

ERUPCIÓN DEL VOLCÁN FUEGO (GUATEMALA, 1974): ¿EVIDENCIA DE UNA FRAGMENTACIÓN TERCIARIA?

FUEGO VOLCANO ERUPTION (GUATEMALA, 1974): EVIDENCE OF A TERTIARY FRAGMENTATION?

José Brenes-André

Red Ciudadana de Estaciones Meteorológicas, Apdo. 290-3015
San Rafael de Heredia, Costa Rica
jbre54@gmail.com

(Recibido: 01/04/2014; aceptado: 01/11/2014)

ABSTRACT: Values for mode and dispersion calculated from SFT application to volcano Fuego 1974 eruption were analyzed with the SFT (Sequential Fragmentation/Transport) model. Analysis results show that the ideas initially proposed for Irazú can also be applied to volcano Fuego. Experimental evidence was found to prove the existence of a tertiary fragmentation process, as suggest itself from Irazú analysis.

Keywords: SFT, Irazú, Fuego volcano, tertiary fragmentation.

RESUMEN: Los valores de moda y dispersión obtenidos a partir de la SFT para la erupción del volcán Fuego (Guatemala, 1974) fueron analizados con ayuda del modelo SFT (Sequential Fragmentation/Transport). Los resultados del análisis muestran que las ideas inicialmente desarrolladas para el Irazú, pueden aplicarse también al volcán Fuego. Así mismo, se encontró evidencia experimental que corrobora la existencia de fragmentaciones terciarias (definidas en el texto).

Palabras clave: SFT, Irazú, volcán Fuego, fragmentación terciaria.

INTRODUCCIÓN

En Brenes (2013), aplicando la Teoría de Fragmentación Secuencial (SFT, por su nombre en inglés) a las erupciones del volcán Irazú tanto de 1723, como de 1963-65, se desarrolló una teoría fractal de una erupción volcánica, fundamentada en las granulometrías. Ampliando el análisis de Wohletz et al (1989), el autor mostró que se puede obtener información valiosa sobre cada uno de los procesos involucrados: balístico, oleada, saltación y suspensión, en cada uno de los dos eventos permitiéndole compararlos con mayor detalle.

La introducción de una nueva dimensión fractal (Brenes & Alvarado; 2013) permite distinguir entre eventos que involucran magma efusivo de aquellos con magma explosivo. Si ambos casos se analizan conjuntamente con ayuda de la relación de Mandelbrot, $D + H = n + 1$, se puede definir el coeficiente de Hurst, o de rugosidad, por medio de $H = 1 - |\gamma|$, el que se asocia a procesos eminentemente magmáticos ($0 < H < 0,5$) o anti-persistentes, o bien a los básicamente freatomagmáticos, o persistentes ($0,5 < H < 1$).

Como corolario, los procesos de fractura primarios (los habituales) corresponderán a valores de $n = 0$, pudiéndose definir, por analogía, fragmentaciones secundarias cuando $n = 1$. En este contexto se entenderá por fragmentación secundaria aquella en la cual la partícula, como consecuencia de colisiones se fragmenta, dejando expuesta una porción de las vesículas que contiene en su interior, favoreciendo una subsecuente fracturación al explotar las vesículas debido a que su presión interna es mucho mayor que la externa (Kaminski & Jaupart, 1997, 1998).

Matemáticamente al menos, estas ideas pueden extenderse y definir fracturas asociadas a $n > 1$. Recordando que $0 \leq H \leq 1$ y que $D + H = n + 1$ encontramos que se debe definir $H = n - \gamma$, por lo que la dimensión fractal se mantendrá como $D = 3(1 + \gamma)$ incluso para fragmentaciones terciarias ($n = 2$), cuaternarias ($n = 3$), etc., aunque físicamente los procesos asociados a ellas pueden no llegar a existir, por condiciones energéticas, reológicas, coincidencia de varias condiciones muy difíciles de obtener, etc. El coeficiente de fragmentación seguirá definiéndose como $\text{Moda}/(n - 1 + \gamma)$.

Como se indicó, el uso de SFT para estudiar fragmentaciones secundarias se propuso recientemente, aplicado exclusivamente a las erupciones de 1723 del volcán Irazú, por lo que quedan muchas interrogantes que contestar: ¿puede ser que la concordancia de la teoría con lo medido sea algo fortuito?; ¿sucederá que aunque la base teórica sea razonable, esta sea aplicable únicamente al volcán Irazú? Esta son más que preguntas retóricas, pues la composición geoquímica de las rocas volcánicas del Irazú y los volcanes vecinos es inusual comparada tanto con los otros volcanes del Arco Volcánico de América Central, como con el espectro de los volcanes mundialmente (Benjamin et al., 2007). Y aun en el caso de que la fragmentación secundaria fuera también aplicable a otros volcanes, eso no implica necesariamente que también existan y/o se produzcan fragmentaciones terciarias.

CENIZAS FINAS

En los últimos años se ha reconocido que las cenizas muy finas contienen información valiosa para entender los fenómenos presentes durante un proceso eruptivo. La dificultad de recogerlas sin contaminación y lo pequeño de las mismas, ha imposibilitado analizarlas a profundidad, lo que a su vez dificulta comprobar si las ideas de fragmentación terciaria apuntadas tienen o no sustento experimental.

Las cenizas muy finas encontradas a cientos de kilómetros de la fuente no caen con la velocidad terminal esperada, pues se agregan y se depositan en el suelo varios órdenes de magnitud más rápido. (Carey & Sigurdsson, 1982; Sorem, 1982; McGimsey et al, 2002). Sin embargo, un reciente artículo de Rose & Durant (2009) proporciona una muy valiosa oportunidad de probar la idea de que, además del proceso de agregación, la tephra puede estar sometida a fragmentaciones terciarias, pues analiza, utilizando SFT, las granulometrías de la erupción de 1974 del volcán Fuego (Guatemala), recogidas a 20, 38,40 200 y 252 Km del cráter. Esta erupción fue de carácter sub-pliniana, y género magma basáltico.

Las características de las cenizas finas reportadas en Rose & Durant (2009) son relativamente generales pues muestra depósitos de ceniza con una distribución bimodal en tamaño con modos en ≈ 10 y ≈ 200 μm , con el modo más fino volviéndose el dominante al alejarse de la fuente, hasta volverse una distribución esencialmente unimodal (Sparks et al., 1997).

Rose & Durant (2009) entienden por “cenizas finas” (fine ashes) aquellas con diámetros < 1000 μm que se depositan con Reynolds < 500 . Por “cenizas muy finas” (very fine ash) debe entenderse las partículas con diámetros < 30 μm que caen al suelo en régimen laminar, Reynolds $< 0,4$. Estas últimas son muy peligrosas para la salud animal y humana pues afectan sensiblemente las vías respiratorias cuando su tamaño es < 10 μm (Horwell & Baxter, 2006)

ERUPCIÓN VOLCÁN FUEGO, 14 OCTUBRE 1974

La erupción del 14 Octubre, 1974 del volcán Fuego está caracterizada por columnas de hasta 14 Km de altura, con múltiples explosiones que eyectaron un DRE de 0,021 Km³ en un periodo de 5 horas (Stoiber, 1974; Rose et al., 1978; Rose et al., 2008). La dispersión de la tephra, el tiempo total del periodo eruptivo, y la naturaleza prácticamente sostenida de la erupción permite clasificar el evento como sub-pliniano (Rose et al., 2008). La distribución en tamaño de las vesículas es bi-modal, lo que sugiere al menos dos eventos de nucleación durante la erupción. Aun cuando el modo más grande tiene la menor densidad en número de vesículas, este representa el grueso del volumen total de las vesículas (Genareau et al., 2013).

Un examen preliminar de los depósitos de ceniza (tomados unos pocos días después de la erupción) reveló la existencia de dos tipos de piroclastos, que fueron denominados simples y complejos (Proussevitch et al., 2011; Genareau et al., 2012). La ceniza simple preserva la huella de una vesícula en cada una de sus facetas. La compleja, por su parte, está constituida por partículas semejantes a escoria o a púmice, que preservan la

huella de múltiples vesículas, y que también pueden contener en su interior vesículas completas, no fragmentadas.

Otra característica singular de esta erupción es la de que el magma tenía una alta concentración de H₂O y de CO₂, con valores de hasta 1.500 ppm de CO₂. Esto implica que las inclusiones (con composiciones desde basalto hasta andesita) estaban en contacto con una fase gaseosa muy rica en CO₂ ($> 90\text{mol}\%$). (Berlo et al., 2012). Es muy probable que entre más explosiva sea una erupción, mayor será la cantidad de cenizas finas producidas, debido a la presencia de numerosas, y más pequeñas vesículas altamente sobrecargadas (Rose & Durant, 2009).

Los datos que se utilizaron fueron obtenidos de un análisis utilizando SFT, a partir de granulometrías obtenidas en el ámbito de sub-micrones hasta milímetros. Los instrumentos utilizados fueron: (1) MicrotracR SRA (*Standard Range Analyzer*) 9210-1-10-1 *laser particle size analyzer*, y (2) *Malvern Mastersizer 2000 laser particle size analyzer*.

ANÁLISIS

Dado lo crucial que es este análisis para determinar la validez de las ideas propuestas en trabajos anteriores, se presentará un análisis muy detallado, que proponemos como una guía para análisis posteriores.

Por analogía con la propuesta de Wohletz & Brown (1989), empezaremos considerando si la dimensión $D = -3\gamma$, puede ser cambiada a $D = +3\gamma$ para casos de agregación, usando como guía las observaciones de que la derivación de Wohletz & Brown sirve tanto para fragmentaciones como para agregaciones, y la de que valores positivos de γ deben ser asociados a casos de agregación. Buscamos examinar si en este caso se encuentra una relación lineal entre el coeficiente de fragmentación (o de agregación, para ser más exactos) y la moda, con una pendiente positiva. Según se observa en la figura 1, la recta obtenida con un $R^2 = 0,76$, sugiere que los procesos de agregación pueden ser analizados de manera similar a los de fragmentación.

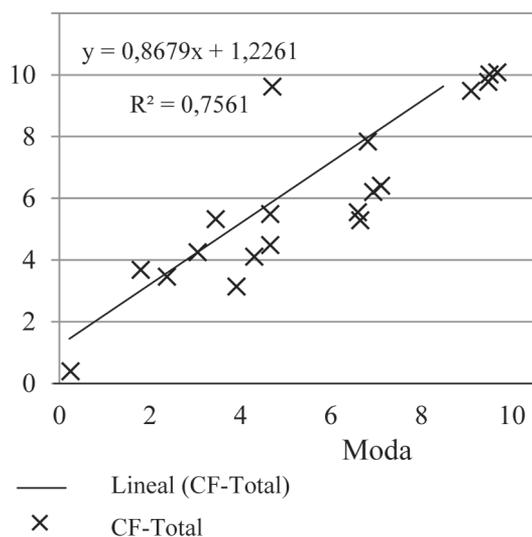


Fig. 1: Gráfico del Coeficiente de Fragmentación vs Moda, calculado utilizando como dimensión fractal $D = +3\gamma$, propuesta para agregación, como lo opuesto a una dimensión fractal de $D = -3\gamma$ propuesta para fragmentación.

Al existir también la posibilidad de que los datos del volcán Fuego reflejen tanto casos de agregación, como de fragmentaciones terciarias a las que debería entonces aplicarse la propuesta de Brenes (2013) de que el factor de fragmentación se debe entonces calcular con una dimensión fractal $D = 3(1+\gamma)$, exploraremos también esa alternativa.

Encontramos que a pesar de que en ambos casos se obtiene una relación lineal con pendiente positiva, el coeficiente $R^2 = 0,76$ se queda corto al valor de $R^2 = 0,96$ obtenido con todos los 17 puntos experimentales en el segundo caso (Fig. 2). Además, la segunda recta pasa más cerca del origen, en concordancia con la propuesta de Wohletz (1983) de que tephra con una moda mayor a cero debe considerarse como de origen freatomagmático, una explicación razonable para esta parte de la tephra eyectada dado el carácter sub-pliniano de la erupción de Fuego.

Juzgamos que es más razonable que estemos frente a un simple proceso de fractura pues asociar este valor tan alto de $R^2 = 0,96$ a procesos de agregación implicaría que todos los factores involucrados (la probabilidad de que a causa de una colisión dos partículas queden unidas, la

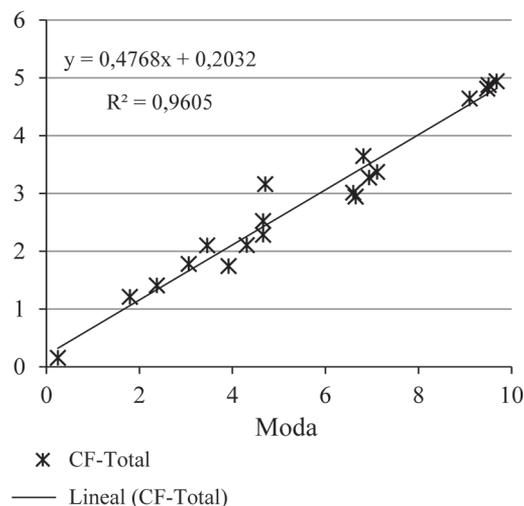


Fig. 2: Gráfico del Coeficiente de Fragmentación, calculado según Brenes (2013) vs la moda para todos los valores reportados en Rose & Durant (2009), sin discriminación por distancia ni por proceso de fragmentación.

probabilidad de colisión entre dos partículas en la pluma, la densidad de partículas de cada tamaño, la presencia o no de la cantidad de agua en la atmósfera, etc.), a pesar del carácter caótico del proceso, llegaron a conjugarse justo de la manera apropiada para producir una relación lineal tan marcada, algo muy improbable para nosotros.

Pasaremos, por lo tanto, a estudiar la posibilidad de que los valores medidos para la erupción del volcán Fuego sean una prueba de la existencia de las fragmentaciones terciarias ($1 < \gamma < 2$) propuestas en Brenes (2013). Tal como ahí se propone, cada sub-población es producto de un proceso diferente, por lo que los datos en este caso se deben desagregar de manera que los valores de dispersión en el ámbito $-1 < \gamma < 0$ se asociarían a una fragmentación normal. Para valores de dispersión positivos, se aplicará la siguiente regla: el ámbito $0 < \gamma < 1$ estará asociado a fragmentaciones secundarias ($n = 1$) y el ámbito $1 < \gamma < 2$ se asociará con fragmentaciones terciarias ($n = 2$).

Esta propuesta concuerda con la distribución bi-modal tamaño de vesículas reportada por Genareau et al. (2013), sugerentes de un mínimo de dos eventos de nucleación: uno con vesículas más grandes que ocurre a profundidad en el conducto, con un crecimiento difusivo y

de descompresión, y quizá con coalescencias; y un segundo evento, con vesículas más pequeñas, poco tiempo antes de la fragmentación.

La aplicación de la SFT a estos procesos requiere que el proceso de conminución pueda darse tanto en el conducto, como en las corrientes piroclásticas. Para ampliar sobre estos puntos, se refiere al lector a Dufek & Manga (2008), Rose & Durant (2009), y Dufek et al (2012).

Al ordenar los valores reportados en Rose & Durant (2009) (Cuadro 1) se hace evidente un patrón: Las sub-poblaciones 1 y 4 corresponden a fragmentaciones secundarias, que denominaremos SEC1 y SEC2, respectivamente, en tanto que las sub-poblaciones 2 y 3 corresponderían a fragmentaciones terciarias, en adelante denominadas TER1 y TER2, respectivamente, como se deduce de la dispersiones respectivas. Los 3 casos siguientes, que se denominarán la triada: la moda 4,71, para 38 km, y las modas 4,66 y 6,82, para la distancia 252 km según el patrón deberían asignarse a una terciaria, pero sus dispersiones respectivas ($\gamma = 0,49$, $\gamma = 0,85$ y $\gamma = 0,87$) corresponden a una fragmentación secundaria, se dejaron fuera del análisis a partir de este punto. Sin embargo, en la figura 3 se incluyó como parte de la población SEC1.

Procedemos a analizar si, para cada una de las sub-poblaciones, se cumple que el coeficiente de fragmentación esta linealmente relacionado con la moda, como se esperaría para datos producto de

un mismo mecanismo. La primera sub-población secundaria cumple con ese requisito con un excelente $R^2 = 0,99$. La cuarta sub-población también lo hace, aunque con un menor $R^2 = 0,86$, posiblemente por lo cercano que están las modas entre si, que la vuelven muy sensible a cualquier variación de la dispersión asociada (Fig. 3). Las pendientes son bastante parecidas, y en el caso del primero conjunto la recta pasa muy cerca del origen.

Las dos fragmentaciones terciarias también cumplen con la relación lineal esperada, (Fig. 4). Los valores de R^2 de 0,89 y 0,94 son bastante altos como para asegurarlo. Proponemos entonces que la aplicación de las ideas de fragmentación diseñadas para $n = 0$ son también aplicables para $n \neq 0$.

Queda por analizar si la sub-población SEC1 puede dar origen a las sub-poblaciones TER1 y TER2, como podría esperarse dado que el tamaño de las partículas involucradas. Si así fuese, el porcentaje en peso de SEC1 disminuiría mientras que simultáneamente los porcentajes de la sub-población TER2 y TER3 aumentan, conforme la distancia al cráter va en aumento. La figura 5 muestra una relación lineal, que sugiere que el proceso es posible para los dos casos. La pendiente puede interpretarse como la probabilidad del proceso de fragmentación. La posibilidad que SEC1 produzca SEC2, a partir de los resultados de esta gráfica, no se puede comprobar por que la pendiente es muy cercana a cero.

Cuadro 1

Agrupamiento de los datos (Rose & Durant, 2009) para mostrar el patrón subyacente

Distancia	Secundaria			Terciaria		
	Moda	Dispersión	%	Moda	Dispersión	%
22	0,25	0,65	0,62	3,92	1,25	0,31
	9,51	0,95	0,01	6,65	1,26	0,05
38	1,80	0,49	0,92	4,71	0,49	0,05
				6,94	1,12	0,03
40	2,38	0,69	0,48	4,31	1,05	0,42
	9,48	0,97	0,02	6,60	1,19	0,08
200	3,06	0,72	0,46	4,66	1,04	0,45
	9,68	0,96	0,02	7,11	1,11	0,07
252	3,46	0,65	0,54	4,66	0,85	0,54
	9,51	0,96	0,04	6,82	0,87	0,01

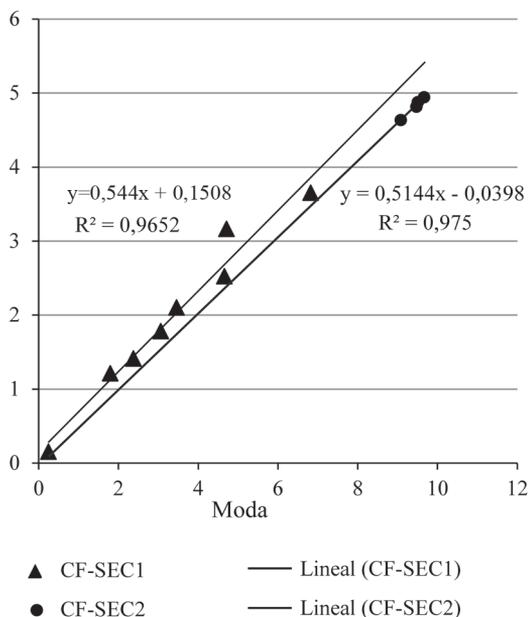


Fig. 3: Gráfico del Coeficiente de fragmentación vs la moda, para las dos sub-poblaciones asociadas a fragmentaciones secundarias. Incluye la triada (ver texto) como parte de SEC1.

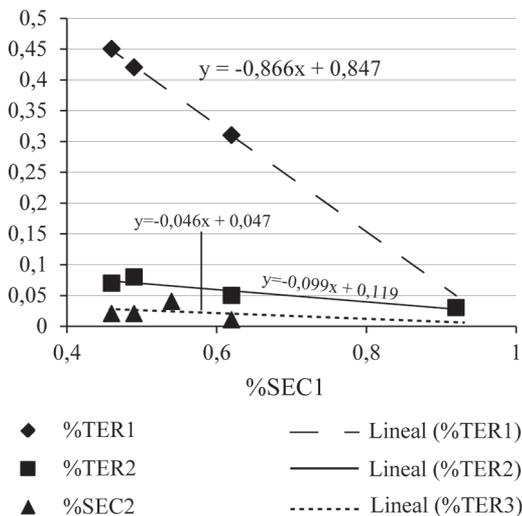


Fig. 5: Gráfico del % por peso de las sub-poblaciones TER1, TER2, y SEC2 respecto al % por peso de la sub-población SEC1. La relación lineal entre SEC1 y SEC2 tiene una pendiente e intercepto muy cercanos a cero, lo que sugiere son independientes.

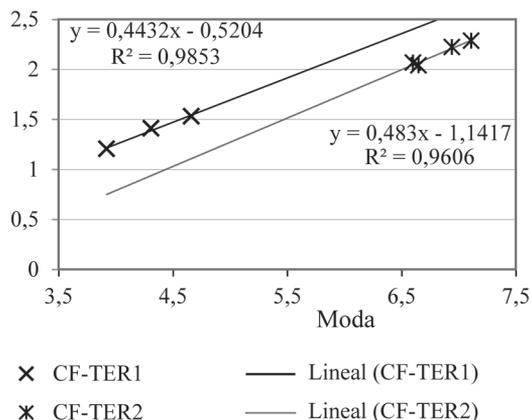


Fig. 4: Gráfico del Coeficiente de fragmentación vs la moda de las dos sub-poblaciones asociadas a fragmentaciones terciarias.

Estas consideraciones concuerdan con los hallazgos reportados en Genareau et al. (2013), donde se indica que las muestras tomadas del volcán Fuego contienen más partículas complejas (con evidencia de múltiples vesículas, algunas sin explotar) y más grandes (relativas a las de Mount St. Helens), además de mantener una fracción mayor de vesículas grandes. Esos autores interpretaron este hallazgo como resultado de una tasa de descompresión menor y/o una mayor viscosidad del magma de Fuego, en línea con una fracción acumulada de vacío (cumulative void fraction) de $0,749 \pm 0,051$, opuesto a la de $0,864 \pm 0,030$ obtenida para Mount St. Helens.

Esta idea se amplía al analizar el coeficiente de Hurst. El que esta concatenación entre las sub-poblaciones se mantenga conforme las partículas se alejan del cráter, sugiere que el proceso no dependerá de la distancia y que puede considerarse como un nuevo proceso de fragmentación, de manera similar a como se distinguen los procesos balístico, de saltación, de oleada, de suspensión, etc. En Rose & Durant (2009) se indica la comunicación como un posible proceso para la producción de las cenizas muy finas.

En la figura 6 exploramos esta idea al graficar el coeficiente de fragmentación del conjunto correspondiente a cada distancia. En el cuadro 2 se resumen los valores de pendiente e intercepto

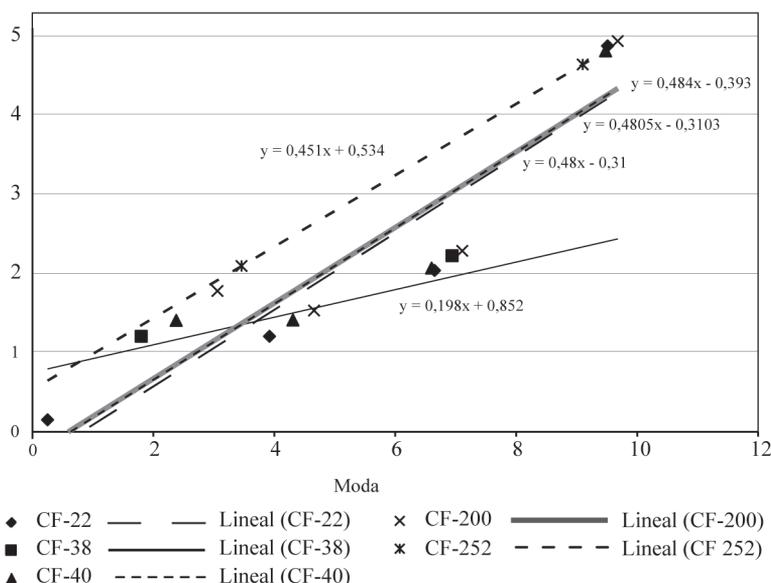


Fig. 6: Gráfico del Coeficiente de fragmentación vs la moda para cada conjunto de datos, agrupados según la distancia.

para cada recta. Con excepción de la distancia de 38 Km, los valores de la pendiente son prácticamente iguales. Los interceptos son también muy parecidos, excepto el correspondiente a la mayor distancia 252 km.

El modelo fractal de la erupción incluye el coeficiente de Hurst como $H = 1 - \gamma$. En la Figura 7, se presentan los coeficientes de Hurst asociados a cada una de las sub-poblaciones. Nótese que los coeficientes asociados a las sub-poblaciones SEC1 y SEC2 son todos anti-persistentes, como se esperaría de fragmentaciones al azar debidas a colisiones.

Los coeficientes para las sub-poblaciones TER1 y TER2 son mayores a 0,5 lo que se asocia a procesos persistentes, que concuerda con la idea de que las fragmentaciones terciarias son sub-producto de una fragmentación secundaria, SEC1, como se propuso líneas arriba.

Esta interpretación de una sub-población SEC1 fragmentándose en sub-poblaciones TER1 y TER2 no contradice las observaciones presentadas en Guo et al. (2004) sobre los procesos de agregación observados en cenizas muy finas, pues los tamaños requeridos para esa agregación son del orden de $< 30 \mu\text{m}$ en diámetro.

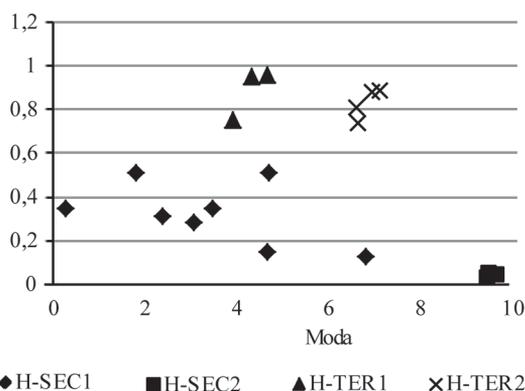


Fig. 7: Gráfico del Coeficiente de Hurst segregado por sub-población. Un valor menor a 0,5 se asocia con un proceso anti-persistente, de lo contrario el proceso es persistente.

CONCLUSIONES

La propuesta de analizar la relación funcional entre el coeficiente de fragmentación y la moda respectiva para cada sub-población por separado (Brenes, 2013), se ha aplicado con éxito a la erupción del volcán Fuego (Guatemala, 1974). La propuestas de que sub-poblaciones con

Cuadro 2

Datos de las rectas asociadas a cada una de las distancias (según Fig. 6)

Distancia	Pendiente	Intercepto
22	0,484	-0,394
38	0,198	0,852
40	0,481	-0,311
200	0,481	-0,31
252	0,451	0,535

dispersión positiva puedan deberse a fragmentaciones secundarias, y no a agregaciones (Brenes & Alvarado, 2013), sugirió un patrón en los datos de cenizas finas y muy finas incluidas en Rose & Durant (2009). El análisis muestra que es posible que una porción de las partículas que sufren fragmentaciones secundarias (SEC1) pueda a su vez fragmentarse y dar origen a las sub-poblaciones TER1 y TER2, tal y como lo predice una extensión lógica de los resultados presentados en Brenes y Alvarado (2013). Se corrobora así la propuesta inicial hecha en Brenes (2013) y Brenes y Alvarado (2013) de que valores positivos de dispersión pueden también asociarse a fragmentaciones consecutivas, secundarias y hasta terciarias.

En palabras de Genareau et al. (2013): Analizado los tamaños de las vesículas que explotan durante la fragmentación es posible obtener información sobre el ascenso del magma y el proceso de vesiculación. Nosotros añadimos que la propuesta de fragmentaciones secundarias y terciarias, asociadas a dispersiones positivas, permite sistematizar y complementar esa información.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Dr. Guillermo Alvarado por la revisión de una versión preliminar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENJAMIN, E. R., PLANK, T., WADE, J. A., KELLEY, K. A., HAURI, E.H. & ALVARADO, G. E., 2007: High water

contents in basaltic magmas from Irazú Volcano, Costa Rica.- *J. Volcanol. Geother. Res.* 168 : 68-92.

BERLO, K., STIX, J., ROGGENSACK, K. & GHALEB, B, 2012: A tale of two magmas, Fuego, Guatemala.- *Bull. Volcanol.* 74: 377-390.

BRENES, J., 2013: Aplicación de la teoría de fragmentación/transporte secuencial a los depósitos de las erupciones 1723 y 1963-65 del Irazú, Costa Rica. Caso dispersión negativa.- *Rev. Geol. Amér. Central*, 48: 63-85.

BRENES, J., & ALVARADO, G. E., 2013: Aplicación de la teoría de fragmentación/transporte secuencial a los depósitos de las erupciones 1723 y 1963-65 del Irazú, Costa Rica. Caso dispersión positiva y modelo fractal.- *Rev. Geol. Amér. Central*, 48: 87-98.

BROWN, W. K., 1989: A theory of sequential fragmentation and its astronomical applications.- *J. Astrophys. Astr.* 10: 89- 112.

CAREY, S. N. & SIGURDSSON, H., 1982: Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens volcano.- *J. Geophys. Res.* 87(B8): 7061-7072.

DUFEK, J., & MANGA, M., 2008: In situ production of ash in pyroclastic flows.- *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 113(B9), DOI: 10.1029/2007JB005555

DUFEK, J., MANGA, M. & PATEL, A., 2012: Granular disruption during explosive volcanic eruptions.- *Nature Geosci.* 5: 561-564, DOI: 10.1038/ngeo1524

GENAREAU, K., MULUKUTLA, G. K., PROUSSEVITCH, A. A., DURANT, A. J., ROSE, W. I. & SAHAGIAN, D.L., 2013: The size range of bubbles that produce ash

- during explosive volcanic eruptions.- *J. App. Volcanol.* 2(4), DOI: 10.1186/2191-5040-2-4.
- GUO, S., ROSE, W. I., BLUTH, G. J. S., & WATSON, I. M., 2004- Particles in the great Pinatubo volcanic cloud of June 1991: The role of ice.- *Geochem. , Geophys., Geosys.* 5, Q05003, DOI:10.1029/2003GC000655
- HORWELL, C. & BAXTER, P., 2006: The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation.- *Bull. Volcan.* 69(1): 1-24.
- KAMINSKI, E. & JAUPART, C., 1997: Expansion and quenching of vesicular magma fragments in Plinian eruptions.- *J. Geophys. Res.* 102: 12,187- 12,203.
- KAMINSKI, E. & JAUPART, C., 1998: The size distribution of pyroclasts and the fragmentation sequence in explosive volcanic eruptions.- *J. Geophys. Res.* 103: 29.759-29.779.
- McGIMSEY, R. G., NEAL, C. A., RILEY, C. M., 2002: Areal distribution, thickness, mass, volume, and grain size of tephra-fall deposits from the eruptions of Crater Peak vent, Mt. Spurr Volcano, Alaska.- U.S. Geological Survey Open-File Report: 01-370.
- ROSE, W. I., ANDERSON, A. T., WOODRUFF, L. G., & BONIS, S. B., 1978: The October 1974 basaltic tephra from Fuego volcano: description and history of the magma body.- *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 4: 3-53.
- ROSE, W. I., MURROW, P. , BONADONNA, C., DURANT, A. J. & ERNST, G. G. J., 2008: Nature and significance of small volume fall deposits at composite volcanoes: Insights from the October 14, 1974 Fuego eruption, Guatemala.- *Bull Volcanol.* 70(9): 1043-1067.
- ROSE, W. I. & DURANT, A. J., 2009: Fine ash content of explosive eruptions.- *J. Volcanol. Geother. Res.* 186: 32-39.
- SOREM, R. K., 1982: Volcanic ash clusters; tephra rafts and scavengers.- *J. Volcanol. Geother. Res.* 13(1-2): 63-71.
- SPARKS, R. S. J., BURSIK, M. I., CAREY, S. N., GILBERT, J. S., GLAZE, L. S., SIGURDSSON, H. & WOODS, A. W., 1997: *Volcanic Plumes.*- 574 págs. Wiley, Chichester.
- STOIBER ,R. E. 1974: Eruption of Volcán Fuego- October 14, 1974.- *Bull. Volcanol.* 38: 861-869.
- WOHLETZ, K. H., 1983: Mechanisms of hydro-volcanic pyroclast formation: grain size, scanning electron micro-copy, and experimental results.- *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 17, 31-63.
- WOHLETZ, K. H., 1986: Explosive magma-water interactions: Thermodynamics, explosion mechanisms, and field studies.- *Bull. Volcanol.* 48: 245-264.
- WOHLETZ, K. H., SHERIDAN, M. F. & BROWN, K., 1989: Particle size distribution and the sequential fragmentation/transport theory applied to volcanic ash.- *J. Geophys. Res.* 94: 15,703-15,721.

