

VOLCÁN TUNGURAHUA: CÁLCULO INDIRECTO DEL MATERIAL SÓLIDO EMITIDO (TEFRA)

Jorge Bustillos; Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Gorky Ruiz; Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Jean-Luc Le Pennec; Laboratorio "Magmas et Volcans", Universidad Blaise Pascal, Francia

Introducción

La tefra está constituida por fragmentos de roca y lava que han sido expulsados hacia la atmósfera y que luego caen nuevamente sobre la superficie terrestre. Las partículas son transportadas hacia arriba por medio de columnas eruptivas, las cuales consisten de una zona inferior de empuje por gases, y una zona superior convectiva (Sparks y Wilson, 1976). Una columna continuará ascendiendo por convección hasta que su densidad sea igual a la de la atmósfera circundante. Luego sufrirá una expansión lateral, pero también continuará ascendiendo debido a la inercia, y formará una amplia nube en forma de paraguas (Sparks, 1986; Sparks et al., 1987), que juega un rol importante en el transporte de piroclastos (Carey y Sparks, 1986) (Fig. 1). La altura de la columna eruptiva está determinada por la temperatura del material expedido y por la tasa de emisión del mismo, esto, junto con la dirección y fuerza de los vientos, son los factores que controlan el transporte de tefra a grandes distancias (Fig. 2).

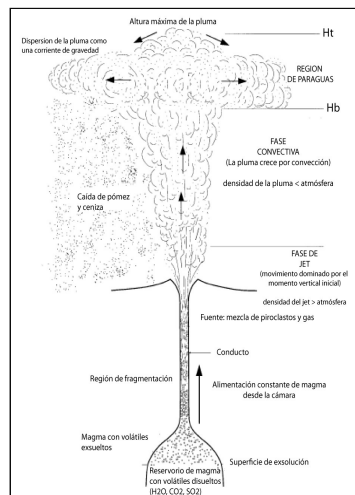


Figura 1. Formación de una columna eruptiva por la desgasificación de componentes volátiles desde una magma rico en sílice. H_t = altura máxima de la pluma; H_b = altura donde la densidad de la pluma es igual a la atmósfera (Modificado de Carey y Bursik, 2000).

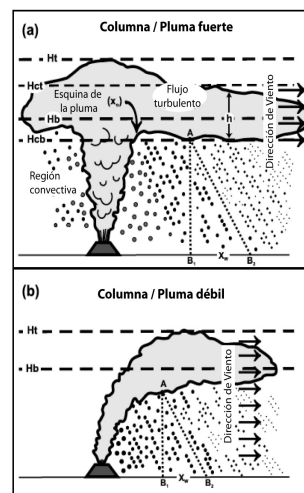


Figura 2. Esquema de las características principales de (a) Pluma fuerte y (b) Pluma débil. No a escala (Modificado de Bonadonna y Phillips, 2003).

Considerando que el fenómeno volcánico de mayor afectación a lo largo del periodo eruptivo del volcán Tungurahua ha sido la caída de tefra (ceniza y cascajo), y que su distribución fue en la zona central del Ecuador provocando caídas de ceniza en los alrededores del volcán principalmente en la zona occidental del volcán, se propone re-ajustar las ecuaciones que modelan la altura de las nubes de ceniza (Sparks., et al., 1986) con el caudal emitido para el caso del volcán Tungurahua considerando el periodo 2004-2011. Los cálculos tienen como fundamento valores reales como las alturas de las nubes de ceniza (base de datos IG. EPN - VAAC), volumen emitido (Le Bustillos, 2010, Le Pennec et al., 2011) y cálculos de la estratificación atmosférica (INAMHI-2004).

Modelo de las plumas volcánicas

Dado que el estilo eruptivo del Tungurahua se ha caracterizado por una actividad estromboliana-vulcaniana, en donde la descarga de gases y partículas volcánicas han ocurrido por una serie de explosiones discretas separadas en el tiempo, que en algunos

casos, la frecuencia de estas emisiones han sido suficientemente grandes como para generar una descarga casi continua de material. Si consideramos que el tiempo entre erupciones es mucho mayor que el tiempo de ascenso de la pluma, entonces la pluma es considerada como una pluma con un comportamiento termal, el cual es diferente a las plumas generadas por una descarga continua de material (Carey y Bursik, 2000). Bajo este contexto, es necesario hacer referencia a las plumas termales descritas por Sparks et al. (1986), en donde se realiza un ajuste y calibración de las ecuaciones que modelan la altura máxima de las plumas volcánicas y el volumen emitido. Es así que, la altura de la columna termal está dada por:

$$\text{Ec. (1)} \quad H_T = K F_T^{1/4} N^{-1/2}$$

Donde:

H_T = altura máxima de la pluma (m)

F_T = producto de flotamiento y el volumen de la pluma termal (m^4s^{-2})

N = ambiente de estratificación atmosférica (s^{-1})

K = constante adimensional de calibración (Tungurahua)

F_T está dado por:

$$\text{Ec. (2)} \quad F_T = \frac{V_{T_0} g (T_{T_0} - T_a)}{T_a}$$

Donde:

V_{T_0} = volumen inicial de la pluma (m^3)

T_{T_0} = temperatura inicial de la pluma (K)

g = aceleración de la gravedad (ms^{-2})

T_a = temperatura atmosférica a la altura H_T (K)

Utilizando los datos estadísticos de las explosiones registradas durante los periodos de alta actividad en el Tungurahua, al igual que las emisiones reportadas y los cálculos realizados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrografía (INAMHI) se logra calibrar las ecuaciones del modelo de plumas termales. Además con estos datos es posible calcular la descarga promedio de cada evento, así como también la altura media de las nubes de ceniza (Ruiz et al., no publicado), donde:

$$\text{Ec. (3)} \quad V_{\text{ol}_{\text{evento}}} = \frac{V_{\text{ol}_{\text{depositado}}}}{n_{\text{explosiones}}} \quad \text{Ec. (4)} \quad H_T = \frac{\sum \text{alturas}}{n_{\text{imágenes}}}$$

Con el volumen de cada evento se puede calcular el caudal (Q), el cual se obtiene al dividir el volumen del depósito para el periodo de actividad, de la misma manera se puede obtener la altura (H_T) promedio de las nubes de ceniza, dividiendo la suma total de las alturas para el número de eventos registrados, para lo cual se utiliza los reportes del satélite GOES-EAST-NOAA. Por otro lado, la temperatura (T_{T_0}) de las bombas y ceniza a la salida del cráter se encuentran alrededor de 900° C (Ruiz et al., no publicado) y la temperatura atmosférica (T_a) a diferentes alturas se determina en función del gradiente de temperatura atmosférica (Sparks et al., 1986) y se aplica a las alturas máximas de las columnas de ceniza.

$$\text{Ec. (5)} \quad \begin{aligned} T_a &= 273 - 6.5 (H) \text{ para: } 0 < H < 11 \text{ Km} \\ T_a &= 201.5 \quad \text{para: } 11 < H < 20 \text{ Km} \\ T_a &= 201.5 + 2(H - 20) \text{ para: } 20 < H < 40 \text{ Km} \\ H &= \text{altura de las nubes de ceniza en Km snm.} \end{aligned}$$

$$\text{Ec. (6)} \quad T_{T_0} = 900^\circ \text{ C} = 1173 \text{ K}$$

$$\text{Ec. (7)} \quad \text{Ambiente de estratificación (N): } N = 4.9 \text{ s}^{-1} \text{ (INAMHI)}$$

La constante K de la ecuación (1) se obtiene al resolver la ecuación (2) con los valores de

las ecuaciones (3) a (7), y por lo tanto el valor de $K = 912$ (Ruiz et al., no publicado) es adimensional y se aplica a todos los valores de las alturas de las nubes de ceniza reportados por el satélite. Sin embargo, esta base no cubre la totalidad de las alturas de las nubes de ceniza, por lo tanto es necesario ajustar la curva de volumen acumulado, en donde se define un factor de corrección:

$$\text{Ec. (8)} \quad \text{Factor corrección 1} = \frac{\text{volumen depositado}}{\text{volumen calculado (base IG-VAAC)}}$$

Según Ruiz et al. (no publicado) el factor de corrección tomando en cuenta los datos obtenidos durante el 2001, para los cuales se considera que en fases de menor actividad existe una relación directa con las pendientes en la fase es aproximadamente 17,64. Este factor de corrección (fc1) se aplica a todos los periodos similares a la fase de Agosto de 2001, por lo tanto:

Pendiente Agosto₂₀₀₁ (8,144) → fc1 (17,64)

Pendientes de 0.933 X = 2.02 (fc2)

Pendientes de 0.7 X = 1.52 (fc3)

Para pendientes menores a 0,7 se considera que no es necesario ajustar la curva ya que la actividad volcánica es relativamente baja y las nubes de ceniza registradas por la VAAC son coherentes con el grado de actividad volcánica (Ruiz et al., no publicado).

Resultados Obtenidos y Conclusiones

En la aplicación de esta metodología se utiliza 1453 datos de altura, rumbo y velocidad de las nubes de ceniza reportados por el satélite GOES-EAST-12 (NOAA/VAAC) y almacenados desde el 17 de octubre de 1999 hasta el 25 de mayo de 2011 (Tabla 1). La base de datos sísmicos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional que comprende más de un millar de datos complementa la validez de los datos utilizados. Una vez calibradas las ecuaciones procedemos a aplicarlas en la base de datos de las alturas de las nubes de ceniza. Considerando además el factor de corrección de 17.64, el cual se aplica a todos los periodos de pendiente similar a lo calculado por Ruiz et al. (no publicado) para agosto de 2001. En el presente estudio se realiza una evaluación a los eventos del 2008, 2010 y 2011 (Tabla 2, Fig. 3):

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	fecha	hora(UTC)	Alt(m)	Alt (Kmsnm)	Ta(final)*K	To(Lavas)*K	Constante N (s-1)	ln(Ft)	Ft (m4/s3)	V(m3)	
2	17-oct-99	13h15	12192,0	12,192	201,5	1173	912	4,9	13,55004771	768850,9357	16229,9
3	21-oct-99	13h15	5486,4	5,4864	237,3384	1173	912	4,9	10,35601693	31445,68118	813,924
1371	07-dic-10	18h09	7620,0	7,62	223,47	1173	912	4,9	11,6700332	117012,1667	2810,05
1372	08-dic-10	12h09	7010,4	7,0104	227,4324	1173	912	4,9	11,33650676	83826,69246	2057,38
1373	08-dic-10	18h10	7010,4	7,0104	227,4324	1173	912	4,9	11,33650676	83826,69246	2057,38
1374	08-dic-10	23h57	7315,20	7,3152	225,4512	1173	912	4,9	11,50674522	99383,88127	2412,90
1375	09-dic-10	11h53	7315,20	7,3152	225,4512	1173	912	4,9	11,50674522	99383,88127	2412,90
1376	09-dic-10	17h54	7315,20	7,3152	225,4512	1173	912	4,9	11,50674522	99383,88127	2412,90
1377	10-dic-10	11h53	7010,40	7,0104	227,4324	1173	912	4,9	11,33650676	83826,69246	2057,38
1378	10-dic-10	12h53	8839,20	8,8392	215,5452	1173	912	4,9	12,26371322	211866,8346	4866,95
1379	10-dic-10	14h09	10058,40	10,0584	207,6204	1173	912	4,9	12,78056014	355243,9955	7796,01
1380	10-dic-10	20h26	10058,40	10,0584	207,6204	1173	912	4,9	12,78056014	355243,9955	7796,01
1381	11-dic-10	16h51	7620,00	7,62	223,47	1173	912	4,9	11,6700332	117012,1667	2810,05
1382	12-dic-10	13h44	6705,60	6,7056	229,4136	1173	912	4,9	11,15869971	70171,65344	1740,89
1383	12-dic-10	19h39	6705,60	6,7056	229,4136	1173	912	4,9	11,15869971	70171,65344	1740,89
1384	13-dic-10	19h30	6096,00	6,096	233,376	1173	912	4,9	10,77745899	47928,18348	1214,69
1385	14-dic-10	19h23	6705,60	6,7056	229,4136	1173	912	4,9	11,15869971	70171,65344	1740,89
1386	23-dic-10	15h30	7010,40	7,0104	227,4324	1173	912	4,9	11,33650676	83826,69246	2057,38
1387	25-dic-10	22h53	7010,40	7,0104	227,4324	1173	912	4,9	11,33650676	83826,69246	2057,38
1388	21-abr-11	00h13	7620,00	7,62	223,47	1173	912	4,9	11,6700332	117012,1667	2810,05
1389	21-abr-11	06h08	7620,00	7,62	223,47	1173	912	4,9	11,6700332	117012,1667	2810,05
1390	21-abr-11	12h10	7620,00	7,62	223,47	1173	912	4,9	11,6700332	117012,1667	2810,05
1391	22-abr-11	00h01	7620,00	7,62	223,47	1173	912	4,9	11,6700332	117012,1667	2810,05
1392	22-abr-11	05h53	7620,00	7,62	223,47	1173	912	4,9	11,6700332	117012,1667	2810,05
1393	23-abr-11	19h31	6096,00	6,096	233,376	1173	912	4,9	10,77745899	47928,18348	1214,69
1394	24-abr-11	01h24	8839,20	8,8392	215,5452	1173	912	4,9	12,26371322	211866,8346	4866,95
1395	24-abr-11	07h25	8839,20	8,8392	215,5452	1173	912	4,9	12,26371322	211866,8346	4866,95
1396	24-abr-11	13h01	9753,60	9,7536	209,6016	1173	912	4,9	12,55747351	314102,1433	6973,22
1397	24-abr-11	15h04	5181,60	5,1816	239,3196	1173	912	4,9	10,12738327	25018,81133	654,365
1398	24-abr-11	19h23	9144,00	9,144	213,564	1173	912	4,9	12,39931942	242636,4289	5511,14
1399	25-abr-11	06h50	9144,00	9,144	213,564	1173	912	4,9	12,39931942	242636,4289	5511,14
1400	25-abr-11	12h28	9144,00	9,144	213,564	1173	912	4,9	12,39931942	242636,4289	5511,14
1401	25-abr-11	14h20	9144,00	9,144	213,564	1173	912	4,9	12,39931942	242636,4289	5511,14
1402	25-abr-11	20h14	9144,00	9,144	213,564	1173	912	4,9	12,39931942	242636,4289	5511,14
1403	26-abr-11	02h08	9144,00	9,144	213,564	1173	912	4,9	12,39931942	242636,4289	5511,14
1404	26-abr-11	13h43	9144,00	9,144	213,564	1173	912	4,9	12,39931942	242636,4289	5511,14
1405	26-abr-11	18h45	11582,40	11,5824	197,7144	1173	912	4,9	13,34487454	624604,88	12920,6
1406											

Tabla 1: Hoja de cálculo en donde se muestra los parámetros utilizados en la estimación del material sólido emitido a partir de la calibración de Ruiz et al. (no publicado).

PERIODO	VOLUMEN ACUMULADO (m3)	VOL. / EVENTO (m3)	Caudal (m3/seg)	Altura de las plumas (Ht) (msnm)
06-08 de Febrero de 2008	1,900 E+06	5400	7,3	8900
Enero-Febrero-2010	2,900 E+06	2300	0,6	7400
28 de Mayo de 2010	2,300 E+06	1300	1,2	8900
23 de Noviembre-25 de Diciembre de 2010	2,500 E+06	2800	0,8	7800
23-30 de Abril de 2011	4,100 E+06	6600	6,7	9500
01-25 de Mayo de 2011	1,700 E+06	2300	5,8	6900

Tabla 2: Volumen acumulado de ceniza obtenidos a partir del modelo de plumas volcánicas de Sparks et al. (1986) calibradas para el volcán Tungurahua (Ruiz et al., no publicado). Los valores de ceniza acumulada obtenidos resultan coherentes con los estimados o calculados por Bustillos (2010) para los mismos periodos explosivos

Además con la aplicación de esta metodología se pudo estimar que el volumen de ceniza emitido por el volcán Tungurahua desde 1999 hasta mayo de 2011 es de 112 millones de metros cúbicos de ceniza (Fig. 3).

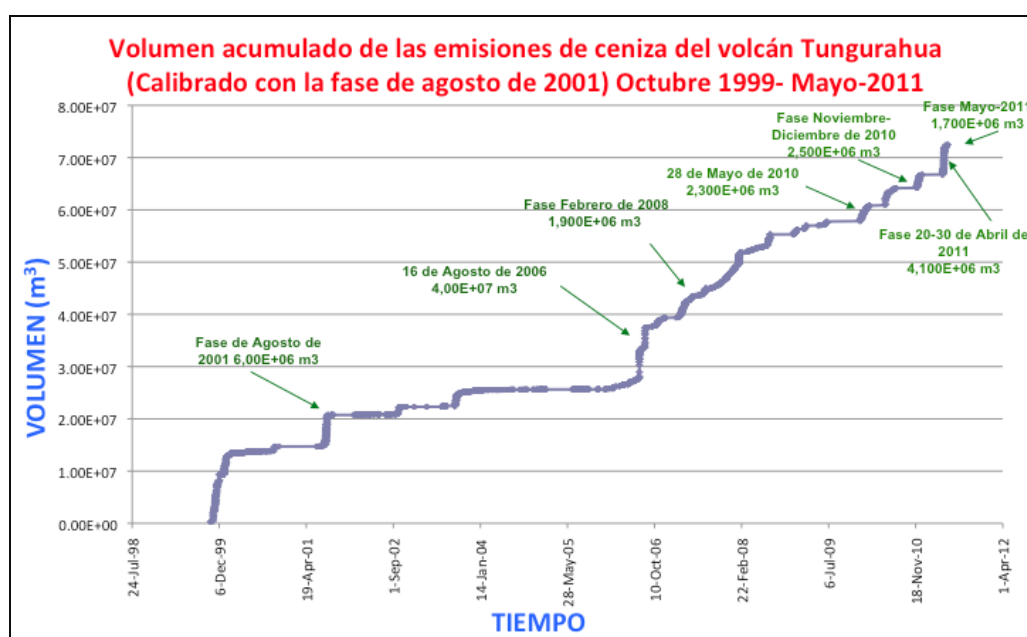


Figura 3: Volumen acumulado de emisiones de ceniza del volcán Tungurahua (calibrado con la fase de agosto de 2001) Octubre 1999 – Mayo 2011 (Modificado de Bustillos, 2010).

Referencias

- Bonadonna C., Phillips J. (2003). Sedimentation from Sorong volcanic plumes. *J. Geophys. Res.*, Vol 108, NO. B7 2340; doi: 10.1029/2002JB002034, 2003.
- Bustillos J. (2010). 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.
- Carey S., Bursik M. (2000). Volcanic Plumes. *Encyclopedia of Volcanoes*.
- Le Pennec J.-L., Ruiz G., Ramón P., Palacios E., Mothes P., Yepes H. (2011). Impact of tephra falls on Andean communities: The influences of eruption size and weather conditions during the 1999–2001 activity..., *J. Volcanol. Geotherm. Res.* (2011), doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.06.011
- Ruiz G., Le Pennec J.-L., Palacios E., Hall M. L., Yepes H., no publicado. Cálculo Indirecto del Volumen de Material Emitido por el Volcán Tungurahua 1999-2004.
- Sparks R. S. J., Wilson L. (1976). A model for the formation of ignimbrite by gravitational column collapse, *J. Geol. Soc. London*, v. 132, pp. 441-452.
- Sparks R. S. J., Moore J. G., Rice C. J. (1986). The initial giant umbrella cloud of May 18th, explosive eruption of Mount St. Helens, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 28, pp. 257-274.
- Sparks R. S. J. (1986). The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns, *Bull. Volcanol.*, v. 48, pp. 3-15



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA
INSTITUTO GEOFÍSICO



7 mas **Jornadas**
en **Ciencias**
de la Tierra
y I **Encuentro**
sobre Riesgos y
Desastres

23 - 25 de Noviembre de 2011, Quito



PETROAMAZONAS EP



INIGEMM

Instituto Nacional de Investigación
Geológica Minero Metalúrgica
República del Ecuador



OCP ECUADOR S.A.



EP PETROECUADOR

Memorias de las 7 mas Jornadas en Ciencias de la Tierra
Editado por: Dr. Daniel Andrade Varela
Publicado por: Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
Diagramación: Equator Meetings S.A., www.equatormetings.com
Año: 2011
ISBN: 978- 9978-383-17-9