

VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL FACTOR DE CALIDAD Q EN EL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA (ECUADOR)

Alexander García-Aristizábal¹
Álvaro P. Acevedo²
Mario Ruíz¹

- 1 Instituto Geofísico/
Departamento de
Geofísica. Escuela
Politécnica Nacional,
Quito.
2 Observatorio
Vulcanológico y
Sismológico de Manizales.
Ingeominas. Manizales,
Colombia.

Resumen

Se realizó un análisis del comportamiento del factor de calidad Q para el volcán Guagua Pichincha durante un período de tiempo comprendido entre octubre de 1998 y diciembre de 1999 (que abarca las fases freática y el inicio de la magmática presentada por el volcán para este período eruptivo). Se estudió su comportamiento en función de la frecuencia y su variación espacio-temporal. Se encontró que el valor de Q es dependiente de la frecuencia y varía en proporción directa a esta. Presenta una distribución espacial muy marcada. La zona que tiene menores valores de Q se encuentra localizada bajo la caldera del volcán a una profundidad de 3 a 5 km. Esta zona de bajos valores de Q (alta atenuación) afecta tanto las ondas P como las ondas S , por lo que es probable que esté asociada con zonas anómalas de densidad, temperatura y fracturamiento del medio. Debido a esto, y teniendo en cuenta su tamaño y la geología del volcán, se asoció con una "trampa" formada en el límite entre las rocas del basamento y el edificio volcánico, generando una especie de reservorio magmático que debe estar emplazado en las fracturas del mismo basamento.

También se observó una disminución temporal en el valor de Q (para todas las frecuencias de estudio) en las estaciones localizadas en la caldera del volcán, presentándose la principal reducción del valor entre los meses de enero y mayo de 1999, época en la que el volcán presentó intensa actividad tremórica. A partir de este período, el valor de Q se mantuvo relativamente estable hasta el final del período de estudio (diciembre de 1999). Aproximadamente cuatro meses después de esta reducción en el valor de Q , el volcán intensificó su actividad y comenzó un ciclo de extrusión-destrucción de domos.

Abstract

An analysis of the behavior of the Quality factor (Q) at Guagua Pichincha volcano (Ecuador) was made for the period October 1998 to December 1999 (including the phreatic and early magmatic phases displayed by the volcano). The behavior of Q was studied as a frequency function (between 2 and 12 Hz) as well as its distribution spatially and temporally. It is now understood that the Q value is frequency-dependent, and varies proportionally to it. The Q factor shows a very clear spatial distribution. The zone with the lowest Q value was found to be located beneath the volcano's caldera, between 3 to 5 km depth. This low Q -value zone (high attenuation zone) affects both the P and the S waves, thus it is very probable that it's associated with anomalous density and temperature zones, and a strongly fractured medium. Given the above and taking into consideration the size of the area of influence of the Q anomaly and the volcano's geology, strongly suggests that a "magma trap" was formed at the contact between the basement rock and the volcanic edifice, generating a kind of magmatic reservoir which should be situated in the basement cracks.

A temporal decrease in the Q value (for all frequencies) was observed in the stations located in the volcano's caldera; the main Q -value reduction occurred between January and May 1999, when there was strong volcanic tremor activity. Since that period, the Q -value remained relatively stable until the end of the study period (December 1999). Approximately four months after this reduction in the Q -value, the volcano has intensified its activity and began a dome extrusion-destruction cycle.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del trayecto que las ondas sísmicas recorren entre la fuente de un evento y una estación sísmica de registro, reúnen valiosa información sobre las condiciones físicas del medio que atraviesan y, dado que para nosotros es imposible ver directamente las estructuras complejas que forman la corteza, es necesario descifrar esa información que llevan consigo e interpretar las posibles causas que tuvieron que afectarla para, finalmente, tener una idea de la estructura misma del medio de propagación en un área determinada. Una de las formas de buscar tales efectos es estudiando los fenómenos de atenuación.

La atenuación se refiere a la pérdida de energía que sufre una onda por cada ciclo de oscilación, reflejando tal pérdida en una disminución progresiva en la amplitud de la señal en función del número de oscilaciones dadas. De esta observación podemos concluir dos cosas: primero, que la atenuación de la onda va a estar controlada por el número de ciclos que ésta tenga que dar en un tiempo determinado para recorrer una distancia, es decir, está controlada por la frecuencia. Segundo, que la distancia recorrida por la onda es función directa de la atenuación que ésta sufrirá. Tal pérdida de energía puede asumirse, a grandes rasgos, debida a los procesos de atenuación intrínseca, los fenómenos de "scattering" y a la expansión geométrica.

Uno de los medios utilizados para estudiar la forma como una onda se atenúa es calculando el llamado factor de calidad de transmisión de ondas sísmicas, conocido como factor Q , un factor intrínseco propio del medio que nos indica la forma como éste transmite las ondas. La atenuación que sufre la onda es, *grosso modo*, inversamente proporcional al valor de Q , por lo que altos valores de Q nos indican una baja atenuación, o si así se quiere decir, una "buena transmisión" de las ondas.

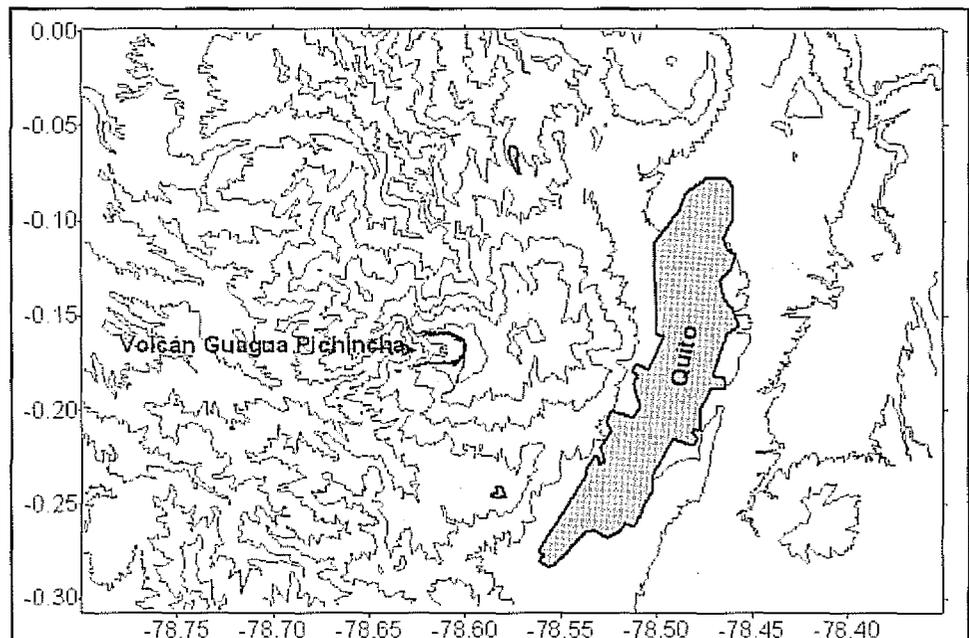
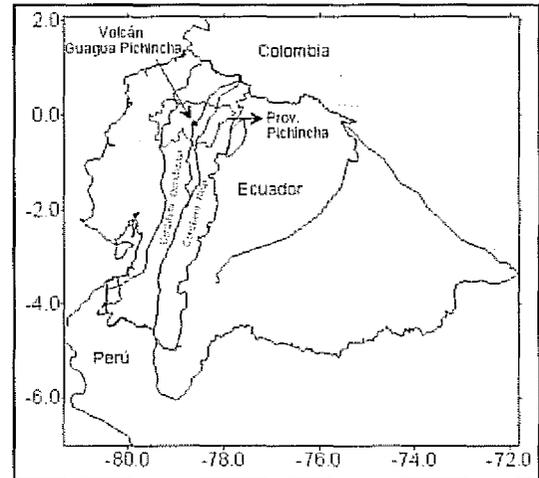
VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA

El volcán Guagua Pichincha forma parte de la cadena de volcanes cuaternarios de la cordillera Occidental del Ecuador, localizado a los $0^{\circ} 10'$ Latitud Sur, $78^{\circ} 36'$ Longitud Oeste y una altura de 4739 msnm. Corresponde al centro de emisión más joven del complejo volcá-

nico Pichincha y se ubica en la parte más occidental del mismo. A unos 10 km al Este de la caldera del Guagua Pichincha se encuentra la ciudad de San Francisco de Quito, capital de la República del Ecuador, con una población aproximada de 1 800 000 habitantes.

A partir de la información de la red sísmológica que el Instituto Geofísico (actualmente Departamento de Geofísica) mantiene desde 1981 para la vigilancia del volcán y utilizando eventos provenientes de un nido sísmico ubicado al NE del volcán, se desarrolló una metodología para calcular el valor de Q para diferentes frecuencias (entre 2 y 12 Hz) y se realizaron cálculos para el período de tiempo comprendido entre octubre de 1998 y diciembre de 1999, estudiando la distribución espacial y temporal del factor, su variación en función de la frecuencia y su correlación con otros aspectos geológicos y geofísicos observados en el volcán.

Figuras 1. Localización de la zona de estudio.



Actualmente, son numerosos los estudios que se realizan utilizando el factor Q, predominando las investigaciones en áreas tectónicas sobre aquellas realizadas en áreas volcánicas.

Algunos trabajos en volcanes como los de Sánchez *et al.* (1995), Londoño (1996) y Arias (1998) en el volcán Nevado del Ruiz (Colombia), Sudo (1991) en el Aso (Japón), Del Pezzo (1987) en el V. Etna (Italia), e incluso las conclusiones de este trabajo en el Guagua Pichincha, muestran la importancia que tiene este factor en dos campos: primero, para generar una imagen aceptable de la estructura interna del volcán, y segundo, tal vez lo más importante y útil en la vigilancia de volcanes, como un parámetro premonitorio de las erupciones volcánicas al presentar variaciones temporales muy claras antes, durante y posterior a la ocurrencia de un fenómeno eruptivo.

EL FACTOR DE CALIDAD Q. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Cuando ocurre un evento sísmico en un lugar determinado, diferentes tipos de ondas sísmicas comienzan a viajar a través del medio. Si asumimos la tierra como un medio ideal completamente elástico, una vez excitado éste las ondas existirían indefinidamente y su amplitud sería controlada solo por la expansión geométrica de las ondas, la reflexión y transmisión de energía en límites como discontinuidades. Sin embargo, la realidad es otra. La tierra no es un medio perfectamente elástico y las ondas sísmicas que se propagan a través de ella sufren un proceso de atenuación debido a varios mecanismos de pérdida de energía como por ejemplo, la sucesiva conversión de energía potencial en energía cinética no es un proceso perfectamente reversible, la fricción y dislocaciones entre los límites de los granos del medio, calentamiento en tales límites, etc. Muchos autores agrupan todos estos factores dentro de un término común que les abarca denominado "atenuación intrínseca" y normalmente se realizan descripciones fenomenológicas del proceso ya que una descripción microscópica sería muy compleja (Aki & Richards, 1980; Lay & Wallace, 1995).

Una onda es un fenómeno que ocurre tanto en el tiempo como en el espacio. Para nosotros es difícil visualizarlas a la vez espacial y temporalmente, por lo que recurrimos a fijar o "congelar" una de estas variables. Si se fija el tiempo, se tiene una vista instantánea del movimiento de las partículas respecto a su posición de reposo. Por el contrario, si se fija el espacio, se observa la forma como se mueve un punto (en este caso, el sensor) en el transcurso del tiempo. Así mismo, para encontrar el valor de Q, que es un parámetro en cierto modo "abstracto", puede utilizarse dos vías diferentes que llegan al mismo punto si se tiene en cuenta el fenómeno físico

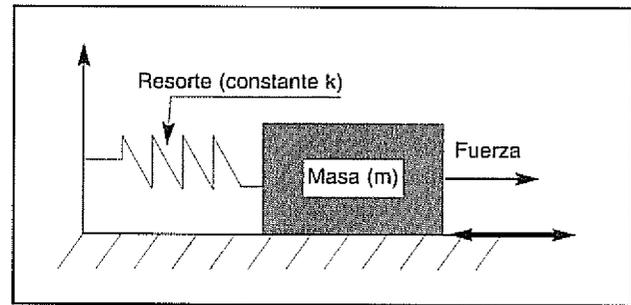


Figura 2. El resorte representa los procesos elásticos en la tierra, mientras que la fuerza de fricción representa la oposición al movimiento de la masa.

propriadamente dicho en cuestión: puede estudiarse la caída temporal de las ondas en las codas de los sismos (Q-temporal) (en este caso, la dimensión espacial ha sido fijada y predominarían los fenómenos de scattering), o por otro lado, puede estudiarse la distribución de las ondas y su respectiva atenuación para un instante de tiempo dado (Q-espacial). Este estudio se ha enfocado hacia el análisis espacial de las ondas.

La descripción más sencilla del proceso de atenuación puede hacerse basándose en el análisis de una masa (m) oscilando suspendida de un resorte (k), sobre una superficie determinada, como se aprecia en la figura 2.

Determinando la ecuación de movimiento de este sistema, tenemos:

$$m \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + \gamma \frac{\delta x}{\delta t} + kx = 0$$

Donde:

m: Masa

x: Desplazamiento de la masa

k: Constante del resorte

g: Coeficiente de fricción

t: Tiempo

Como puede verse en esta ecuación, la relación corresponde a un sistema de segundo orden, cuya expresión general de movimiento en el tiempo es de la forma:

$$\frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + \varepsilon \omega_0 \frac{\delta x}{\delta t} + \omega_0^2 x = 0$$

La solución general a esta ecuación es de la forma

$$x(t) = A_0 e^{-\varepsilon \omega_0 t} \sin(\omega_0 t \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2})$$

Donde:

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{m \omega_0} \quad \omega_0 = \frac{k}{m}$$

ε , γ Se denominan Coeficientes de fricción.

Al observar esta relación de decaimiento armónico, se puede concluir que si $\epsilon=0$, tendremos un caso de no atenuación. Si se lleva este modelo a nuestro caso, podemos inferir que ϵ nos refleja la atenuación de las ondas con el tiempo y por lo tanto es inversamente proporcional al factor de calidad Q . Según Lay & Wallace (1995), el valor de $\epsilon=1/2Q$. Reemplazando esta expresión y tomando solo la envolvente ($A(t)$) de la misma, tenemos que:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{w_0 t}{2Q}} \quad \text{ó} \quad A(x) = A_0 e^{-\frac{\pi f}{Qv} x}$$

Donde,

- A_0 = Amplitud en el origen a la frecuencia f
- t = Tiempo de viaje de la onda hasta el lugar de registro (sensor)
- w_0 = Frecuencia angular ($w_0 = 2\pi f$)
- f = Frecuencia en Hertz
- x = Distancia recorrida por la onda desde la fuente hasta el sensor
- v = Velocidad de las ondas en un medio dado.
- Q = Factor de calidad.

Q corresponde a la fracción de energía perdida por la onda en un ciclo de oscilación. En otras palabras,

$$Q = -\frac{2\pi E}{\Delta E}$$

Por esta razón, valores altos de Q nos reflejan pérdidas pequeñas de energía, lo que podemos traducir como una baja atenuación de las ondas en el medio. Por otro lado, a medida que Q se acerca a cero (0), nos refleja una pérdida importante de energía, es decir, alta atenuación. En términos generales, se puede asumir que Q es proporcional al inverso de la atenuación. Una explicación más detallada de la metodología utilizada se encuentra en García (2001).

RESULTADOS

Valores de Q hallados

Los cálculos realizados muestran que el valor hallado de Q varía en función de la frecuencia y presenta variaciones tanto espaciales como temporales.

Las siguientes tablas (1-6) resumen los valores de Q calculados para diferentes períodos de tiempo en los que se observaron diferencias (ver variación temporal de Q) y a cada frecuencia de estudio. El valor dado corresponde al promedio de los valores encontrados para cada sismo dentro de cada período de tiempo, tanto para ondas P como para ondas S.

Variaciones del factor de calidad Q , en función de la frecuencia

El valor de Q varía en función de la frecuencia. Para los cálculos realizados en el volcán Guagua Pichincha se observó que el valor de Q aumenta de una forma directa con ésta. Para los valores encontrados en el Guagua Pichincha, el valor de Q se incrementó de forma aproximadamente constante para frecuencias menores a 6 Hz, sin embargo, para frecuencias entre 6 y 12 Hz el valor de Q se incrementa con una pendiente mayor que para las frecuencias inmediatamente inferiores, como puede apreciarse en la figura 3. Esta variación se observó tanto para ondas P como para ondas S y en todas las estaciones sísmicas en las que se realizó el cálculo. La figura 3 (a y b) corresponde a los valores de Q para ondas P y S (respectivamente) durante el período junio-diciembre de 1999.

Haciendo una regresión a estos datos es posible obtener una expresión que relacione los valores del factor Q en función de la frecuencia, lo que se denomina "Ley de Q ".

VALORES DE Q PARA ONDAS P

Tabla 1. Período octubre-diciembre de 1998

Est \ freq	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	10 Hz	12 Hz
Yana	3.10	5.30	5.09	8.14	7.74	12.83	22.01	29.50
Pino	2.89	4.87	4.57	5.53	6.80	8.10	18.65	25.89
Cggp	6.32	5.49	5.47	6.71	13.04	9.75	22.95	27.37
Ggp	5.11	5.71	6.27	8.34	9.70	10.46	23.26	24.70
Toaz	4.18	5.35	6.20	8.00	9.92	11.20	18.87	27.53
Jua2	5.28	5.76	6.20	7.14	11.84	11.45	42.25	46.66

Tabla 2. Período Enero - Mayo De 1999

Est \ freq	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	10 Hz	12 Hz
Yana	2.46	4.48	4.92	4.07	5.63	5.65	9.86	18.24
Pino	2.24	3.44	2.33	3.09	4.28	4.95	5.72	12.30
Cggp	3.06	3.32	2.89	3.20	6.39	5.83	9.97	11.60
Ggp	2.68	4.62	3.71	3.09	4.85	5.88	12.22	14.33
Toaz	3.15	2.71	2.90	3.43	4.96	6.24	7.85	9.15
Jua2	3.51	4.53	2.48	3.42	6.73	7.63	10.92	15.98
Xtal	3.51	3.15	3.94	2.56	5.19	6.12	7.47	8.77

Tabla 3. Período Junio - Diciembre De 1999

Est \ freq	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	10 Hz	12 Hz
Yana	2.95	3.59	4.59	4.51	5.19	5.45	9.88	15.95
Pino	1.87	2.99	2.54	2.99	3.61	3.87	5.16	10.18
Cggp	2.48	2.50	3.15	3.33	4.18	4.42	6.62	8.61
Ggp	2.48	2.75	3.55	3.64	4.75	4.40	8.15	10.94
Toaz	2.41	2.45	2.68	3.25	4.03	4.62	5.82	8.97
Jua2	3.13	3.84	3.77	3.52	5.94	6.42	8.14	11.44
Xtal	2.91	3.70	6.18	3.41	5.18	5.94	7.75	5.21

VALORES DE Q PARA ONDAS S

Tabla 4. Período Octubre - Diciembre De 1998

Est \ freq	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	10 Hz	12 Hz
Yana	5.49	7.19	7.41	8.73	13.15	14.28	15.89	30.00
Cggp	6.60	8.48	8.29	11.24	15.36	16.66	21.45	60.00
Ggp	6.37	7.95	7.36	11.69	16.03	16.13	22.73	127.25
Pino	6.38	8.72	8.73	9.40	12.03	13.54	14.89	111.22
Toaz	7.06	11.34	11.88	12.52	15.15	15.50	20.30	100.00
Jua2	6.51	11.19	15.18	7.66	13.51	21.15	21.19	50.00

Tabla 5. Período Enero - Mayo De 1999

Est \ freq	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	10 Hz	12 Hz
Yana	3.27	6.08	7.27	7.13	12.83	12.26	14.80	29.66
Cggp	3.43	8.33	9.10	8.27	8.47	11.03	13.14	15.57
Ggp	3.01	6.51	8.20	6.97	11.61	14.85	16.18	23.78
Pino	2.68	5.38	6.64	5.90	5.25	7.93	9.88	13.95
Toaz	3.07	5.66	6.94	5.82	9.44	4.99	12.84	18.54
Jua2	3.45	7.90	7.57	7.17	8.11	12.13	15.49	19.38
Xtal	2.95	4.56	7.76	9.38	18.21	20.77	23.55	ND

ND: No Determinado.

Tabla 6. Período Junio - Diciembre De 1999

Est \ freq	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	10 Hz	12 Hz
Yana	3.66	5.93	7.10	7.40	11.27	11.65	14.65	32.60
Cggp	3.10	6.93	6.77	5.94	6.92	7.34	8.17	13.17
Ggp	2.34	5.00	6.41	5.56	7.81	12.00	10.24	15.18
Pino	2.18	4.34	5.45	5.19	5.69	6.94	9.03	12.20
Toaz	2.74	5.89	5.40	5.48	8.32	6.59	9.00	15.68
Jua2	3.25	6.39	6.17	7.01	8.16	9.21	9.94	17.83
Xtal	2.74	5.48	11.23	8.03	11.82	16.65	16.34	21.09

Ley de Q para ondas P:

$$Q^p(f) = 1.23 f^{0.96}$$

Desviación Estándar:

$$Q_0 = 0.28$$

$$D_s = 0.21$$

Ley de Q para ondas S:

$$Q^s(f) = 0.711 f^{0.92}$$

$$Q_0 = 0.28$$

$$D_s = 0.21$$

Variación temporal del factor de calidad Q

Durante el período de tiempo en el que se realizó el cálculo de Q (octubre/98 - diciembre/99) se observaron variaciones en el valor del factor de calidad encontrado a partir de las estaciones localizadas en el edificio volcánico del Guagua Pichincha. Las estaciones más lejanas como Yana y Qur presentaron la menor variación durante todo el período de tiempo, sin embargo, estaciones como Pino, Cggp, Ggp y Toaza localizadas rodeando la caldera y Jua2 localizada en el flanco sur del volcán, mostraron un decremento importante en el valor de Q desde los meses de febrero a mayo de 1999. La figura 4 muestra como ejemplo la variación de Q para ondas P en la estación Ggp durante la totalidad del período de tiempo del estudio, donde puede diferenciarse por lo menos tres períodos de tiempo que presentan cambios importantes en el comportamiento del factor. Por lo tanto, se definieron tres gran-

des períodos de tiempo que agrupan cambios similares en el valor del factor de calidad. El primer período comprende entre octubre y diciembre de 1998, el segundo período va entre enero y mayo de 1999 y el tercer período entre junio y diciembre de 1999.

El cambio más significativo de Q se apreció entre el primero y segundo período, donde la pendiente decreciente es más fuerte, como se aprecia en la figura 5 (a y b).

Este comportamiento se observó para todos los rangos de frecuencia estudiados, sin embargo es más marcado en las altas frecuencias. La figura 5 (a y b) es un ejemplo de la variación temporal de Q a 6 Hz tanto para ondas P como para S. En estas gráficas puede verse claramente la estabilidad o poca variación de Q en una estación lejana como Yana, mientras que las demás estaciones, localizadas en el volcán, sufren cambios importantes.

VARIACIONES ESPACIALES DEL FACTOR Q

Proyección en superficie de las anomalías

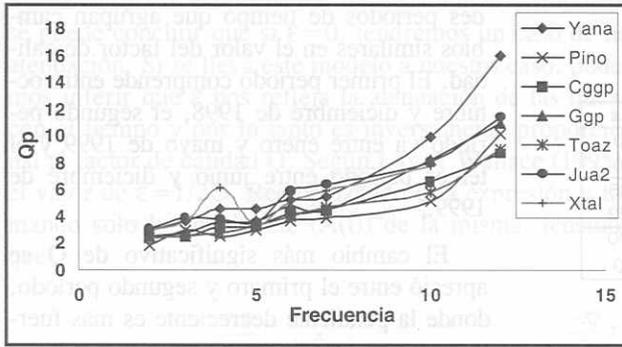
Utilizando las estaciones en las cuales se calculó el valor de Q se construyó una especie de "malla" con los valores del factor de calidad y se realizaron interpolaciones utilizando el método Kriging (la descripción del método Kriging puede ser revisada en Clark, 1979).

Es importante aclarar que estos mapas están mostrando la distribución de valores de Q que posee el medio atravesado por las ondas sísmicas en su recorrido desde la fuente hasta el lugar de registro, por lo que deben ser interpretados como la imagen o la "proyección" en superficie del efecto total que sobre la onda tiene el medio de propagación.

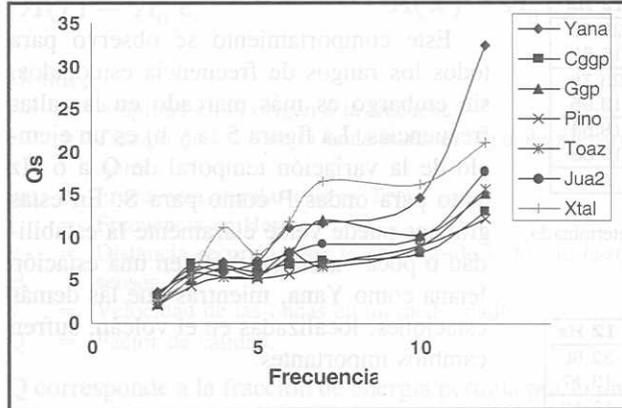
Se construyeron mapas de la distribución de Q para cada frecuencia de estudio (2, 3, 4, 5, 6, 7, 10 y 12 Hz), tanto de ondas P como de ondas S. Los mapas construidos a partir de los datos de menor frecuencia ($f < 4$ Hz) muestran una leve anomalía de Q en el sector norte de la caldera del volcán, sin embargo, la distribución del factor tiende a ser un poco más uniforme respecto a las altas frecuencias. La figura 6 (a) muestra los valores de Q (sin realizar la interpolación) para 2 Hz a partir de ondas P y en la figura 6 (b) se aprecia el resultado de la interpolación para el mismo grupo de datos.

Por otro lado, si se observan los mapas generados a partir de los datos de mayores frecuencias (> 5 Hz), se observa un mayor contraste de Q delimitando un área

3. a

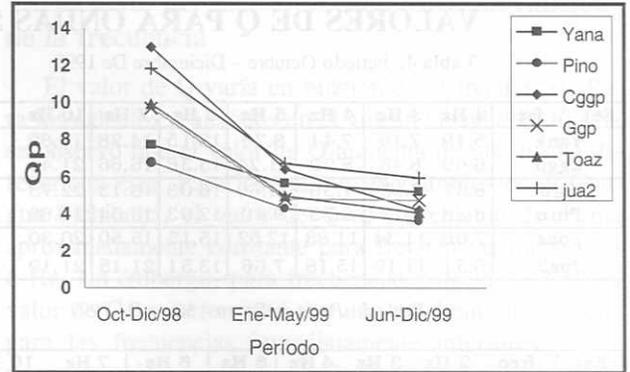


3. b

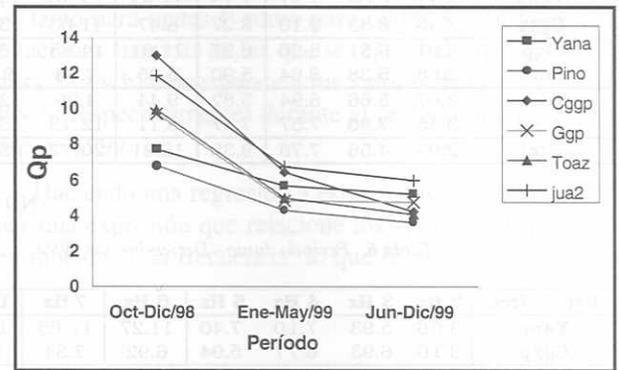


Figuras 3. Variación de Q en función de la frecuencia para el período comprendido entre junio y diciembre de 1999 (3-a) para ondas P y (3-b) para ondas S).

5. a



5. b



Figuras 5. Variación temporal de Q (f = 6 Hz) entre octubre de 1998 y diciembre de 1999 para ondas P (5-a) y para ondas S (5-b).

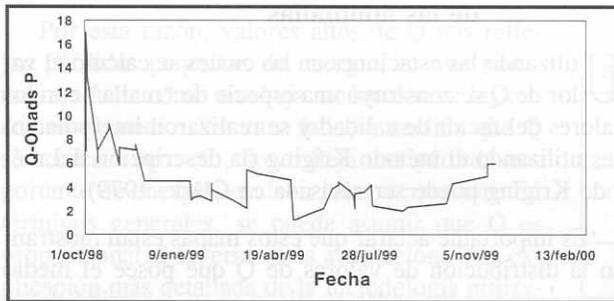


Figura 4. Variación temporal del factor Q en la estación Ggp (Refugio) Durante el período de estudio (octubre 1998-diciembre 1999) (f = 5 Hz).

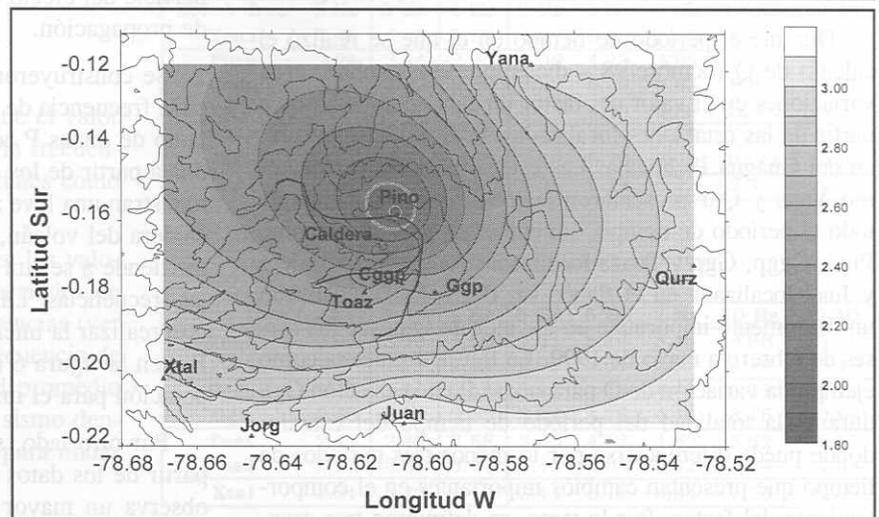
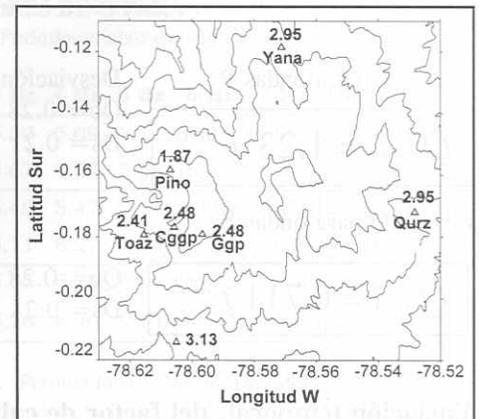


Figura 6. Distribución de Q para una frecuencia de 2 Hz (junio-diciembre de 1999). El área más oscura representa las zonas anómalas de bajo Q (es decir, alta atenuación)

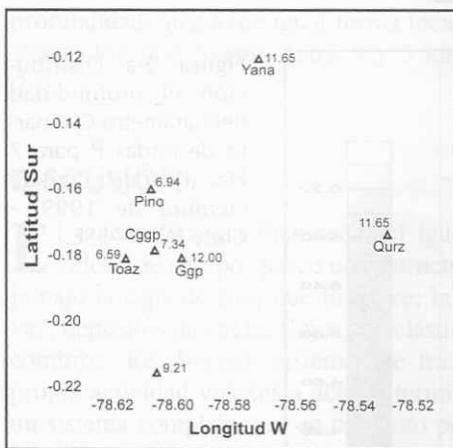
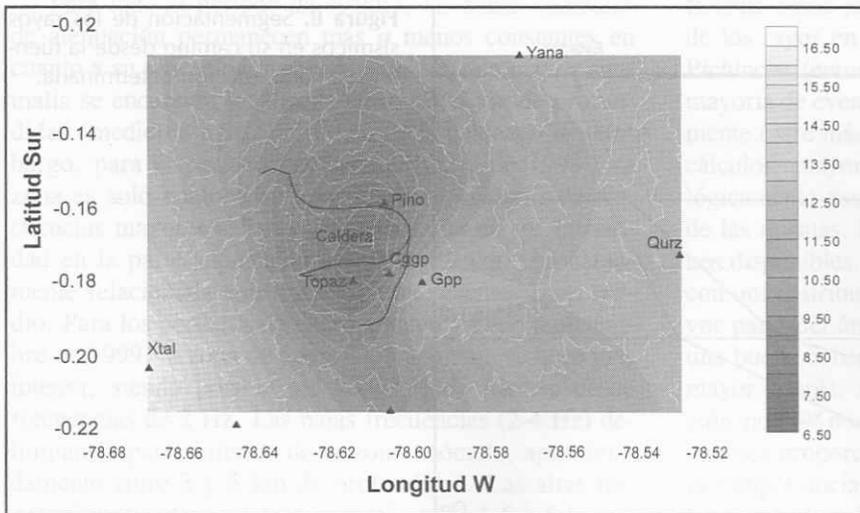


Figura 7. Distribución de Q para frecuencias de 7 Hz calculado a partir de ondas S (junio-diciembre de 1999).

mejor definida. La figura 7 (a) y (b) muestra los mapas para 7 Hz ploteados a partir de ondas S para el mismo período (junio a diciembre de 1999).

Como se aprecia en las figuras, la zona de mayor atenuación se encuentra en el área de la caldera del volcán, presentándose los menores valores de Q en el flanco Norte de la misma, aproximadamente bajo la estación Pino. Los mapas de los períodos enero-mayo/99 y junio-diciembre/99 presentan mayor contraste de Q que los ploteados para los datos de octubre-diciembre/98, relacionado con el decremento temporal de Q. Es importante anotar que no se cuenta con una estación que controle la distribución de Q en el flanco más occidental de la caldera, justo donde varios domos han sido extruidos durante 1999. Por lo tanto, la zona anómala mostrada podría tener un contorno diferente si fuera posible controlar tal sector.

La distribución de valores de Q a partir de altas frecuencias muestra mejor resolución de las estructuras que los datos a partir de bajas frecuencias, sin embargo, dependiendo de las dimensiones de las estructuras presentes en un volcán, hay ciertas frecuencias que pueden estar mostrando de una forma más clara una estructura determinada. Por ejemplo, los trabajos de Londoño (1996) y Arias (1998) en el volcán Nevado del Ruiz (Colombia) de-

terminaron que la frecuencia que mejor describe las estructuras bajo ese volcán son del orden de los 12 Hz. Para el volcán Guagua Pichincha se observó que las frecuencias que mejor describen la zona de anomalía de Q están entre 6 y 7 Hz, tanto para ondas P como para ondas S. Es interesante que justo a estas frecuencias hay un cambio importante en la curva de Q en función de la frecuencia, como se aprecia en las figuras 3.

DISTRIBUCIÓN DEL FACTOR DE CALIDAD Q EN PROFUNDIDAD

Los mapas de valores de Q hasta ahora presentados corresponden al valor total de Q que afecta las ondas desde la fuente hasta el sitio de muestreo (estación sísmica). Un problema importante surge cuando se quiere conocer la distribución de este factor a lo largo del rayo, que atraviesa diferentes medios. Tomando los rayos de los sismos (a cada estación) a partir de los cuales se realizó el cálculo, se puede realizar una inversión del valor de Q hallado. La idea es segmentar el rayo en un número determinado de partes para calcular el valor de Q en cada segmento. Por facilidad en el procesamiento, se decidió segmentar los rayos en un número igual al número de capas del modelo de velocidades utilizado, como puede apreciarse en la figura 8, donde se muestra un esquema de la descomposición de los rayos de dos eventos cercanos en su camino a una misma estación.

Tomando los datos de distancia recorrida en cada segmento, velocidad de la onda en el mismo, frecuencia, amplitud, etc. es posible generar matrices de la forma

$$\begin{pmatrix} x_{(1,1)} & x_{(1,2)} & x_{(1,3)} & \dots & x_{(1,m)} \\ v_1 & v_2 & v_3 & \dots & v_n \\ x_{(2,1)} & x_{(2,2)} & x_{(2,3)} & \dots & x_{(2,m)} \\ v_1 & v_2 & v_3 & \dots & v_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(m,1)} & x_{(m,2)} & x_{(m,3)} & \dots & x_{(m,m)} \\ v_1 & v_2 & v_3 & \dots & v_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ Q_1 \\ 1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ 1 \\ Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Lr(A_{(x_{11})}) - Lr(A_0) \\ -\pi f \\ Lr(A_{(x_{22})}) - Lr(A_0) \\ -\pi f \\ \vdots \\ Lr(A_{(x_{mm})}) - Lr(A_0) \\ -\pi f \end{pmatrix}$$

Al solucionar estos sistemas de ecuaciones se obtuvieron valores de 1/Q para diferentes profundidades y en una localización espacial determinada. Ubicando estos puntos en cortes topográficos en sentido WNW-ESE Y NNE-SSW se interpolaron los datos (igualmente utilizando el método Kriging) y se construyeron cortes con la información resultante. Este proceso fue realizado tanto para ondas P como para ondas S e igual para cada frecuencia de estudio.