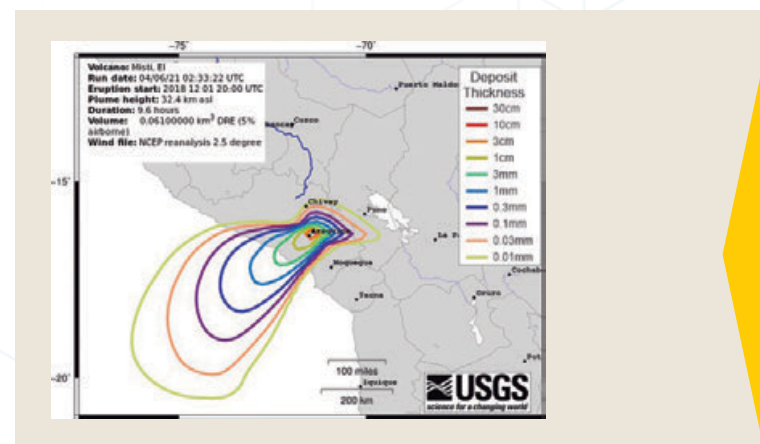
Los principales parámetros de una erupción (PE) son: volumen depositado (VD), volumen del magma (volumen de densidad de roca equivalente, VM), altura de la columna eruptiva (HT), velocidad del viento (VW), tasa de descarga de masa (tasa de masa eruptiva, TDM), tasa de descarga de volumen (TDV), duración de la erupción (DE), estilo eruptivo (EE), índice de explosividad volcánico (IEV), intensidad (I) y magnitud (M).

El cálculo de estos parámetros dependió principalmente de los mapas de isópacas e isopletas elaborados a partir de datos de espesor de la capa, diámetro mayor de los máximos pómez (MP) y máximos líticos (ML) con su respectivas coordenadas UTM de campo. Además del análisis de estos mapas se obtuvieron los ejes de dispersión de los depósitos del SI y SS.

Tabla 1. Parámetros eruptivos (PE) de las erupciones ligadas a los depósitos del SI y SS.

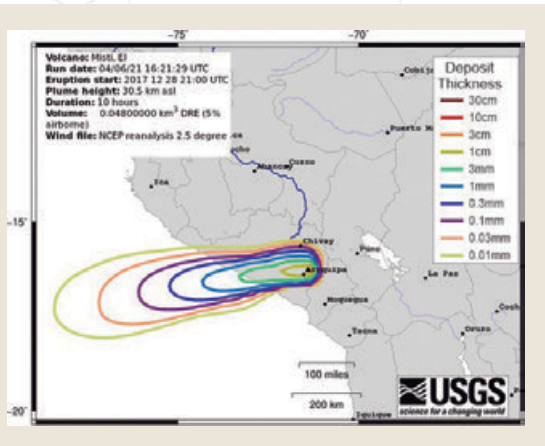
PE	Método	SI	SS
VD (m ³)	Bonadona & Costa (2012)	6.1x10 ⁷	4.8x10 ⁷
VM (m ³)	Segura (2016)	2.4x10 ⁷	1.9x10 ⁷
HT (km)	Carey & Sparks (1986)	26.6	24.7
VW (m/s)	Carey & Sparks (1986)	13.3	25.3
TDM (kg/s)	Mastin et al. (2010)	~1.2x10 ⁸	~0.9x10 ⁸
TDV (m ³ /s)	Sparks et al. (1997)	4.4x10 ⁴	3.3x10 ⁴
DE (horas)	(1980)	9.6	10.0
EE	Bonadona & Costa (2013)	Pliniano	Pliniano
IEV	Newhall and Self (1982)	2-5	2-4
I	Pyle (2000)	11.1	11
M	Pyle (2000)	3.8	3.7
Eje de dispersión		SW y SSW	WSW y SW

Los métodos mencionados en la Tabla 1 fueron elegidos después de una comparación con otros antiguos y recientes, por ser aquellos que mejor representan el análisis de campo.



► **Fig. 3 – Simulación de dispersión de ceniza en caso se diera una erupción similar a la que origino los depósitos del SI en condiciones climáticas del día 01-12-2018, comenzando a las 20:00 horas con una duración de 9.6 horas.**

El modelamiento eruptivo se realizó en base a la altura de la columna eruptiva, duración de la erupción y al volumen depositado, parámetros requeridos en el uso del programa ASH3D del USGS. Se escogió un día con condiciones climáticas promedio en la ciudad de Arequipa, obteniendo así la Fig. 3 y Fig. 4.



► Fig. 4 – Simulación de dispersión de ceniza en caso se diera una erupción similar a la que originó los depósitos del SS en condiciones climáticas del día 28-12-2017, comenzando a las 21:00 horas con una duración de 10 horas.

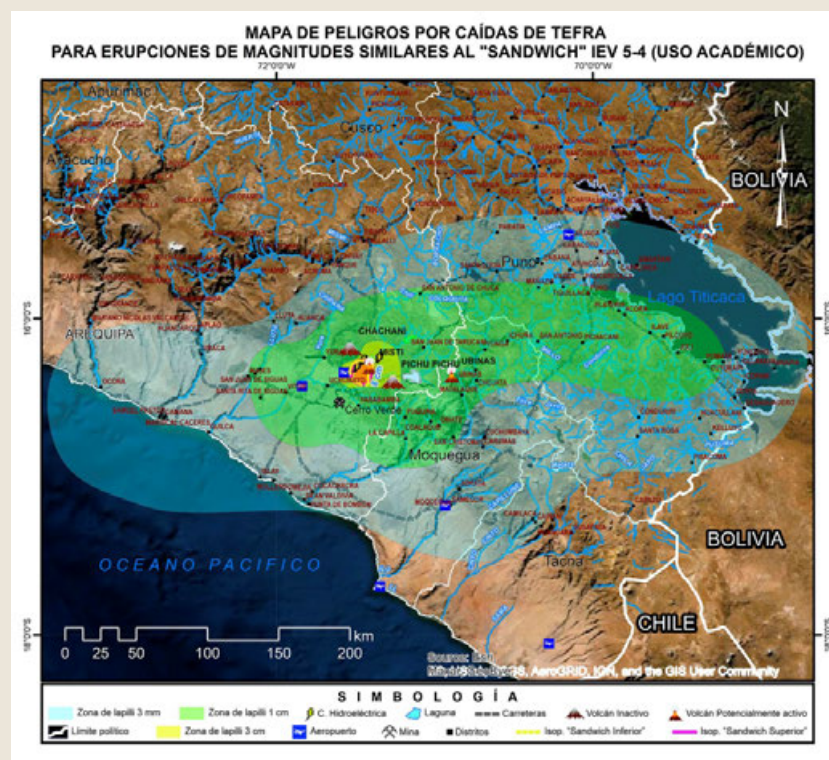
MAPA DE PELIGROS POR CAÍDA PIROCLÁSTICA

La elaboración de un mapa de peligros requiere una basta cantidad de modelamientos en distintos softwares similares al ASH3D además de un registro de datos climatológicos de por lo menos diez años.

Para la tesis de este trabajo se realizó un mapa en base al modelamiento de 24 erupciones similares a las que depositaron el SI y SS.

Ya que el software ASH3D necesita especificar el día del evento, estos días fueron escogidos según el análisis de la base de datos del registro de 8 años de la estación meteorológica de Chiguata (SENAMHI), teniendo en cuenta aquellos más representativos y probables.

El resultado fue un Mapa de Peligros por Caída de Tefra de Uso Académico, por el cual podemos entender básicamente el peligro que representa el volcán Misti para la ciudad de Arequipa y sus alrededores, como se observa en la Fig. 5.



► Fig. 5 – Mapa que muestra tres zonas de caída de lapilli: celeste (zona que puede acumular capas de entre 3 mm y 1 cm de espesor), verde (zona que puede acumular capas entre 1 cm y 3 cm de espesor) y amarilla (zona que puede acumular capas mayores a 3 cm de espesor). La acumulación es mayor según su proximidad al cráter del Misti.

El mapa de la Fig. 5, revela espesores de hasta 3 mm de lapilli de tefra en un área semielíptica de 83,754 km² y tres ejes menores. Sus dos puntos más distales son a ~294 km al este-noreste y 220 km al oeste-suroeste

(desde el cráter), abarcando casi el área total del lago Titicaca y Moquegua, el ~50% del sur de Arequipa y Puno, llegando hasta la localidad de Achacachi en Bolivia, Mirave en Tacna, 208 km de playas y ~31 millas del Océano Pacífico.

CONCLUSIONES

El análisis de depósitos del "Sandwich Inferior" (SI) y "Sandwich Superior" (SS) reveló las características de dos erupciones plinianas del volcán Misti ocurridas entre 33.7 ka y 2 ka,

Las erupciones involucraron la fragmentación magmática de dos magmas andesíticos calcoalcalinos de mediana a fuertemente potásico que le dieron la peculiaridad de expulsar principalmente pómez, escorias y "mingling". El inicio de la actividad eruptiva fue brusco, no tuvo evento previo y la culminación fue gradual. El inicio de la actividad involucro magma más ácido (debido a ello se tiene la presencia de una ligera concentración de pómez en la parte inferior de la capa depositada), pero el magma predominante fue más básico (escorias predominantes en toda la capa). Las columnas eruptivas alcanzaron una altura máxima de 26.6 y 24.7 km, fueron influenciadas por vientos con una dirección inicial hacia el suroeste y oestesuroeste, las erupciones duraron 9.6 y 10 horas, depositando 6.1×10^7 y 4.8×10^7 m³ de tefra en un área semielíptica hacia el suroeste del volcán Misti, los estilos eruptivos fueron plinianos y sus IEVs máximos fueron de 5 y 4; respectivamente para el SI y SS.

Si las erupciones mencionadas se dieran en la actualidad podrían alcanzar hasta el océano pacífico y el lago Titicaca, afectando las poblaciones, economía, infraestructuras, fauna, medio ambiente a lo largo de su recorrido. Por tal el análisis de depósitos volcánicos ayudará a entender el peligro que representa una erupción y nos dará las bases para poder planificar la mitigación de su impacto.

AGRADECIMIENTOS

Al FONDO NACIONAL DE DESARROLLO CIENTÍFICO, TECNOLÓGICO Y DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (FONDECYT) y al INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO (INGEMMET) quienes han financiado (Convenio N° 158-2017) el proyecto de investigación científica básica titulado: "Determinación de los periodos de recurrencia y procesos desencadenantes de erupciones explosivas recientes de los volcanes Misti y Chachani: implicaciones en la prevención del riesgo volcánico en Arequipa" a cargo de la investigadora principal M.Sc. Nérida Manrique Llerena.

Así mismo al Dr. Christopher Harpel (asociado investigador del VDAP, del Servicio Geológico de Estados Unidos), M. Sc. Rigoberto Contreras Aguilar, M. Sc. Edu Taípe Maquerhua (Coordinador del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET) y Dr. Marco Rivera Porrás (Investigador Científico Principal en el Instituto Geofísico del Perú) por su asesoría, apoyo, conocimientos y paciencia en la elaboración de la tesis de la cual se ha realizado este resumen.

REFERENCIAS

- ▶ Biass S., Bagheri G., Bonadonna C. (2015). A Matlab implementation of the Carey and Sparks (1986) model. <https://vhub.org/resources/3922>.

- ▶ Bonadonna C. & Costa A. (2012). Estimating the volume of tephra deposits: a new simple strategy. *Geology* 40(5):415-418
- ▶ Bonadonna C. and Costa A. (2013). Plume height, volume, and classification of explosive volcanic eruptions based on the Weibull function. *Bulletin of Volcanology*, 75, 742.
- ▶ Bonadonna C., Connor C.B., Houghton B.F., Connor L., Byrne M., Laing A., Hincks T.K. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *J Geophys Res* 110(B03203):1-21.
- ▶ Cacya L. (2006). Volcán Misti: Sedimentología, geoquímica y correlación tefro-estratigráfica del depósito de caída de pómez "Autopista" ~ 14000 años. Tesis Ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 85 p.
- ▶ Harpel C.J., Cuno J.J., Cueva K., Japura S., Cabrera M., Soncco Y. & Rivera M. (2018). "Tefroestratigrafía preliminar de erupciones explosivas del volcán Misti (Arequipa, Perú) desde la "Autopista" y sus implicaciones para los peligros volcánicos, Foro Internacional: Los Volcanes y su Impacto. Arequipa. Perú, 2018, p2.
- ▶ Harpel C.J., De Silva S.L. & Salas, G. (2011) - The 2 ka eruption of Misti volcano, southern Peru – the most recent plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. Boulder, CO: Geological Society of America, 72 p. Special Paper, 484.
- ▶ Mariño, J.; Rivera, M.; Thouret, J.-C. & Macedo, L. (2016) - Geología y evaluación de peligros volcánicos del volcán Misti, INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 60, 170 p.
- ▶ Mastin L.G., Guffanti M., Servranckx R., Webley P., Barsotti S., Dean K., Durant A., Ewert J.W., Neri A., Rose W.I., Schneider D., Siebert L., Stunder B., Swanson G., Tupper A., Volentik A. & Waythomas. C.F. (2010). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 186. 10-21. 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- ▶ Pyle D.M. 2000. Sizes of Volcanic Eruptions. *Encyclopedia of Volcanoes*. Editor. Sigurdsson, H. foreword by Ballard, R. D. pp 1359.
- ▶ Rivera M. 2009. Estudio de productos emitidos por el volcán Misti durante los últimos 10,000 años. Informe técnico, Geología Ambiental, INGEMMET, 39 p.
- ▶ Segura A. (2016). Erupción subpliniana de abril de 2015 del volcán Calbuco, Andes del Sur: génesis, dinámica y parámetros físicos de la columna eruptiva y depósitos piroclásticos de caída asociados. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Chile. p. 111.
- ▶ Sparks R.S.J. (1986). The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology* 48 (1), 3-15.
- ▶ Thouret J.C., Finizola A., Fornari M., Legeley-Padovani A., Suni J. & Frechen M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610.