

Estudio de los depósitos de ceniza del volcán Tungurahua-2010: Transición del estilo eruptivo

Bustillos J.*, Le-Pennec J**, Samaniego P**, Eychenne J**, Troncoso L*, Ordóñez J.*, Gonza T***,

*Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN)
jbustillos@igepn.edu.ec; ltroncoso@igepn.edu.ec; jordonez@igepn.edu.ec

**Laboratorio Magmas et Volcans, Clermont Ferrand - Francia
jeanluc.lepennec@ird.fr; J.Eychenne@opgc.univ-bpclermont.fr; pablo.samaniego@ird.fr

***Facultad de Geología y Petróleos – Escuela Politécnica Nacional (FGP-EPN)
taty.nena@hotmail.com

Resumen: El volcán Tungurahua desde su reactivación en 1999 ha alternado fases de elevada actividad volcánica, caracterizada por fuertes emisiones de gas y ceniza, explosiones estrombolianas y episodios de fuente de lava, así como también con fases de baja actividad representadas por débiles emisiones de vapor y ceniza, o de completa tranquilidad. Desde el inicio del proceso eruptivo, el fenómeno volcánico más persistente y de mayor afectación ha sido la caída de ceniza. El análisis textural, morfológico y litológico en las muestras de ceniza en el periodo explosivo de enero-febrero de 2010 indican un claro comportamiento de tipo estromboliano, el cual proyectó hacia superficie un magma desgasificado y de alta viscosidad. El bajo contenido de líticos y de fragmentos cristalinos a inicios de este periodo eruptivo implica una apertura paulatina del conducto volcánico. Por lo contrario, para el evento del 28 de mayo de 2010, los patrones texturales como fragmentos vesiculados hidro-volcanicamente, texturas tipo cabellos de Pelée y estructuras fluidas, indican que hubo un cierto grado de freato-magmatismo que liberó hacia superficie el magma de baja viscosidad y con un importante contenido de gases. El alto contenido de líticos densos y andesíticos, fragmentos escoráseos y poca presencia de clastos cristalinos, muestran la existencia de un tapón en superficie, que estalló por la presurización de los gases al interior, originando así el primer evento tipo “vulcaniano” en el Tungurahua. Algo similar sucedió en el evento del 22 de noviembre, en donde la alta vesicularidad de los componentes de la ceniza, implican un magma con importante desgasificación y pérdida de volátiles.

Palabras clave: Caída de ceniza, Dinamismo Eruptivo, Cenizómetro, Tungurahua

Abstract: Since the beginning of Tungurahua's eruptive process starting in 1999, the volcano has alternated between phases of elevated seismic activity characterized by emissions of gas and ash, strombolian explosions and episodes of lava emission, and by phases with diminished activity characterized by weak emission of gas and ash or complete tranquility. From the onset of the eruptive process at Tungurahua, persistent emissions have had the largest effect on the surrounding region. The textural, morphological and lithological analyses of ash samples indicate that from January to February, 2010, cool, degassed lava was projected from the event in Strombolian fashion. The samples have low lithic and crystalline content indicating a gradual opening of the volcanic conduit. In contrast, textural evidence from ejecta erupted on May 28, 2010, including vesiculated fragments with fluid structure and Pelee's hair indicate that activity was phreato-magmatic and gas-rich. The presence of dense and vesiculated lithic fragments, scoria fragments together with the low number of crystalline clasts, indicates that during the eruption on May 28th, gases broke apart a clogged vent, generating the first Vulcanian event at Tungurahua. Something similar happened in the November 22, 2010; where the high vesicularity of the components of the ash, involve significant magma degassing and loss of volatiles.

Keywords: Tephra Fall, Eruption Type, Ash Collector, Ash Characterization, Tungurahua Volcano

1. INTRODUCCION

El riesgo volcánico es un concepto que va gradualmente adquiriendo la importancia necesaria, especialmente debido a las últimas erupciones catastróficas, que han producido la

pérdida de vidas humanas; y al impacto y difusión que éstas han tenido en los medios de comunicación.

Paralelamente, también destaca la labor de concienciación y divulgación que se ha estado llevando a cabo por diversos organismos oficiales de todo el mundo, mediante la puesta en marcha de diversas iniciativas.

El estudio de la peligrosidad volcánica exige dividir cada uno de los episodios volcánicos en elementos muy sencillos que se evalúan de manera independiente. Cada uno de estos elementos constituye un peligro volcánico, definiendo para cada uno de ellos su magnitud (volumen, energía), alcance, duración del impacto y tiempo de recurrencia y propagación.

Uno de los peligros volcánicos de mayor afectación por su alcance y dispersión son las nubes de ceniza. Estas nubes son producto de las explosiones y emisiones de los volcanes durante periodos eruptivos.

Debido a que las nubes de ceniza cubren una superficie que se puede extender hasta cientos de kilómetros, la peligrosidad de este fenómeno estará determinada por el volumen de material emitido, la intensidad y duración de la erupción, la dirección y velocidad del viento [3]; y considerando los efectos en la salud (irritación de los ojos y de las vías respiratorias), problemas con el ganado, destrucción de plantas, daños en los motores (vehículos, aviones, maquinarias en general, transformadores, etc.), contaminación de fuentes y reservorios de agua y riesgo de colapsos de techos; es importante, mantener el seguimiento minucioso de las nubes de ceniza para minimizar el impacto por este fenómeno.

En el caso del volcán Tungurahua (Fig. 1), desde el inicio de la actividad eruptiva en 1999 hasta el momento, el fenómeno volcánico de mayor presencia, distribución y afectación en área ha sido la caída de ceniza como producto de las emisiones y explosiones que se han presentado continuamente en periodos de actividad eruptiva importante. Esta distribución y caída de ceniza ha estado controlada por la dirección de los vientos, que regionalmente van de oriente (E) a occidente (O).

Sin embargo, localmente existen variaciones en dirección a poca altura y distancia del viento [5]. Es así que la estimación de la cantidad de tefra emitida por los volcanes activos es un aspecto importante dentro del contexto de vigilancia volcánica. Esta estimación puede mostrar variaciones susceptibles que indican la evolución hacia una actividad más tranquila, o por lo contrario, hacia una actividad más violenta con la generación de fenómenos de mayor peligro como flujos piroclásticos, flujos de lava, colapsos o derrumbes.

Considerando que el Tungurahua es uno de los volcanes más activos del Ecuador continental y

que su reactivación en 1999 ocasionó la evacuación de miles de personas, es evidente la necesidad de mejorar el conocimiento de los comportamientos eruptivos pasados y actuales, así como desarrollar técnicas adicionales de monitoreo volcánico que permitan una mejor evaluación de la actividad volcánica.

Por tal motivo el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional como ente ecuatoriano rector en el monitoreo sísmico y volcánico ha implementado un sistema de monitoreo en tiempo real para la afectación por la caída de ceniza. Este sistema ha permitido cuantificar en parte la cantidad de material volcánico emitido durante periodos importantes de actividad volcánica del Tungurahua, pudiéndose definir intensidad y magnitud aproximada de los eventos. Sin embargo, la emisión de material sólido que ha evacuado el volcán Tungurahua ha sido fluctuante, y estas variaciones presentan cierta incertidumbre. En el presente trabajo se pretende conocer el origen de estas variaciones.

Esto implica cuantificar de manera más concreta la cantidad de productos sólidos emitidos durante los periodos de alta explosividad y su comportamiento dinámico en su estilo eruptivo.

2. PERIODO ERUPTIVO 2010 Y MUESTREO DE CENIZAS

2.1 Actividad eruptiva 2010

En enero y febrero de 2010, el volcán Tungurahua después de 4 meses de relativa calma, incrementa rápidamente, pasando de niveles muy bajos a niveles altos en pocos días (Fig. 2). A partir de este repunte y gran liberación de energía (Fig. 2), el estilo eruptivo del volcán sufre un cambio importante. Manifestaciones internas y externas en el primer semestre de 2010 desencadenaron descensos súbitos de flujos piroclásticos debido al colapso de bloques incandescentes.

Actividad stromboliana que eyectó bloques incandescentes hasta 2 km sobre el nivel de la cumbre, y el rodar de los mismos hasta 1200 m bnm (bajo el nivel del cráter (Fig. 3); columnas eruptivas de hasta 7 km de altura con gran cantidad de ceniza, una amplia distribución del material volcánico con un volumen acumulado de $3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de ceniza (Fig. 4; [5]) dominó este periodo. La actividad registrada en los meses abril y mayo, alcanzó los niveles más bajos

desde su re-activación en mayo de 1999 (Fig. 2).

Sin embargo, un incremento importante y muy repentino de la actividad sísmica a finales de mayo anticipaba una nueva re-activación. Es así, que el 26 de mayo se registra una explosión a las 11h12 (TU) que genera una columna eruptiva de 7 km de altura sobre el nivel del cráter, cuya dirección fue hacia el SO acompañada por el descenso de flujos piroclásticos por los bordes de los flancos N, NO, O hasta 800 metros bajo la cumbre. El evento más importante sucedió el día viernes 28 de mayo a las 13h47 (TU) iniciando con una explosión súbita, acompañada por un fuerte cañonazo y el descenso de flujos piroclásticos por las quebradas del flanco occidental y norte del volcán (Fig. 5).

La columna eruptiva alcanzó más de 10 km snc (sobre el nivel del cráter) y se dirigió al O-SO, provocando la caída de $2,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de material volcánico (Fig. 6; [5]), emisiones importantes de ceniza, se mantuvieron hasta julio de 2010. Durante los meses agosto-noviembre el volcán mostró un nuevo periodo de relativa calma.

Sin embargo, el 22 de noviembre a las 19h08 (TL GMT-5) se registra una explosión que provoca la salida violenta de material incandescente y el rodar de bloques por todos los flancos del volcán, alcanzando una distancia de 4 km bajo el nivel del cráter. Además se genera una columna eruptiva que ascendió rápidamente 6 km sobre el cráter y su posterior dispersión hacia el occidente (Fig. 7). Producto de esto se registró caída de pómez, ceniza y fragmentos volcánicos de tamaño de grava y lapilli en sectores como Bilbao, Yuibug, Chontapamba, Choglontús, El Manzano, y Cahujá (Fig.1).

Los componentes más finos de la columna eruptiva precipitaron en zonas como Guanando, Guano, Ilapo, Saguazo Cruz de Mayo, San Pedro de Sabañag, Santa Fe de Galán, Jaloa La Playa y Puñachizag ($0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de tefra; Fig. 7). Después de este evento, la actividad del volcán se incrementó rápidamente, donde un nivel de actividad moderada, se caracterizó por la emisión continua de vapor de agua y gas con una carga moderada de ceniza.

Estas emisiones continuas lograron sostener columnas eruptivas que alcanzaron alturas entre 1 – 5 km sobre el nivel del cráter, cuya dispersión fue muy amplia, pero principalmente hacia el SO, O y NO.

Las semanas siguientes al 22 de noviembre la actividad superficial y sísmica del volcán se mantuvo sin mostrar cambios importantes hasta la mañana del sábado 04 de diciembre. De manera súbita se registra un violento incremento en la actividad sísmica y de las manifestaciones superficiales del volcán.

Este incremento de actividad (13h50 TU) desencadena en una fase altamente explosiva, en donde las ondas acústicas generaban una continua vibración de ventanales y en ocasiones del suelo. La salida de material volcánico se mantuvo constante, logrando sostener una columna eruptiva entre 3 y 4 km sobre el cráter, cuyo contenido de ceniza era moderado a alto, las emisiones continuas de ceniza generaron una nube de dispersión hacia el E-SE (Fig. 8). La proyección de material incandescente y el rodar de rocas por los flancos de volcán fueron continuos.

A las 14h38 (TU), se acentuó la fase explosiva, y se generó el descenso de flujos piroclásticos por las quebradas de Vazcún (1km bnc), Juive Chico, Viejo Minero, Mandur, Cusúa (hasta 1500 mbnc), Achupashal, La Rea y Choglontús (Fig. 8). A las 18h44 (TU), el volcán experimentó un descenso en su explosividad explosiva.

Después de esta fase de alta explosividad, la actividad en el volcán Tungurahua se mantuvo moderada, pero con una tendencia descendente. Sin embargo, el jueves 09 de diciembre (17h30 TL) ocurre un flujo piroclástico que descendió por la quebrada Cusúa en el flanco occidental del volcán (Fig. 9), el cual avanzó rápidamente y en pocos minutos descendió hasta 2000 mbnc (Fig. 9).

El flujo piroclástico fue debido a un derrumbe del material acumulado en el borde del cráter durante la fase eruptiva del 04 de diciembre. El 11 de diciembre fue muy clara la presencia de un pequeño flujo de lava que descendió por la quebrada La Hacienda (flanco occidental, Fig. 10) y se detuvo a 1000 mbnc.

Según el análisis de imágenes termográficas, el flujo descendió posterior a la actividad explosiva del 04 de diciembre (Fig. 10). Hasta el final del 2010 las explosiones eran menos numerosas, pero mantenían un nivel alto de energía, éstas dejaron de registrarse a partir del 25 de diciembre. Con el transcurso del mes, esta actividad cesó completamente, iniciando un nuevo periodo de relativa calma.

2.2 Sistema de Muestreo de Cenizas

La caída de tefra (ceniza y lapilli) ha sido el fenómeno volcánico de mayor presencia, distribución y afectación en estos 14 años de actividad del volcán Tungurahua (1999-2013), y tras las erupciones de julio y agosto 2006, y tomando en cuenta la necesidad de la cuantificación de los volúmenes de ceniza y caracterización del dinamismo eruptivo, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), implementa un sistema de control de caída de ceniza casi en tiempo real.

El 27 de marzo de 2007 se instala una serie de recipientes (cenizómetros) alrededor del volcán. La ubicación de los recolectores de ceniza (Fig. 11) se la realizó considerando el régimen dominante de los vientos de la zona del volcán que controlan la distribución de las nubes de ceniza.

También se tomó en cuenta los poblados que más frecuentemente reportaron caídas de ceniza al Observatorio del Volcán Tungurahua (OVT, ubicado a 14 km al NNO del volcán) y la distribución de los depósitos de las erupciones de 2006. Estos recipientes se encuentran ubicados hacia el O, NO y SO del cono y a distancias no mayores a 20 km desde la cumbre (Fig. 11).

Esto debido a que el estilo eruptivo global tipo stromboliano del Tungurahua ha generado columnas eruptivas débiles que no han logrado formar una zona de paraguas (excepto agosto de 2001 y, julio y agosto de 2006), las cuales se caracterizan por tener una velocidad mucho menor que la velocidad del viento [3] y porque se forman debido a descargas de gases y partículas sólidas a través de una serie de explosiones discretas separadas por pocos minutos o varias horas [7].

Los recolectores de ceniza consisten en un recipiente de plástico de 20 cm de diámetro y 20 cm en altura, de alta resistencia, transparente y de geometría regular (Fig. 12). Éste, se encuentra apoyado en una base pesada, para evitar que el recipiente sea desplazado y se pierda parte de la muestra recolectada.

Considerando además que en la zona la pluviosidad es elevada, cada recipiente tiene 4 orificios a 2, 4 y 8 cm desde la base (depende de la zona donde estén ubicados) para evacuar el agua meteórica. Para evitar la pérdida y/o manipulación de los recolectores de ceniza, se

involucró a la comunidad en el cuidado, instalando los recipientes en lugares como balcones, techos y terrenos pertenecientes a personas naturales u organismos gubernamentales y de socorro.

También se los instaló en lugares donde ya existe instrumentación de monitoreo del IG-EPN, como estaciones sísmicas, de medición de gases y/o deformación e imágenes térmicas (Tabla 1).

La implementación de este sistema, ha permitido tener un monitoreo y control casi en tiempo real de la caída de ceniza en la zona del volcán Tungurahua. Puesto que las emisiones y explosiones en épocas de actividad moderada-alta no han sido suficientemente energéticas como para tener un registro en el campo, y los recolectores de ceniza han permitido conservar el material sólido emitido y acumulado.

Usando estos recipientes se ha logrado obtener más de 300 muestras de ceniza y medidas de espesores (2007-2010). La recolección de la ceniza acumulada se realiza inmediatamente después de eventos importantes y dependiendo de la intensidad de las fases explosivas y/o cuando existe un acumulado mayor o igual a 1mm en el recolector más distal (Iguata, Fig. 11).

Esto, permite la medida de espesores para la elaboración de isópacas, que con la utilización de métodos de cuantificación [13], [9], [12], [4] han permitido estimar los volúmenes de material emitido, además han permitido realizar estudios de granulometría, textura y/o morfología de las partículas de ceniza [5].

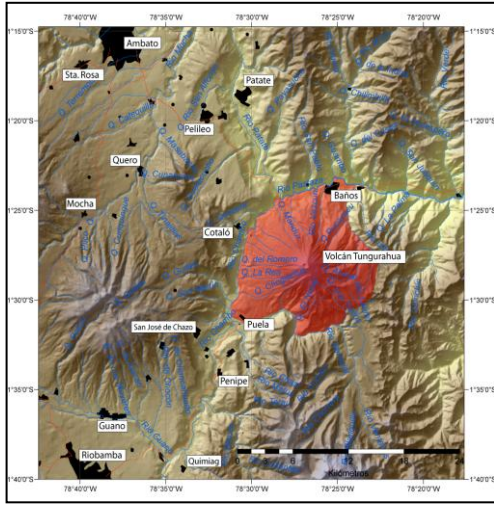


Fig. 1: Ubicación regional del volcán Tungurahua (DEM 30 m)

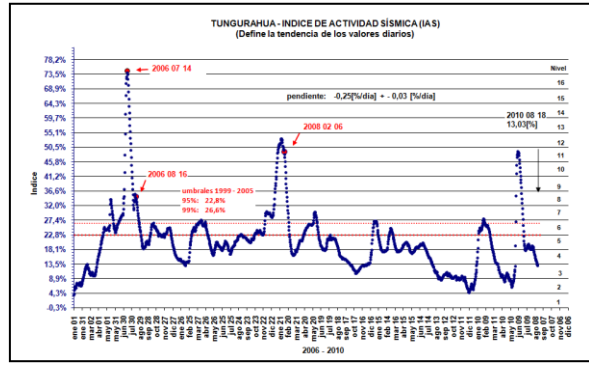


Fig. 2: Índice de actividad sísmica donde se define la tendencia de los valores diarios. Nótese los picos de alto nivel de actividad durante julio y agosto de 2006, febrero de 2008, enero-febrero de 2010 y mayo-junio de 2010 (Fuente IG).



Fig. 3: Actividad tipo fuente de lava, proyección de bloques incandescentes que alcanzan una altura de 2 km snc y el rodar por todos los flancos del edificio volcánico (Foto: J. Bustillos-IG).

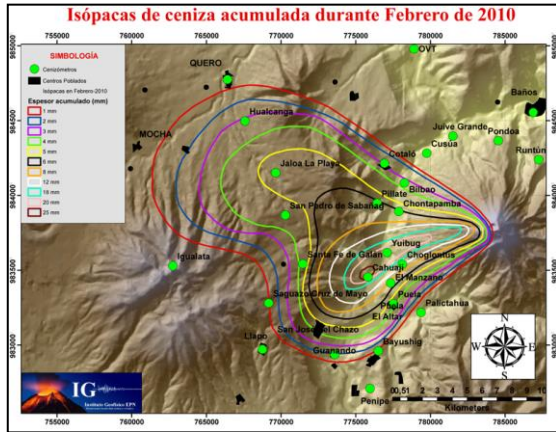


Fig. 4: Isópacas de ceniza acumulada durante febrero de 2010. Nótese la distribución de los depósitos de ceniza en dos ejes; NO y O-SO producto del régimen local de vientos (Modificado de [5]).



Fig. 5: Flujo piroclástico del 28 de mayo cuya dirección es hacia el sector de Cusúa (Foto: M. Bécouze IG-IRD).

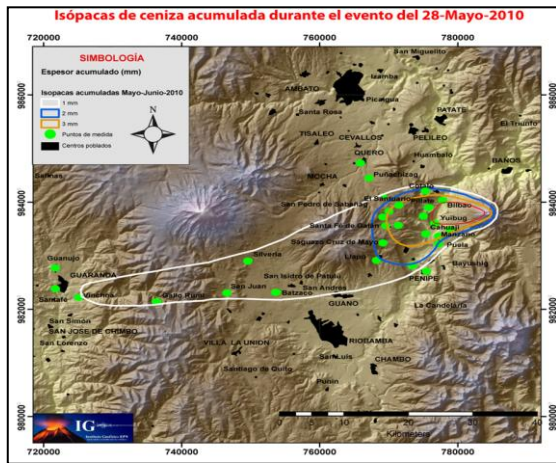


Fig. 6: Isópacas de ceniza emitida durante el evento explosivo del 28 de mayo de 2010 (Modificado de [5]).

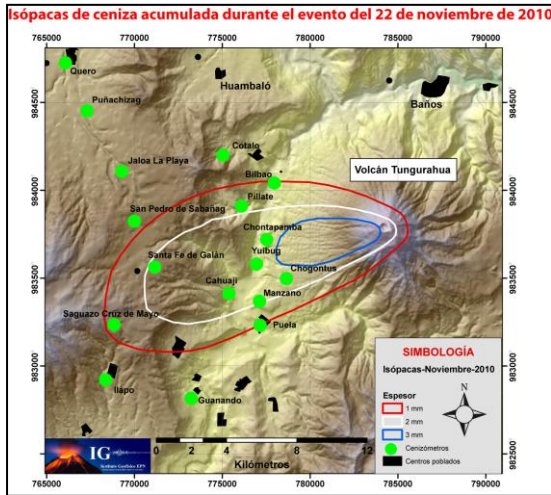


Fig. 7: Isópacas de ceniza emitida durante el evento explosivo del 22 de noviembre de 2010 (Modificado de [5]).



Fig. 8: Descenso de flujos piroclásticos por la quebrada de Cusúa. La emisión de ceniza con cargamodera se dirige al E-SE (Foto: J. Ordóñez, ...)



Fig. 9: Descenso del flujo piroclástico por la quebrada de Cusúa. Nótese la desmembración de un pequeño flujo el cual descendió por la quebrada Achupashal (Foto: Captura de imagen de video, J. Bustillos IG-EPN; Video: B. Bernard, IRD-IG).



Fig. 10: Flujo de lava que bajó el sábado 04 de diciembre (Foto: B. Bernard, IRD-IG).



Fig. 11: Red de colectores de ceniza alrededor del volcán Tungurahua instalada el 27 de marzo de 2007 (Modificado de [10]).



Fig. 12: Cenizómetro, recipiente de plástico transparente que permite la recolección de ceniza (Foto: J. Bustillos-IG).

CENIZOMETROS					
	UTM/WGS-84				
UBICACIÓN	X	Y	Z	RESPONSABLE	SITIO
Quero	766146	9847382	2866	Padre Rubén Sánchez	Terraza de la Casa Parroquial
Puñachizag	767320	9844602	3093	Mario Cajo	Terraza de la casa (Frente al estadio-Tienda)
Jalao La Playa	799371	9841149	3292	Dina Fuentes	Techo de la casa junto a la lavandería
San Pedro de Sabañag	770027	9838309	3525	Víctor Sánchez	Terraza de la casa
Santa Fe de Galán	771197	9835654	3667	Romelia Sánchez	Terraza de la casa (Cabinas Porta-Plaza Central)
Saguazo Cruz de Mayo	768906	9832432	3723	Iglesia	Techo de la Iglesia
Ilapo	768485	9829336	3354	Guillermo Saiga	Parte superior de la pared Occidental de la casa
Guano	763636	9822118	2680	Bomberos	Terraza de la construcción nueva (Calle principal)
Penipe	775950	9827100	2200		Terraza del Municipio
Bayushig	776253	9829230	2783		Estación NOVAC-SUR
Huayrapata					Estación NOVAC-NORTE
Palictahua	779113	9831804	2426	Serafín Mérida	Techo de la casa del Presidente de la Comunidad
Choglontús	778620	9835029	2600	Víctor Zumba	Techo de la Casa de ChV Choglontús
El Manzano	777082	9833779	2573	Vicente Reyes	Casa del ChVManzano
Puela	777264	9832394	2488		Terraza de los baños en la plaza central
Cahuají	775555	9834174	2388	Ángel Alvarado	Techo de la casa de ChVCahuají
Guanando	773329	9828992	2386		Terraza de la Escuela de la localidad
Bilbao	777998	9840469	2302	Benigno Meneses	Casa de ChVBilbao
Pillate	776167	9839111	2302	Rodrigo Ruiz	Casa de TVPapa
Pondoa	784284	9843296	2598	Vicenta Vélez	Techo de la casa
Cusúa	779486	9842457	2224	Teresa Tite	Casa de TSCanadá
Juive	781242	9843601	2165	Luis Chávez	Techo de la casa de TVLima
OVT	778645	9849755	2020	Jefe de turno/Asistente	Parte superior de la Sisterna
Baños	787114	9845884	1805	UGR-Baños	UGR-Baños
Pelileo	773501	9853171	2589		Terraza del Municipio
Igualata	762750	9835300	4430		Terraza de la caseta de la repetidora
Chontapamba	777620	9838558	2329		Terraza de la casa
Yuibug	776839	9835810	2364		Terraza de la casa a la derecha del camino Penipe-Baños

Tabla 1: Ubicación (UTM), responsable y lugar de instalación de los cenizómetros en la región del volcán Tungurahua.

3. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE CENIZA

3.1 Distribución del tamaño de grano

La determinación de la distribución total del tamaño de grano presenta algunas dificultades debido a (1) problemas metodológicos relacionados a la integración del análisis de tamaño de grano de muestras simples, (2) a la escasez de datos y puntos de muestreo y (3) desigualdad en la distribución de los datos y puntos de muestreo [4]. Para minimizar estos impactos se ha escogido una serie de muestras puntuales colectadas por los recolectores de ceniza. Se han considerado 20 muestras, 7 de enero; 7 de febrero; 4 del 28 de mayo, y 2 del 22 de noviembre de 2010.

Enero de 2010

Esta fase explosiva está representada por el análisis de las muestras puntuales del 06, 12, 13, 20, 28 de enero de 2010 coleccionadas en el recipiente de Choglontús a 5 km al occidente del cono (Fig. 11). Además de dos muestras del recolector de Cahujá (10 km al O, Fig. 11) que representan depósitos acumulados del 01-10 de enero y 11-31 de enero de 2010. El depósito de ceniza presenta una distribución unimodal (Fig. 13 a-g), en donde la mediana comprende valores de 1.6 ϕ , 1.8 ϕ y 2.7 ϕ . El promedio varía de 1.85 ϕ - 2.7 ϕ . Todas estas muestras son predominantemente bien sorteadas y presentan valores entre 0.7 y 0.9 según los parámetros gráficos [11]. Además el coeficiente de asimetría indica una tendencia positiva; es decir, hacia la fracción más gruesa (Fig. 13 a-g).

Utilizando la difracción láser en las fracciones más finas ($\leq 63 \mu\text{m}$) se observa una distribución unimodal, donde la mediana gráfica muestra valores de 31,10 μm ; 51,96 μm y 56,67 μm . El tamaño de grano promedio de las muestras analizadas es de 22,90 μm ; 44,25 μm y 57,73 μm . El coeficiente de asimetría es negativo.

Si consideramos las muestras que representan un periodo de acumulación como las coleccionadas en el sector de Cahujá se puede decir que presentan una distribución bimodal (Fig. 13g). Valores de la mediana muestra valores de 2.6 ϕ y 2.9 ϕ ; 2.85 ϕ en promedio. Ambas muestras (01-10; 11-31 de enero) son bien sorteadas, los valores 1.2 y 0.9 según los parámetros gráficos [11]. El coeficiente de asimetría es negativo, mostrando una afinidad hacia los finos (Fig. 13).

Febrero de 2010

Se analizaron 7 muestras, 01, 02, 08, 09, 10, 12 de febrero. Los depósitos colectados fueron tomados del recolector de ceniza ubicado a 5 km al occidente del cráter (Choglontús, Fig. 11). No se analizaron depósitos de periodos de acumulación.

Fracciones granulométricas muestran una distribución unimodal, solo dos muestras son bimodales (Fig. 13h-m). En la fracción unimodal la mediana tiene valores entre 0.7 ϕ y 2.1 ϕ , el promedio varía de 0.85 ϕ - 2.28 ϕ . Todas las muestras presentan un buen sorteo de 0.6 a 0.8 según parámetros gráficos [11]. El coeficiente de simetría es positivo, reflejando la afinidad hacia la fracción más gruesa. Mientras que en la fracción bimodal (02 y 08 de febrero; Fig. 13i, j), la mediana tiene valores de 2.5 ϕ y 2.2 ϕ . El promedio varía de 2.45 ϕ - 2.75 ϕ . Presentan valores de sorteo de 0.8 y 1.0. El coeficiente de asimetría muestra una ligera tendencia hacia la fracción fina (Fig. 13h-m). Con ayuda de la difracción láser la fracción más fina del depósito ($\leq 63 \mu\text{m}$), muestra una distribución unimodal al inicio del periodo y bimodal al final del periodo.

Valores de 71,96 μm y 34,32 μm respectivamente representa la mediana. El tamaño promedio de los finos al inicio de periodo es de 71,27 μm y 23,78 μm al final. En ambos casos el coeficiente de asimetría tiene afinidad hacia los más finos.

28 de mayo de 2010

Para el análisis de la distribución del tamaño de grano se utilizó 4 muestras de la zona distal (hasta 15 km del viento, Fig. 11). La ubicación de las muestras de ceniza son a 13 km al occidente del cono, en la zona de Santa Fe de Galán; Saguazo Cruz de Mayo a 15 km al O-SO y a 15 km al O-SO en la carretera Santa Fe de Galán - San Pedro de Sabañag (UTM 769673 / 9836896, WGS-84).

La distribución del tamaño de grano es bimodal, únicamente la muestra del sector de Saguazo es unimodal (Fig. 13n-p). La mediana en la distribución bimodal presenta valores desde -0.6 ϕ a 1.3 ϕ . El promedio se encuentra entre -0.05 ϕ y 2.4 ϕ . Presentan un sorteo moderado entre 0.9 y 1.6 según los parámetros gráficos [11]. El coeficiente de asimetría no muestra ninguna tendencia. La muestra con distribución unimodal la mediana y el promedio tiene un valor -0.4 ϕ , un sorteo de 0.6; y presenta un coeficiente de asimetría nulo, por cuanto la mediana y el promedio gráfico son de similares valores (Fig. 13o). Analizando la fracción más fina ($\leq 63 \mu\text{m}$) se observa la misma distribución

bimodal generalizada, en donde el coeficiente de asimetría es negativo.

22 de noviembre de 2010

Para el análisis se consideró 2 muestras puntuales de los colectores de ceniza de Cahujá y El Manzano (Fig.11). El análisis granulométrico muestra una distribución unimodal (Fig. 13q-r), en donde la mediana varía entre 1.5 y 3.7 ϕ ; con un promedio en el tamaño de grano entre 1.65 – 3.65 ϕ . Ambas muestras presentan un sorteo moderado a bueno, con un coeficiente de asimetría mostrando una tendencia hacia las fracciones finas (Fig. 13q-r).

3.2 Carácter del material sólido emitido, Textura y componentes

Existe tres mecanismos básicos para la formación de la ceniza: **(1)** exsolución de gases y explosión de vesículas producto de la descompresión dentro del magma cuando alcanza la superficie terrestre (fragmentación magmáticas), **(2)** enfriamiento y fragmentación explosiva del magma durante el contacto con agua subterránea y superficial como hielo, nieve o lluvia (erupciones freato-magmáticas), y **(3)** la pulverización e inyección de partículas desde las paredes del vento o en colapsos de cráter durante erupciones de vapor o agua caliente (erupciones freáticas; [10]).

Los fragmentos que componen la ceniza volcánica puede ser usada para interpretar las propiedades físicas de una erupción y su contenido de volátiles; estos datos pueden indicar además el grado de interacción entre el magma y el agua que bordea o está sobre el conducto volcánico.

Para la determinación del carácter del material sólido emitido por el volcán Tungurahua, se realizó un análisis morfológico y textural bajo un microscopio electrónico de barrido (MEB) con 12087 partículas y 115 imágenes respectivamente.

Las muestras estudiadas corresponden a la fase explosiva de enero-febrero de 2010, 28 de mayo de 2010 y 22 de noviembre de 2010. Las texturas y las formas de los clastos componentes de los depósitos de ceniza están principalmente basados en la descripción clásica [10], y los parámetros morfológicos de la partícula como circularidad, convexidad y elongación.

Enero – Febrero de 2010

Se distingue 4 componentes (Fig. 14), en orden de abundancia:

- Morfología blocky.** Presentan superficies vidriosas planares a curvoplanares, intersecadas por varias o pocas vesículas. Ellos tienen una forma aproximadamente isométrica, en donde la geometría de las vesículas es variable, desde irregulares a sub-redondeadas. Ocasionalmente se pueden observar vesículas encorvadas sobre una burbuja que fue congelada cuando se expandía a través de la superficie del grano después de la fragmentación (Fig. 14 d).
- Cristales libres.** Se caracterizan por ser fragmentos sub-redondeados, redondeados y euhedrales. El fracturamiento de los cristales es comúnmente regular. Los cristales son plagioclasas y piroxenos.
- Fragmentos vítreos.** Se caracterizan por presentar una superficie curviplanar que en ocasiones muestran concavidades. El fracturamiento es concoidal; tienen forma de shard.
- Agregados.** Son clastos que se encuentran muy rara vez dentro de los componentes de la ceniza, presenta un perímetro irregular a sub-redondeado. Debido a las fuerzas electrostáticas que bordean al fragmento se encuentran adheridas finas partículas de material de alteración de la ceniza como arcillas o zeolitas.

En el análisis morfológico, que comprende el Sistema de Caracterización Automática de la Partícula (Morphology G3 – MALVERN), se puede decir que los fragmentos componentes de la ceniza presentan las siguientes características: **a)** cociente de aspecto entre 0.207 – 1.0; con un promedio de 0.76, **b)** diámetro de circularidad equivalente de 4.29 – 205.44 μm y un promedio de 129.8 μm **c)** la convexidad varía de 0.83 a 1.0; el promedio es de 0.977, y **d)** un promedio de circularidad de 0.817 variando entre 0.329 – 0.957 (Fig. 15). La homogeneidad en la convexidad y circularidad, las partículas no presentan elongación (Fig. 15).

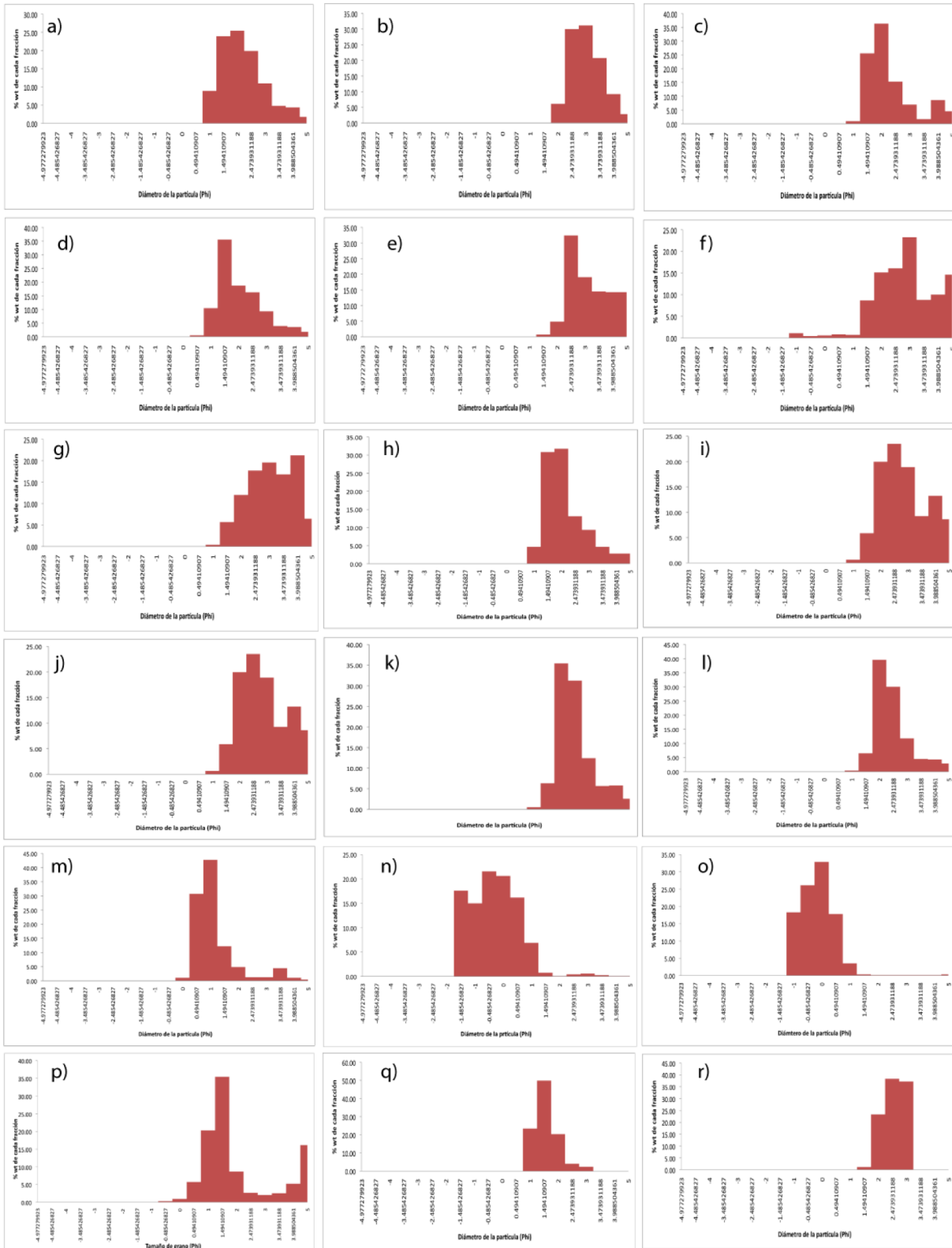


Fig. 13: Histogramas % wt de cada fracción vs. tamaño de grano (ϕ) para, **a)** 06-enero; **b)** 12-enero; **c)** 13-enero; **d)** 20-enero, **e)** 28-enero, en el sector de Choglontús (ubicación Fig. 11); **f)** 01-10-enero; **g)** 11-31-enero, en el sector de Cahuají (ubicación Fig. 11); **h)** 01-febrero; **i)** 02-febrero; **j)** 08-febrero; **k)** 09-febrero; **l)** 10-febrero; **m)** 12-febrero en el sector de Choglontús (ubicación Fig. 11); **n)** Santa Fe de Galán; **o)** Saguazo; **p)** Pillate, del 28 de mayo de 2010 (ubicación Fig. 11); **q)** 22-noviembre en el sector de Cahuají (ubicación Fig. 11); **r)** 22-noviembre en el sector de El Manzano (ubicación Fig. 11) (Modificado de [10]).

Los depósitos de ceniza en esta fase explosiva se compone de fragmentos de: a) *Escoria de color crema*, ésta se encuentra presente desde 1% a 83%, siendo más frecuente en las fracciones finas (a partir de 250 μm) y hacia el final del ciclo. b) *Escoria de color negro*, varía en presencia desde 2,39% a 74,70%, disminuyendo hacia las fracciones más finas, pero incrementándose hacia finales del periodo explosivo. c) *Líticos de color rojo*, tienen una presencia restringida hasta en un 13,10%, manteniéndose estable en todas las fracciones sedimentométricas (1.0 mm – 63 μm); sin embargo, su presencia es menos frecuente hacia el final del periodo eruptivo.

Por lo contrario, *los líticos densos*, se incrementaron hacia la fase final del periodo y son más frecuentes en las fracciones más gruesas (hasta un 45%). d) La presencia de *crisales libres* se incrementa hacia el final del periodo explosivo, alcanzando un máximo de 32%, siendo más frecuentes desde un tamaño de grano menor o igual a 180 μm . e) *Los agregados* son muy escasos, siendo estos más frecuentes al inicio de enero. f) La presencia de *pómez blanca* es excepcional (2,22%) y solo es frecuente hacia mediados y finales de febrero. g) *Clastos vítreos*, son frecuentes hacia las fracciones finas ($\leq 180 \mu\text{m}$).

28 de mayo de 2010

Según las descripciones morfo-texturales [10], se distinguen los siguientes fragmentos (Fig. 16):

- a. *Morfología "blocky"*. Estos fragmentos se caracterizan por superficies curvilineales, intersecadas por vesículas de geometría irregular poco alargadas y redondeadas. En ocasiones estas vesículas son de forma poligonal como un resultado de la interferencia mutua de las paredes de la vesícula durante el crecimiento de la misma.

Se observa además que las vesículas exteriores se derrumbaron mientras la gota de magma aun estaba fundida, dejando depresiones liso-bordeadas y pilares entre las vesículas. En los clastos poco vesiculados se observa vesículas que estallaron después de la fragmentación, sin embargo las paredes curvas de la burbuja están preservadas. Este tipo de vesicularidad es producto de actividad freato-magmática y/o fragmentación hidrovolcánica [10] (Fig. 16b).

- b. *Cabellos de Pelée*. Este tipo de fragmentos son muy comunes en los componentes de la ceniza (Fig. 16 c,d). Se caracterizan por tener dos texturas: a) la más común, muestran geometrías irregulares, en donde se observan estructuras alargadas tipo filamentos, poseen poca a nula vesicularidad.

Los filamentos fibrosos y curvados muestran que el fluido estaba parcialmente fundido al momento de ser eyectado a la superficie. b) Menos frecuentes, pero los más importantes son las texturas tipo cabellos de Pelée, que en su mayoría son tabulares y rara vez presentan vesículas alargadas.

- c. *Estructuras Fluidas*. Este tipo de clastos presentan una textura liso-curvada (Fig. 16 e,f). Es muy común observar vesículas encorvadas sobre una burbuja que fue congelada cuando esta se expandía a través de la superficie del grano después de la fragmentación. Ocasionalmente se observan vesículas como producto de una fragmentación hidrovolcánica. Fragmentos tipo lagrimas con superficies lisas y redondas se formaron por la tensión superficial dentro de una gotita fluida antes de que enfrié.
- d. *Fragmentos Cristalinos*. Se encuentran presentes en las fracciones sedimentométricas a partir de 1 mm. Son cristales de piroxenos y plagioclasas, siendo de geometrías subhedral a euhedral. En las plagioclasas se observa claramente el clivaje paralelo y perfecto en la cara 001.
- e. *Fragmentos Densos*. Son clastos de forma irregular, con superficies planas y en ocasiones rugosas. Es característico su fractura concoidea debido a lo vítreo de la matriz; presentan además morfología perimetral tipo bahías.
- f. *Agregados*. Son muy escasos dentro de los componentes de los depósitos de ceniza, presentan una morfología redondeada y poligonal. Partículas finas de material de alteración como arcillas se encuentran adheridas debido a las fuerzas electrostáticas que bordean el clasto.

En el análisis morfológico en el Sistema de Caracterización Automática de la Partícula (Morphology G3), los fragmentos presentan un cociente de aspecto que varía de 0,286 a 0,99

con un promedio de 0,712. El rango de variación en el diámetro de circularidad equivalente es muy amplio debido a lo elongado de las partículas.

Valores entre 2,163 μm a 595,053 μm y 48,36 μm muestran lo irregular de su esfericidad. Parámetros morfológicos como la convexidad tienen valores desde 0,659 a 0,946, mientras que su circularidad entre 0,202 a 0,946; con un promedio de 0,731 (Fig. 15). La heterogeneidad en los valores de los parámetros de convexidad y circularidad muestran partículas elongadas y con un bajo cociente de aspecto (Fig. 15).

Las cenizas del 28 de mayo de 2010 está compuesta de: a) *Líticos densos*, son los más abundantes y su porcentaje en presencia se incrementa a medida que se aleja del viento. La ocurrencia de los fragmentos cambia desde un 16% en las fracciones finas hasta un 84% en las gruesas. b) *Escoria de color crema*, son los segundos más abundantes, alcanzando hasta un 92% en la muestra total como en las fracciones de 500 μm .

En general, a partir de un tamaño de partícula de 500 μm disminuye su ocurrencia hacia las fracciones más gruesas, manteniéndose uniforme hacia las finas. c) *Escoria de color negro*, es más frecuente hacia las zonas menos distales del volcán. Un máximo de 35% y un mínimo de 3% en presencia en la muestra, caracterizan a los fragmentos. d) *Líticos rojos*, son poco frecuentes, manteniendo estable la ocurrencia tanto en zonas mediales y poco distales.

Los fragmentos se encuentran presentes hasta en un 6% en la muestra total y en las fracciones más finas (125 μm), disminuyendo hacia las fracciones más gruesas, inclusive llegando a ser escasos (12%). e) *Cristales libres*, son abundantes a partir de un tamaño de grano de 1.0 mm, incrementando en general su presencia hacia los finos, cuyo porcentaje máximo es de hasta 9-10% de la muestra total. f) *Los agregados* son escasos, alcanzando hasta 5% en ocurrencia; son más frecuentes en fracciones entre 500 μm y 125 μm . g) *El vidrio*, es distinguible en fracciones menores o iguales a 355 μm ; su valor máximo es de un 13% en la

muestra total. Con respecto a la distancia desde el viento se mantienen estable.

22 de Noviembre de 2010

Se distinguen los siguientes fragmentos (Fig. 16 g, h):

a. *Escoria de color negro* presentan morfología blocky, consisten de fragmentos con superficies vídrias planares a curvilineales, intersecadas por varias vesículas. Ellos tienen una forma aproximadamente isométrica, la geometría de las vesículas es variable, desde irregulares a sub-redondeadas. Se pueden observar vesículas encorvadas sobre una burbuja que fue congelada cuando se expandía a través de la superficie del grano después de la fragmentación.

Rara vez se observan que las vesículas exteriores colapsaron mientras la gota de magma aun estaba fundida, dejando depresiones liso-bordeadas y pilares entre las vesículas y además vesículas que estallaron después de la fragmentación, sin embargo las paredes curvas de la burbuja están preservadas. Este tipo de vesicularidad es producto de actividad freato-magmática y/o fragmentación hidrovolcánica[10].

b. Fragmentos de *escoria color crema*, presentan una mayor vesicularidad que los componentes negros, en donde las vesículas son fibrosas y elongadas. Las vesículas son de forma poligonal como un resultado de la interferencia mutua de las paredes de la vesícula durante el crecimiento de la misma.

c. Los componentes *líticos de color rojo* presentan una morfología redondeada con alta vesicularidad. Estas vesículas son de abertura redonda y de estructura tabular.

d. *Fragmentos densos*, presentan una geometría subhedral, fractura concoidea y regular, no presentan morfología tipo bahías en su perímetro.

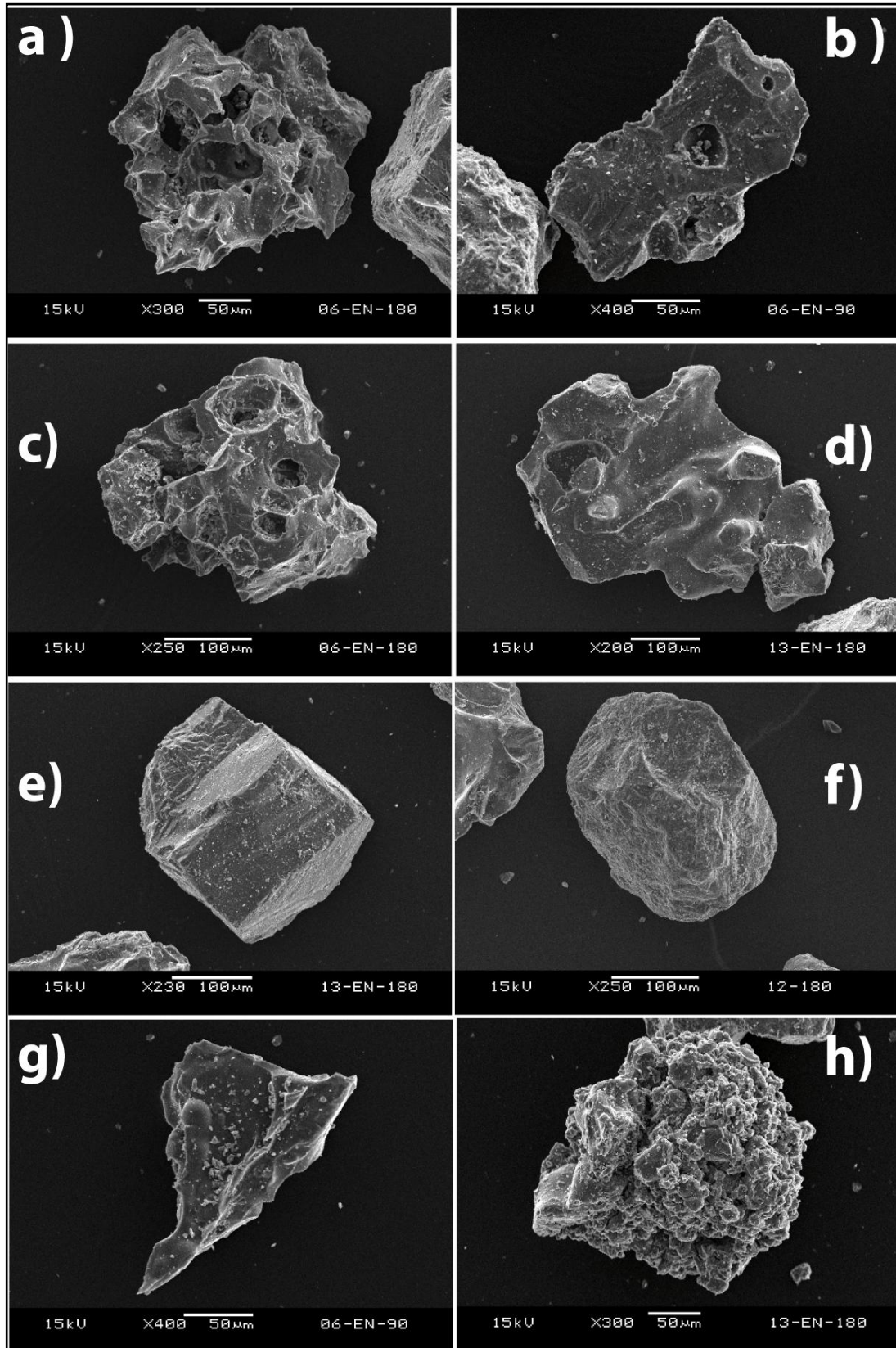


Fig. 14: Imágenes MEB del periodo enero-febrero de 2010, en donde los literales **a), b), c), d)** muestran la morfología tipo "blocky"; los literales **e), f)** los cristales libres ; **g)** fragmentos vítreos; **h)** los agregados cristalinos (Modificado de [5]).

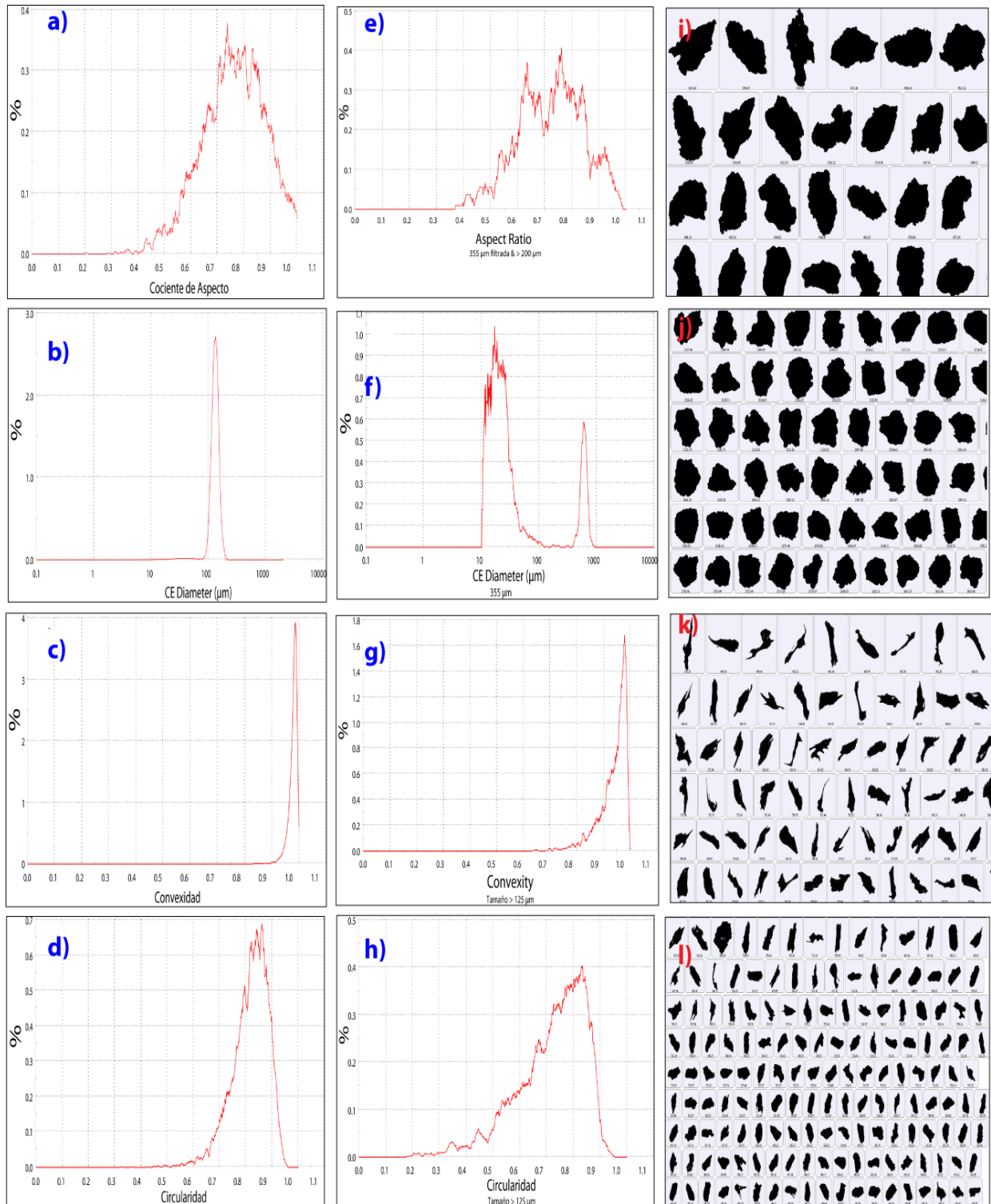


Fig. 15: a-h) Curvas acumulativas que representan % de grano vs. parámetros morfológicos de la partícula. a) coeficiente de aspecto; b) coeficiente de esfericidad; c) convexidad; d) circularidad de las partículas de ceniza del periodo eruptivo enero-febrero de 2010; e) coeficiente de aspecto; f) coeficiente de esfericidad; g) convexidad; h) circularidad de las partículas de ceniza del evento eruptivo del 28 de mayo de 2010; i-j) imágenes obtenidas por el microscopio Morphology G3, en donde se muestra la geometría de las partículas componentes de los depósitos de ceniza del periodo explosivo enero-febrero-2010. Nótese que los granos no presentan elongación y la uniformidad en la convexidad y circularidad; k-l) imágenes de la morfología de la partícula de los depósitos de ceniza del 28 de mayo de 2010 obtenidas bajo el microscopio Morphology G3 – MALVERN (Modificado [5]).

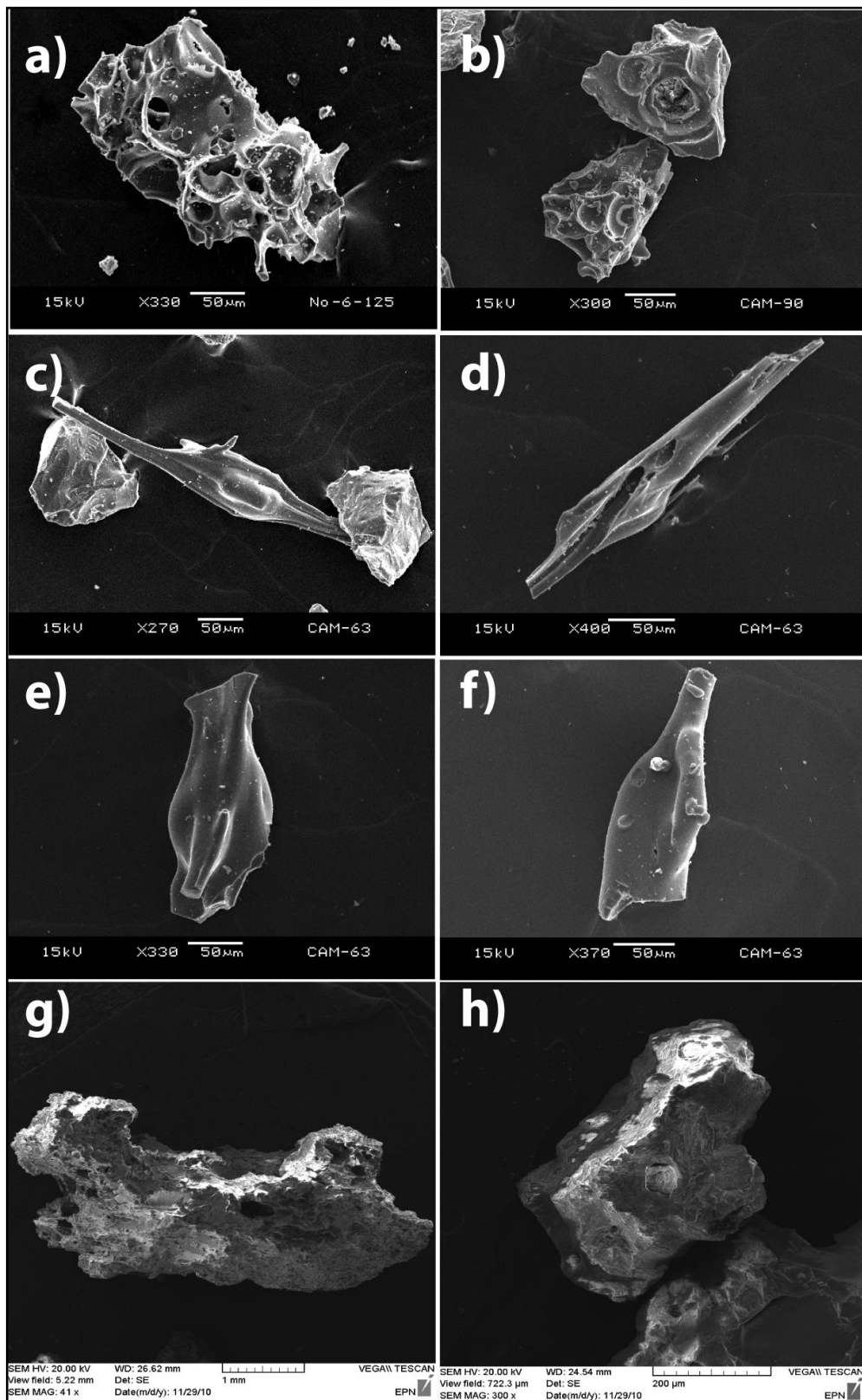


Fig. 16: Imágenes MEB, en donde los literales **a)**, **b)** muestran la morfología tipo “blocky”; los literales **c)**, **d)** estructuras tipo cabellos de Pelée; los literales **e)**, **f)** estructuras fluidas del evento eruptivo del 28 de mayo de 2010; y los literales **g)**, **h)** morfología “blocky” del evento eruptivo del 22 de noviembre de 2010 (Modificado de [5]).

4. DICUSION

La metodología de muestreo y cuantificación de material sólido emitido durante las fases explosivas en los volcanes han sido motivo de debate [1]; [4];[8], principalmente debido a que la toma de datos en el campo, que en la mayoría de los casos está restringida a parámetros como, el tamaño de la erupción, la carga de ceniza en las columnas eruptivas, al régimen local o regional de los vientos y a la conservación del depósito en el medio.

En el caso del Tungurahua, con la instalación de varios recolectores de ceniza (33 cenizómetros), a partir del 2007 se tuvo un mayor control del material sólido emitido y se complementó así el sistema de monitoreo del IG-EPN. La frecuencia de muestreo de los recolectores de ceniza están relacionados directamente a la actividad superficial del volcán (emisiones con carga moderada de ceniza), es así que en ocasiones el tiempo de acumulación ha ocasionado que parte de la muestra pierda componentes finos, y por lo contrario estos sean re-depositados por acción de los vientos, distorsionando así el trazo de las isópacas por ejemplo.

Además la situación topográfica de la zona circundante al volcán Tungurahua permite la re-movilización de la ceniza desde las partes altas (e.g. Choglontús, El Manazo, Bayushig) por acción de los vientos y posterior depositación en las zonas bajas (e.g. Cahuají, Guanando, Penipe), contribuyendo en fracciones finas al depósito inicial.

Varios, si no todos, de los recientes depósitos de tefra observados o estudiados tienen una distribución bimodal o polimodal en muestras individuales (e.g.[6]; [2]). En contraste, los depósitos de ceniza de las fases explosivas del volcán Tungurahua en el 2010 muestran una distribución unimodal, en especial durante el primer trimestre analizado y en eventos puntuales.

Esta distribución unimodal refleja que las columnas eruptivas no son muy energéticas y que el depósito de las partículas de ceniza se lo realiza en un ambiente no turbulento [1]. Esto es muy claro en depósitos puntuales o con un máximo de acumulación de 24 horas, evidenciando que no existe mucha influencia del régimen local y regional de los vientos y tampoco agregación en las partículas que distorsionen el medio de depositación(Fig. 13).

Por lo contrario, se observa una distribución bimodal (Fig. 13), en muestras cuyos depósitos

mantienen varios días de acumulación, en donde el valor negativo de la asimetría define la tendencia a las fracciones finas. Esto mostraría que existe una influencia directa de una re-depositación de la ceniza re-movilizada por los vientos.

Caso contrario, la distribución bimodal en el evento del 28 de mayo de 2010, se debe principalmente a lo energético de la explosión que generó una columna eruptiva de 10 km snc, y que el ambiente de depositación fue turbulento. Además muestra que varias columnas eruptivas acompañaron a la gran explosión proyectando a la atmósfera material volcánico con mayor grado de fragmentación.

Considerando los componentes litológicos de la ceniza, la escasez de líticos en los depósitos iniciales de la fase eruptiva enero-febrero de 2010, muestran que la apertura del conducto no fue súbita, y más bien evolucionó paulatinamente a funcionar como un sistema de conducto abierto, así como también la presencia de cristales libres en los depósitos, los valores de parámetros morfológicos como convexidad y circularidad (Fig. 15).

Los fragmentos vesiculados (Fig. 14) es indicativo de una fragmentación enteramente de tipo stromboliana de un cuerpo magmático desgasificado y de alta viscosidad [10]. La abundante presencia de componentes densos con cristales de plagioclasas y piroxenos, fragmentos escoriáceos y poca presencia de fragmentos cristalinos libres, en el evento del 28 de mayo de 2010, que morfológicamente tienen valores bajos de convexidad, circularidad y cociente de aspecto bajo; y valores importantes de elongación (Fig. 15), muestran un claro rompimiento de un tapón en el viento principal.

Así como también la alta vesicularidad, que generalmente son de forma poligonal, y que muestran que las paredes exteriores colapsaron mientras la gota de magma aun se encontraba fundida. La presencia de vesículas que estallaron después de la fragmentación (Fig. 16b), indican claramente una interacción de agua con el magma o fragmentación hidrovulcánica [10] La aparición de texturas tipo cabellos de Pelée (Fig. 15c, d) y estructuras fluidas tipo lágrimas con superficies lisas y redondas (Fig. 16e, f), evidencian que el magma proyectado hacia superficie aun se encontraba caliente y fundido.

Esto indica que producto de una cierta actividad freato-magmática que dio origen al primer evento tipo “vulcaniano” con la liberación del

magma de poca viscosidad luego del estallido o rompimiento de un tapón en superficie. Similar fenómeno, pero en menor proporción al 28 mayo, generó el segundo evento tipo “vulcaniano”, el evento eruptivo registrado el 22 de noviembre de 2010.

5. CONCLUSIONES

- El análisis textural, morfológico y litológico en las muestras de ceniza de enero-febrero de 2010 indican un claro comportamiento estromboliano, el cual proyectó hacia superficie un magma desgasificado y prácticamente frío. El bajo contenido de líticos y de fragmentos cristalinos a inicios de este periodo eruptivo implica una apertura paulatina del conducto volcánico.
- El 28 de mayo de 2010, los patrones texturales: fragmentos vesiculados hidrovulcanicamente, cabellos de Pelée y estructuras fluidas muestran un cierto grado de freato-magmatismo que liberó hacia superficie el magma aún fundido y con un importante contenido de gases. Además el alto contenido de líticos densos, fragmentos escoráseos y poca presencia de clastos cristalinos, muestran la existencia de un tapón en superficie, que estalló por la presurización de los gases al interior, originando un evento “Vulcaniano”.
- La alta vesicularidad de los componentes de la ceniza del evento del 22 de noviembre de 2010, implican un magma con importante desgasificación y pérdida de volátiles. Esta desgasificación no produjo presurización suficiente en el sistema volcánico. Además un periodo de alta pluviosidad en la zona del volcán produjo una leve fragmentación hidrovulcánica, incrementando así la viscosidad del cuerpo magmático en profundidad. Sin embargo; la presencia de clastos densos de color gris azulado (andesita) con cristales de plagioclasas y en ocasiones con vesículas tabulares, muestra que existió un tapón el cual no permitía en parte la desgasificación interna del volcán, lo cual hizo que se acumule presión y desencadene en un evento tipo vulcaniano

RECONOCIMIENTO

Este trabajo fue gracias a la colaboración que mantiene el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional con el Institut de Recherche pour le Développement (IRD-Francia) y la Universidad de Nice Sophia-Anipolis de Francia. Un agradecimiento muy especial al personal del Área de Vulcanología

del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional por contribuir desinteresadamente a la recolección de datos de campo, además por sus valiosas discusiones cerca del estilo eruptivo del volcán Tungurahua durante sus fases eruptivas.

REFERENCIAS

- [1] Bonadonna, C., Ernts G. G. J., Sparks, R. S. J. “Thickness variations and volumen estimation of tephrafall deposits: the importance of particle Reynolds Number”. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* V. 81, pp. 173-184., 1998.
- [2] BONADONNA, C., MACEDONIO, G., SPARKS, R. S. J. “Numerical modelling of tephrafallout associated with dome collapse and Vulcanian explosions: application to Hazard assessment on Monserrat”. In: DRUITT, T. H., KOKELAAR, B. P., (eds). *The eruption of Soufrière Hills Volcano, from 1995 to 1999.* Geol. Soc. London Mem. v. 21, pp. 517-537., 2002.
- [3] Bonadonna C., Phillips J. “Sedimentation from Sorong volcanic plumes”. *J. Geophys. Res.* 108:2340-2368, 2003.
- [4] Bonadonna, C., Houghton, B. F. “Total grain-sized distribution and volumen of tephrafall deposits”. *Bull. Volcanol.*, v. 67, pp. 441-456., 2005.
- [5] Bustillos J. “Transición del estilo eruptivo durante las erupciones andesíticas en sistema abierto: Contribución al estudio de los depósitos de ceniza del volcán Tungurahua”. Tesis de Master 2, Universidad de Nice Sophia Antipolis, Francia, 48 pp., 2010.
- [6] Carey, S., Sigurdsson, H. “The 1982 eruptions of El Chichón volcano, Mexico (2): Observations and numerical modelling of tephra-fall distribution”. *Bull. Volcanol.*, v.48, pp. 109-126., 1986.
- [7] Carey S., Bursik M. “Volcanic Plumes”. *Encyclopedia of Volcanoes.*, 2000.
- [8] Folch, A., Costa, A., Durant, A., and Macedonio, G: “A model for wet aggregation of ash particles in volcanic plumes and clouds: 2. Model application”. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, B09202, doi:10.1029/2009JB007176., 2010.

- [9] Fierstein J., Nathenson M. (1992). Another look at the calculation of fallout tephra volumes. Bull. Volcanol., v. 54, pp. 156-167.
- [10] Heiken G., Kenneth Wohletz K. "Volcanic Ash". University of California Press, 246 pp., 1985.
- [11] Inman, D. L. "Measures for describing the size distribution of sediments". J. Sed. Petrol., v. 22, pp. 125-145., 1952.
- [12] Legros F. "Minimum volumen of a tephra fallout deposit estimated from a single isopach". J. Volcanol. Geotherm. Res. ,v. 96, pp 25-32., 2000.
- [13] Pyle D. The thickness, volumen and grain size of tephra fall deposits. Bull. Volcanol., v. 55, pp 523-535., 1989.

