

4. Ocurrencia de eventos tornillo

En Galeras, después del emplazamiento de un domo de lava en 1991, ocurrieron siete erupciones desde julio 16 de 1992 hasta septiembre 23 de 1994, seis de las cuales fueron precedidas por tornillos (Tabla I). Inmediatamente después de cada uno de estas erupciones, los eventos tornillo desaparecieron durante varios días (Torres et al., 1996). Adicionalmente, hubo una correlación directa entre el número total de tornillos previos a una erupción y el volumen de material arrojados por la erupción (Torres et al., 1996).

Tabla I Periodos de registro de eventos tornillo observados en el volcán Galeras, Colombia.

Tiempo y/o frecuencia	Enjambre /Individual	Actividad Volcánica Específica	Sismo al Comienzo	Precursor de Erupción
9 eventos, Jul 11-16, 1992	Individual	Precursor en corto tiempo de la erupción de Julio 16	No	Si
20 eventos, Dic 23, 1992- Ene 14, 1993	Individual	precursor en corto tiempo de la erupción de Enero 14	No	Si
74 eventos, Feb 13- Mar 23, 1993	Individual	precursor en corto tiempo de la erupción de Marzo 23	No	Si
6 eventos, Abr 10-12, 1993	Individual	precursor en corto tiempo de la erupción de Abril 13	No	Si
103 eventos, Abr 18- Jun 7, 1993	Individual	precursor en corto tiempo de la erupción de Junio 7	No	Si
83 eventos, Jul 1- Noviembre 26, 1993	Individual	durante relativa quietud	No	Si
31 eventos, Ago 9- Sep 23, 1994	Individual	precursor en corto tiempo de la gran emisión de gas en Septiembre 23	No	Si
80 eventos, Oct 20, 1994 – Ene 5, 1995	Individual	precursor en corto tiempo de la gran emisión de gas en Enero 5	No	Si

La tabla II resume la ocurrencia y algunas características de eventos tornillos registrados en algunos volcanes Colombianos y Japoneses (Gómez y Torres, 1997).

Tabla II. Características relevantes de eventos tornillo registrados en algunos volcanes colombianos y japoneses. Modificada de Hamada et al. (1976).

Volcán	Número de eventos	Periodo de tiempo de tornillos observados	Frecuencia dominante (Hz)	Constante de Amortiguamiento	Referencias
Galeras	9	Jul 11-16, 1992	1.3-2.3	0.003-0.004	Gómez, 1994; Torres et al., 1996
	20	Dic 23, 1992 – Ene 14, 1993	0.9-3.0	0.002-0.014	
	74	Feb 13 – Mar 23, 1993	2.5-3.5	0.003-0.016	
	103	Abr 18 – Jun 7, 1993	1.5-3.8	0.002-0.010	
	83	Jul 1 - Nov 26, 1993	1.6-4.8	0.002-0.006	
	31	Ago 9 - Sep 23, 1994	2.4-3.2	0.002-0.005	
	80	Oct 20, 1994-Ene 5, 1995	2.2-8.0	0.002-0.006	
	Puracé	27	Jul 6 – Nov 11, 1994	4.6-8.0	
Tokachi-dake	35	Abr 3 – 19, 1989	3.3-5.0	0.004-0.011	Usu Volcano Obser., 1989; Nishimura y Okada, 1994
Meakan-dake	250	Feb 1990 – Jul 1994	3.5-7.5	0.004-0.019	
Taisetsu	7	Ago 1990 – Sep 1991	0.9-3.0	0.003-0.004	Después Hamada et al., 1976
Asamayama	49	Ene – Ago 1961	1.0-5.0	0.002-0.03	
Tarumaeyama	34	Feb 1970 – Feb 1971 y May – Jun 1975	0.7-3.3	0.005-0.03	
Kusatsu	31	Ene – Jun 1975	1.1-3.3	0.003-0.005	
Sakurajima	15	Dic 1967 – Feb 1970	2.5-5.0	0.007-0.02	Después Hamada et al., 1976
Kushinoerabujima	1	Jun 1975	4.3	0.02	

5. Consideraciones teóricas

Una primera consideración, con base en las apreciaciones anteriores, los tornillos parecen ser una combinación de una excitación impulsiva y una resonancia dentro del volcán, porque sus sismogramas tienen un principio abrupto seguido por una vibración larga, resonante que puede durar varios minutos. Así, la descripción más general de un tornillo, es mediante una función característica $x(t)$ de la forma:

$$x(t) = A(t) \text{sen}[\omega(t)t + \varphi(t)] \vec{n}(t) \quad (1) \text{ donde } \vec{n}(t) \text{ es la polarización, } A(t) \text{ la amplitud, } \omega(t) \text{ la frecuencia angular y } \varphi(t) \text{ la fase.}$$

Cada uno de éstos parámetros precisamente medibles contienen información importante sobre la fuente, su excitación y su comportamiento resonante. Por ejemplo, la polarización del campo de la onda sísmica generada por el proceso de una fuente estacionaria no móvil no cambiaría con el tiempo en alguna localización dada. Una investigación detallada de los espectros y variaciones de la fase en todo el tornillo puede dar información adicional sobre la fuente y el mecanismo de resonancia oscilatorio en la fase fluida de los volcanes. Con la transformada de Hilbert, la envolvente de la amplitud $A(t)$ de los tornillos puede verse más fácilmente (Fig. 5f). Al inicio, la amplitud asciende rápidamente hasta alcanzar un máximo. Los tornillos están caracterizados por un lento decaimiento exponencial. Por consiguiente, puede considerarse la función de amplitud del tornillo, $A(t)$ de la ecuación (1) compuesta de tres partes:

- Una función de excitación del oscilador con incremento de amplitud $e(t)$, de modo que $e(t)$ puede ser aproximado mediante la función $A_e(1 - e^{-\epsilon_e t})$ con $\epsilon_e \approx 1$. El tiempo de subida T_R de $e(t)$ es aproximadamente 10 s para la mayoría de tornillos de Galeras.
- Una función de respuesta del resonador con decaimiento exponencial de amplitudes $A_o e^{-\epsilon_o t} g(t - T_R)$ donde $g(t)$ es la función escalón con valor de la unidad.
- Una función aleatoria $b(t)$ describiendo los efectos de scattering y el ruido sísmico.

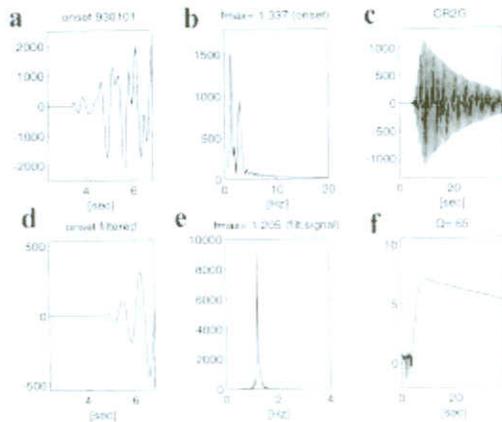


Fig.5a-f. Sismo tornillo del 1 de enero de 1993: a) ampliación del inicio de la señal, b) espectro del inicio de la señal mostrado en (a), c) despliegue de una parte de la señal con un filtro pasabandas alrededor de la frecuencia máxima, d) inicio filtrado con el pasabandas alrededor de la frecuencia máxima, e) espectro de verificación correspondiente a la señal filtrada mostrada en (c) y f) transformada de Hilbert aplicada a una parte de la señal donde está decauyendo para determinar la constante de amortiguamiento y por consiguiente el factor de calidad Q.

La tabla III describe los parámetros básicos que pueden inferirse de los tornillos en los dominios del tiempo y de la frecuencia.

Tabla III. Parámetros obtenidos de los sismos tornillos en los dominios del tiempo y la frecuencia.

El espectro de amplitud de los tornillos puede compararse con el espectro de función de respuesta de impulso de un resonador lineal cuya función de transferencia es:	$H(s) = \frac{1}{s^2 + 2\epsilon_o s + \omega_o^2} \quad (2)$
$\epsilon_o = h_o \omega_o$ es el factor de amortiguamiento determinado del decaimiento exponencial de la envolvente de los tornillos; h_o la constante de amortiguamiento y $\omega_o = 2\pi f_o$ la frecuencia angular. Aunque algunos tornillos parecen mostrar un cuasi-lineal decaimiento de la coda, estos eventos tienen una coda extraordinariamente larga con un lento decaimiento exponencial, $e^{-\epsilon t}$:	$\epsilon = \omega h = 2\pi f h = \frac{\pi f}{Q} \quad (3)$
h para ondas de coda puede determinarse con base en amplitudes de una parte decreciente de la envolvente, siendo independiente del tamaño del evento, de modo que A_o es la amplitud inicial en una parte de la onda de	$h = \frac{\ln A / A_o}{2\pi f (t - t_o)} \quad (4)$

coda en el tiempo t_0 , y A es la amplitud final en el tiempo t (Hamada et al., 1976):	
Por otro lado, en el dominio de la frecuencia a partir del factor de calidad (Bullen y Bolt, 1985) se tiene:	$h = \frac{1}{2Q_f} \quad (5)$
Q es el factor de calidad del resonador obtenido por la relación entre la frecuencia dominante pico y el ancho de banda frecuencial del pico dominante a la mitad de su nivel de energía (Leighton, 1994):	$Q_f = \frac{f_{max}}{(\Delta f / 2)} \quad (6)$
Para un resonador esférico lleno de fluido obtenido mediante el amortiguamiento del modo fundamental, el factor Q está definido por (Aki et al., 1977):	$Q = \frac{\pi}{\ln \frac{(Z+1)}{(Z-1)}} \quad (7)$

Como segunda consideración, las características espectrales de estas señales sugieren varios posibles modelos de fuente que consideran modos de oscilación de un sistema resonante asociados con cavidades abiertas, tuberías o grietas que son excitadas por un transiente de presión aplicado sobre un área de la pared (Aki et al., 1977; Chouet, 1981, 1985, 1988; el Ferrick et al., 1982). Resonadores de cavidad llenos de fluido pueden ofrecer un modelo para la fuente de los tornillos. Condiciones como el tamaño y geometría de la fuente, las propiedades físicas del fluido y del material sólido del entorno así como la historia de las presiones en el tiempo y en el espacio son variables importantes que deben contemplarse en el modelo.

Como tercera consideración, las formas de onda sinusoidales y los espectros de los tornillos son característicos de sismicidad generada hidráulicamente por efecto de martillo de agua o golpe de ariete (Lawrence y Qamar, 1979) y experimentos de hidrofractura (Bame y Fehler, 1986; el Ferrazzini et al., 1990). El hecho de que la frecuencia dominante se mantiene en todas las estaciones de registro, independiente de su distancia epicentral y acimut, fuertemente sugiere que este rasgo es debido a un efecto de fuente. La estabilidad de la frecuencia indica que los parámetros de la fuente permanecen constantes, mientras los cambios en frecuencia pueden reflejar variaciones de las dimensiones de la fuente, las propiedades físicas del fluido o el material sólido circundante.

Como cuarta consideración, los tornillos podrían ser causados por vibraciones libres de fluido en cavidades, en las cuales fluctuaciones en las condiciones de frontera físicas y químicas podrían explicar la alta estabilidad en la frecuencia pico más que la geometría. Como punto de partida para explicar algunas características de estas señales, se acoge el modelo resonador de Helmholtz (Howe, 1976) conformado por un conducto en la parte superior y una cavidad en la parte inferior (Fig. 6) en donde el movimiento puede ser inducido por variaciones en la presión sobre la parte alta del conducto también incrementará el volumen debajo del conducto (Tabla IV).

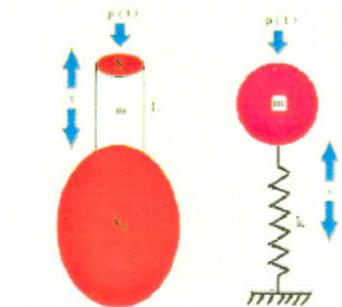


Fig.6. Representación esquemática del modelo de Helmholtz mostrando la geometría del resonador y su equivalencia con un péndulo vertical de resorte donde la masa del péndulo se corresponde con la parte superior del sistema o conducto y el resorte se relaciona con la cavidad de volumen V_0 donde está presente la fuerza restauradora.

6. Análisis e interpretación cuantitativa.

En la investigación de sismos tectónicos, el análisis de la polarización se usa para discriminar entre diferentes tipos de onda y para localizar la fuente (Kanasewich, 1981; Plesinger et al., 1986). Esta técnica no puede aplicarse a la investigación del campo de onda de los tornillos sin asunciones adicionales. Con sólo una estación no se puede determinar el tipo de onda y la dirección hacia la fuente independientemente; no obstante, el análisis de la polarización puede rendir información importante sobre el campo de onda y por ende sobre la anatomía de un tornillo. La Fig 7a,b muestra los sismogramas correspondientes a tres