



SGP
FUNDADA 1924

Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

Journal homepage: www.sgp.org.pe

ISSN 0079-1091

Determinación y análisis del factor de calidad de las ondas coda (Q_c) en el borde suroccidental del Perú

Lizbeth Velarde, Hernando Tavera

Subdirección Ciencias de la Tierra Sólida, Instituto Geofísico del Perú (IGP), Calle Calatrava 216, La Molina, Lima, Perú
(lvelarde@igp.gob.pe, hernando.tavera@igp.gob.pe)

RESUMEN

Se determina el factor de calidad de las ondas coda (Q_c) para el borde suroccidental del Perú a partir del modelo propuesto por Aki y Chouet (1975). Se analiza las ondas coda de 64 sismos locales registrados por estaciones de la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú. El análisis se realizó a frecuencias centrales de 1.5 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz y 7 Hz. Los resultados muestran que existe una alta dependencia frecuencial $Q_c = 238.2f^{(0.68)}$, asociada a la alta actividad sísmica presente en la región Sur del Perú, la presencia del arco volcánico y la Cordillera

Andina, estos últimos se comportan como unidades que atenúan a las ondas sísmicas.

Los perfiles de isovalores de Q_c para 4 Hz, indican que la atenuación es mayor entre la fosa y el arco volcánico, sugiriendo estar asociada a la acumulación de magma y a las altas temperaturas que absorben la energía de las ondas sísmicas. El parámetro Q_0 , con dependencia de Q_c con la frecuencia, presenta valores bajos entre 150 y 450, y estarían relacionados con la constante evolución de la Cordillera Andina como parte del proceso de convergencia entre las placas.

Palabras claves: Ondas coda, atenuación, convergencia.

1. Introducción

Analizar el comportamiento de las ondas sísmicas en el medio en el cual se propagan, permite identificar las pérdidas de energía por efecto de la atenuación a lo largo de su trayectoria, desde su epicentro hasta la estación de registro. Esta atenuación está relacionada con los parámetros tectónicos y geodinámicos de una región, y corresponde a una disminución en la amplitud de las ondas sísmicas.

Una forma de determinar la atenuación es mediante el factor de calidad Q de las ondas sísmicas, ya que ambas varían de forma inversa. Aki (1969) indica que el factor Q puede ser determinado mediante el análisis de las ondas coda, las cuales corresponden a la parte final del registro del sismo y que contiene información resultante del choque de las ondas sísmicas con las heterogeneidades del medio por el cual se propagan. Así mismo, se puede determinar si la atenuación varía o no en función de la frecuencia, mediante el análisis de Q_0 que es, la

dependencia frecuencial de Q_c (factor de calidad de las ondas coda).

En este estudio, se analiza las variaciones del factor Q_c en el borde suroccidental del Perú, mediante el análisis de ondas coda de sismos locales y para ello se considera el modelo de dispersión simple propuesto por Aki y Chouet (1975). Los resultados a obtener contribuirán al conocimiento de las estructuras tectónicas que favorecen a la atenuación de las ondas sísmicas.

2. Geodinámica y sismicidad

La subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, es el principal proceso tectónico que define la geodinámica de Perú, el mismo que produjo el arrugamiento y levantamiento del margen continental durante el periodo orogénico hasta formar una superficie topográfica muy accidentada conocida como "La Cordillera de los Andes".

Esta cordillera fuertemente deformada, comprende un conjunto de diversas estructuras, tales como montañas, volcanes, anticlinales, sinclinales, mesetas y otras que se encuentran emplazados entre la línea de fosa peruano-chilena y el llano Amazónico. Estas estructuras conforman los principales rasgos tectónicos del Perú. En la zona sur del Perú, están presentes la Fosa Perú- Chile, la Dorsal de Nazca, la Cordillera Andina, el Arco Volcánico y diferentes sistemas de fallas distribuidas en el continente (Figura 1).

La fosa Perú- Chile delimita la interacción entre la placa de Nazca y la Sudamericana, y presenta una contorsión

NNO-SSE en la región Norte y Centro, y NO-SE en la región Sur del Perú. El cambio en la orientación de la fosa se produce frente a la dorsal de Nazca.

La Dorsal de Nazca es una cordillera que se localiza en el extremo NO de la región Sur del Perú, frente al departamento de Ica. La parte más alta de esta dorsal (cota de 2000 metros), se encuentra a 50 km de distancia aproximadamente de la línea de costa; mientras que, las cotas menores ya subducieron bajo la placa continental (Sébrier et al., 1985).

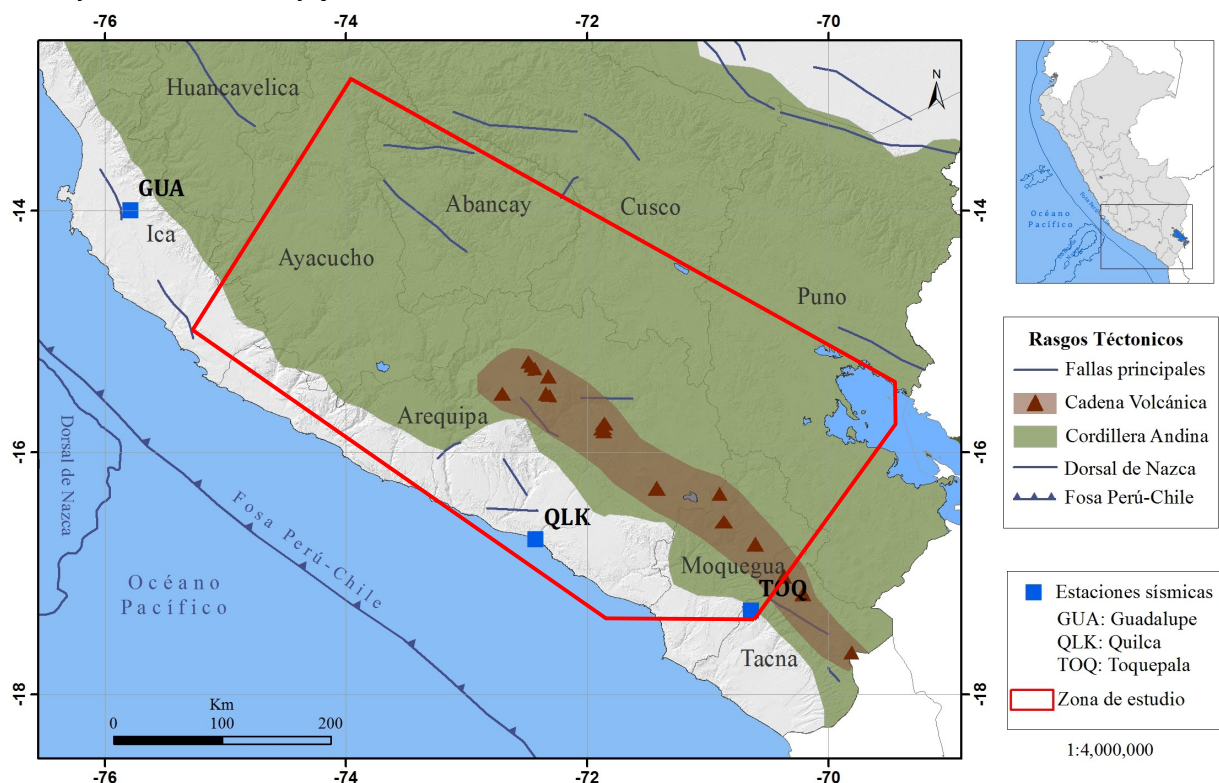


Figura 1. Principales rasgos tectónicos en el Sur del Perú (Sébrier et al., 1985).

La Cordillera Andina, tiene una larga historia de deformación y actividad volcánica, siendo el proceso de subducción responsable de la presencia de un arco magmático más amplio durante el Mioceno temprano (Allmendinger et al., 1997). Transversalmente, presenta diversas unidades morfoestructurales y anchos que oscilan entre 250 km en la región Norte y Centro del Perú, hasta 500 km en la frontera entre Perú, Chile y Bolivia (Marocco, 1980; Tavera y Buforn, 1998).

Principales sistemas de falla, están distribuidas sobre todo el territorio peruano. En la Alta Cordillera y en el Altiplano, el número de sistemas de fallas es menor y se encuentran ubicados principalmente al pie de algunos nevados importantes como la Cordillera Blanca en Ancash y el Huaytapallana en Junín.

En la zona Sur del Perú, los principales sistemas de fallas son:

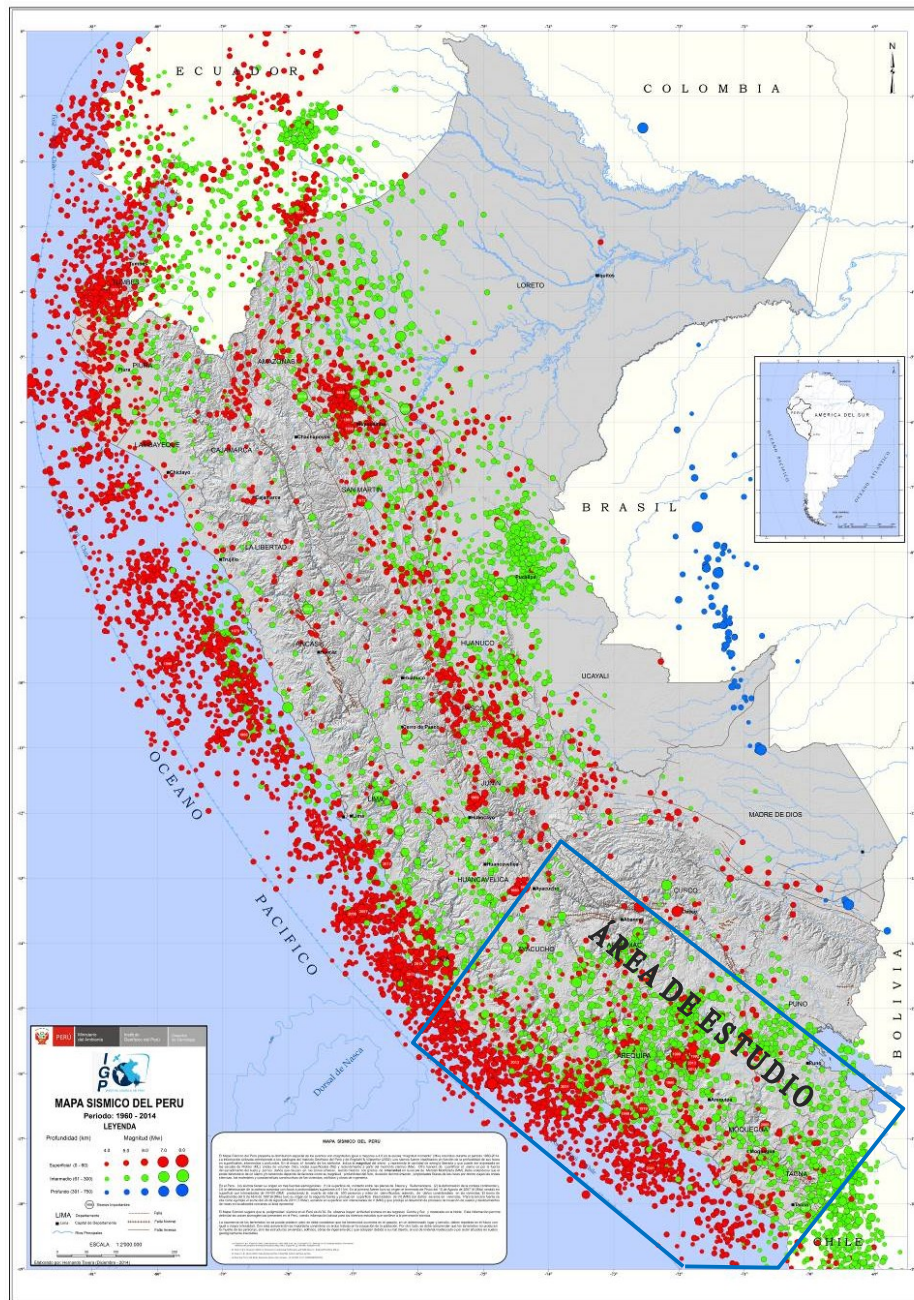
-En la zona costanera, el sistema de fallas Marcona y La Planchada, ubicadas en el extremo Sur del departamento de Ica.

-En la Cordillera Occidental, se encuentra la falla Pampacolca, Ichupampa y el sistema de fallas de Ayacucho.

-En el Altiplano y en la Cordillera Oriental, se encuentra el sistema de fallas del Cusco, y el sistema Huambo - Cabanaconde, en la provincia de Caylloma (Arequipa).

La cadena Volcánica, se distribuye en el Sur sobre la Cordillera Occidental siguiendo un aparente alineamiento de NO-SE. Su formación es consecuencia de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, que arrastra consigo sedimentos de la superficie oceánica y donde la alta temperatura, la presencia de agua y dióxido de carbono, generan magma, que por su baja densidad asciende hacia la superficie.

Figura 2. Distribución espacial de los sismos ocurridos en el Perú entre 1960 – 2014, $M_w > 4.0$ (Catálogo IGP). Sismos superficiales ($h < 60$ km), círculos de color rojo; sismos intermedios ($60 < h < 300$ km) círculos de color verde y sismos profundos ($h > 300$ km) círculos de color azul; el tamaño de círculos varía de acuerdo a la magnitud del sismo, donde los círculos más pequeños representan a los sismos de menor magnitud y los círculos más grandes, a los sismos de mayor magnitud. En cuadro azul se indica la zona de estudio.



El proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana es el principal responsable del alto índice de sismicidad observada en el borde Occidental del territorio peruano, lugar en el cual se generan, con relativa frecuencia terremotos de magnitud elevada (Barazangi y Isacks, 1979; Tavera y Buforn, 1998). El proceso de subducción genera hasta tres tipos principales de sismos (Figura 2), el primero asociado directamente al contacto de placas con la generación de sismos de elevada magnitud con relativa frecuencia, el segundo, asociado a la

deformación cortical en el interior del continente con sismos de menor magnitud y frecuencia, y el tercero, debido a deformación interna de la placa de Nazca por debajo del continente.

De acuerdo a su profundidad, los sismos pueden clasificarse en:

Sismos con focos superficiales: son sismos que ocurren a profundidades menores a 60 km, y se distribuyen

formando dos grupos: los que se encuentran entre la Fosa Perú – Chile y la línea de costa, y asociadas a los procesos de formación de placas y los que se distribuyen en superficie paralelos a la Cordillera Andina y con origen en la deformación superficial asociado a los procesos de formación de placas y en el interior del continente.

Sismos con focos intermedios: ocurren a profundidades entre 61 a 300 km, y sus epicentros se distribuyen

3. Ondas coda y el factor de calidad

3.1. Ondas coda

La palabra coda proviene del latín "cauda" que en español significa "cola". Chouet (1979) definió como "coda" a la señal que se registra después de la llegada de las ondas de mayor amplitud (P, S y superficiales) (Figura 3). Las ondas coda, al igual que otras ondas sísmicas en su paso por el interior de la tierra experimentan la atenuación de su amplitud, debido a dos factores fundamentales, las condiciones inelásticas del medio (atenuación anelástica) y a la dispersión de las ondas en las heterogeneidades con las que tropiezan (atenuación dispersiva). Una forma de determinar la atenuación de las ondas coda es mediante el análisis del factor de calidad que se entiende como el parámetro inverso de la atenuación, y que resulta del efecto combinado de la atenuación anelástica y la atenuación dispersiva, es denotado como Q_c .

La atenuación anelástica, denominada también como absorción anelástica o intrínseca, se refiere a la transformación de energía debido a las propiedades anelásticas del medio. Estimaciones de la misma en diferentes partes de la tierra ha puesto de manifiesto que varían dependiendo de la zona estudiada. En regiones volcánicas, la más importante fuente de pérdida es la presencia de material parcialmente fundido, o la presencia de fluidos como agua o gas (Martínez, 2005).

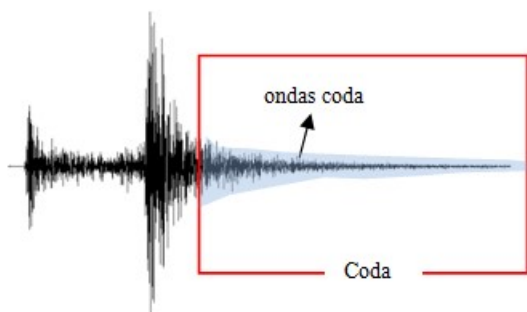


Figura 3. Ejemplo de sismograma de un evento registrado el 29/06/13 en la estación de Quilca. El recuadro indica el tren de ondas coda.

Por otra parte, la atenuación dispersiva es consecuencia de la dispersión de la energía de las ondas sísmicas en su choque con las heterogeneidades de la tierra, tales como los cambios de litología, presencia de fracturas y estratificaciones variadas. Este fenómeno no implica una

principalmente en el interior del continente. En la región sur, se encuentran sobre la Cordillera Occidental y el Altiplano, en mayor proporción en las regiones de Arequipa, Apurímac y Tacna.

Sismos con focos profundos: ocurren a profundidades mayores a 300 km se encuentran en la frontera de Perú con Brasil y Bolivia. El origen de estos sismos es, aún incierto.

pérdida o absorción de la energía como en el caso de la atenuación anelástica, sino una redistribución de la misma, cuanto mayor sea la dispersión provocada por el medio, la disminución de la amplitud será mayor; es decir, la onda se verá más afectada por la heterogeneidades que encuentre que por la distancia que recorre.

3.2. Factor de calidad Q_c

Q_c mide la pérdida de energía que sufren las ondas coda. En un registro sísmico esta característica se observa como una disminución progresiva de la amplitud de la onda sísmica, su inversa es el factor específico de la atenuación (Q_c^{-1}). Dainty (1981) determinó que la atenuación total de las ondas coda es la suma de las contribuciones de la absorción anelástica y la atenuación dispersiva (Ecuación 1)

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_s} \quad (1)$$

donde Q_c^{-1} es el factor de atenuación de las ondas coda, Q_i^{-1} y Q_s^{-1} son la, atenuación anelástica y dispersiva, respectivamente.

El factor Q_c es un parámetro adimensional, positivo y dependiente de la frecuencia, y se puede estimar usando el modelo de dispersión simple propuesto por Aki y Chouet (1975). Este método se basa en el análisis del sismograma del sismo a diferentes bandas de frecuencia.

Q_c tiene una característica muy importante que es su dependencia con la frecuencia o Ley de dependencia frecuencial:

$$Q_c = Q_0 f^n \quad (2)$$

donde Q_0 es el valor del factor Q_c evaluado a la frecuencia de $f = 1$ Hz, y n es el exponente que define la dependencia con f . Esta expresión es válida para $f > 1$ Hz, ya que para frecuencias menores se ha encontrado valores del factor Q_c casi constantes. Los valores de n se encuentran entre 0.5 y 1, tal como indica Sato y Fehler (1998).

Q_0 varía de forma inversa con n , y depende fuertemente del régimen tectónico de cada área, para regiones de baja actividad sísmica y corteza gruesa y estable se tiene valores de Q_0 altos y n bajos que sugieren baja atenuación. Inversamente para regiones de alta actividad sísmica los valores de Q_0 son bajos y n se hace alta, indicando una mayor atenuación.

4. Datos y procesamiento

Para realizar el presente estudio se utilizó información de la Base de Datos de la Red Sísmica Nacional, a cargo de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida del Instituto Geofísico del Perú. La información corresponde a 300 eventos sísmicos registrados durante el año 2013 por tres estaciones ubicadas en la región sur del Perú: Guadalupe (Gua), Quilca (Qui) y Toquepala (Toq). Una primera selección de los registros permitió eliminar todos aquellos eventos que no presentan claridad sus fases P y S, señales ruidosas y saturadas. Finalmente, se seleccionaron 64 eventos sísmicos con claras fases P, S y bajos niveles de ruido (Figuras 4 y 5).

Para determinar los valores de Q_G , primero se determina la ventana de análisis que se inicia en un tiempo $2t_s$, siendo t_s el tiempo de viaje de la onda S desde el inicio del registro del sismo. Este parámetro considera, que en este tiempo, la amplitud de la coda, que está en función de la distancia, es casi constante (Rautian y Khalturin, 1978). En general, el final de la coda se da cuando la señal empieza a confundirse con el ruido (Figura 6).

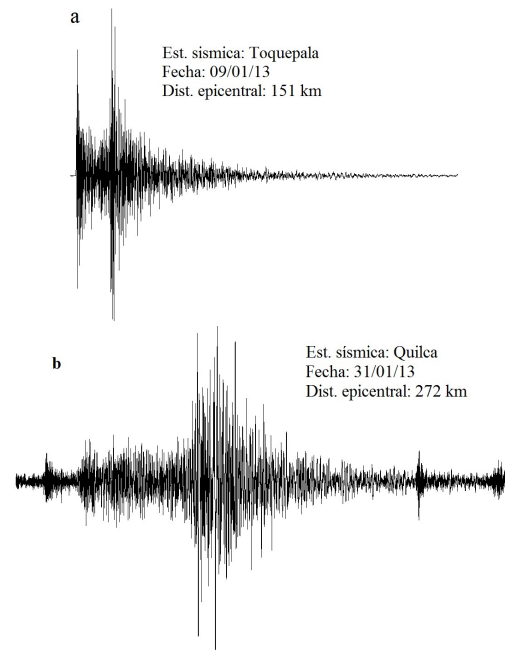


Figura 4. Señales sísmicas para eventos registrados por las estaciones de Toquepala y Quilca. a) Señal con claro decaimiento exponencial de su amplitud, (b) señal saturada, presencia de ruido de fondo.

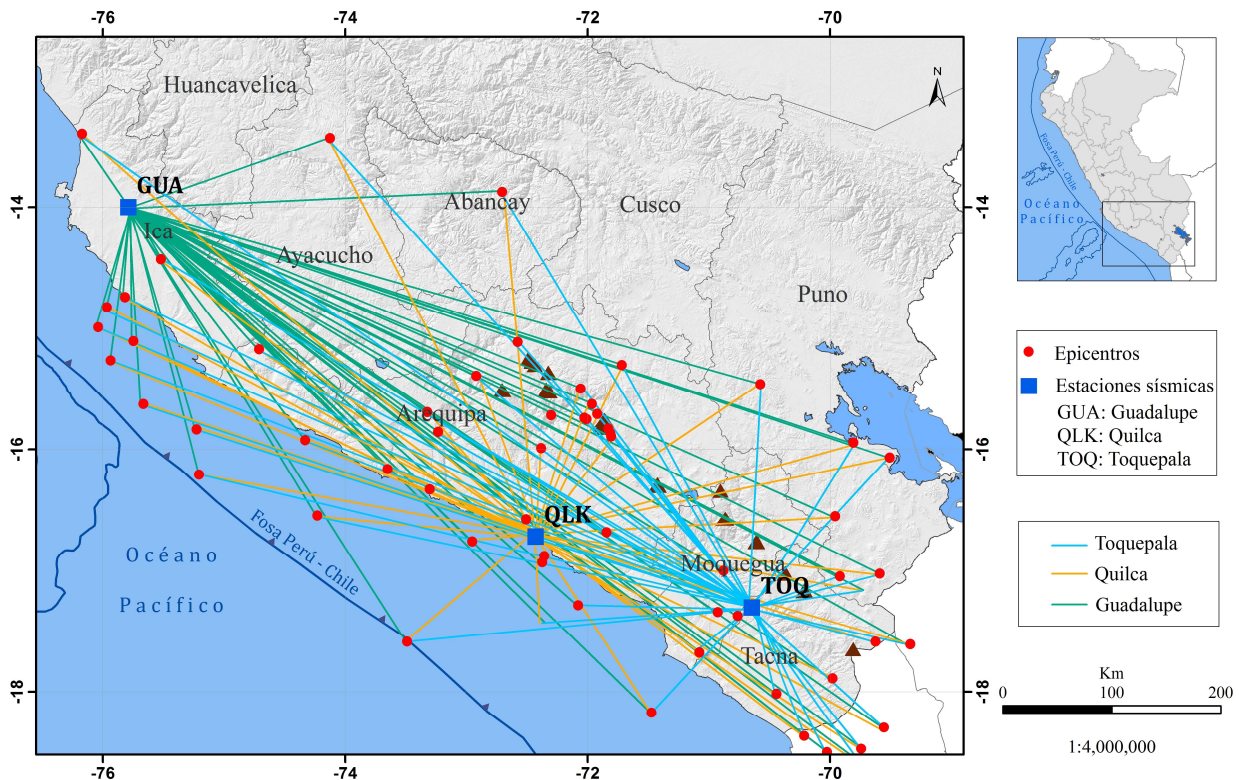


Figura 5. Distribución espacial de los epicentros sísmicos (círculos rojos) y trazado de rayos con las estaciones cuyos registros fueron utilizados en este estudio.

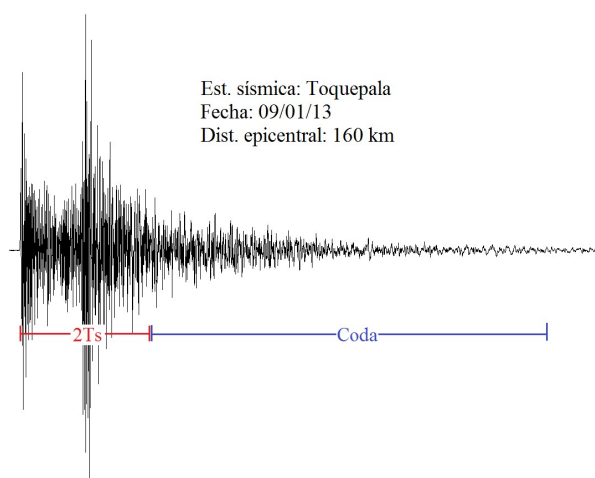


Figura 6. Ejemplo de la coda (conjunto de ondas coda) de un sismo registrado el 9 de enero del 2013 en la estación Toquepala.

Considerando que Q_c varía en función de su frecuencia, las señales fueron analizadas a frecuencias centrales entre 1.5 Hz a 7 Hz. Se utilizó el software Coda Q (Havskov, 1989) y un ejemplo de la salida del programa se muestra en la Figura 7. El primer gráfico representa la señal original y en líneas discontinuas, se indica la ventana de análisis de la coda. Los gráficos siguientes, a la izquierda, la señal analizada y a su derecha la curva de amplitud versus tiempo, ajustada mediante una regresión lineal a fin de obtener los valores de Q_c de acuerdo a la hipótesis de Aki y Chouet (1975). Este procedimiento se realiza para el total de eventos sísmicos utilizados en este estudio.

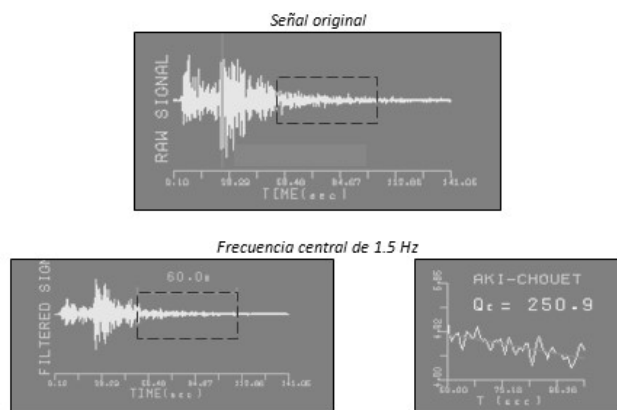


Figura 7. a) Señal de un evento sísmico de magnitud M_w de 5.3, registrado el 22/01/2013 en la estación Quilca. b) ejemplo de señales a 1.5 Hz (Q_c), c) regresión lineal para Q_c .

5. Análisis y discusión

En la Tabla 1 se muestra los valores de Q_c obtenidos para cada estación de registro. Obsérvese que el valor promedio de Q_c aumenta en forma directa con la

frecuencia, donde valores altos de Q_c reflejan pequeñas pérdidas de energía que pueden traducirse como una baja atenuación de las ondas en el medio, y a medida que Q_c se hace menor refleja una pérdida importante de energía; es decir, alta atenuación.

En la Tabla 2 se muestra los resultados obtenidos del análisis para la dependencia frecuencial, y ellos sugieren que la gran variedad de elementos geotectónicos presentes en la región Sur son responsables de la atenuación de las ondas sísmicas. Dentro de estos elementos puede considerarse a la corteza oceánica o placa de Nazca que subduce bajo la placa Sudamericana, las áreas de acumulación de material magmático y alta temperatura asociadas al arco volcánico.

Tal como se definió Q_c es inversamente proporcional a la atenuación de una onda sísmica y está fuertemente afectada por la historia de la evolución tectónica de cualquier región. Según los resultados obtenidos en este estudio Q_0 varía con valores entre 150 a 450 (Figura 8) siendo debido a que en el borde suroccidental del Perú, la Cordillera Andina se encuentra en evolución y deformación como producto del proceso de subducción; es decir, es una zona geológicamente activa y compleja en su estructura y cuyo efecto sobre la señal se manifiesta en la modificación de su contenido frecuencial y amplitud; es decir, la señal va perdiendo energía conforme avanza hacia la superficie. En regímenes más estables, como el escudo brasileño, para el factor Q_c se espera valores mayores a 700, tal como lo sugieren Souza y Mitchell (1998). La presencia de la Cordillera de los Andes juega un rol importante en este proceso.

Tabla 1. Valores de Q_c promedio para cada estación sísmica.

Hz	GUA	QLK	TOQ
1.5	298	324	319
3	519	493	525
4	683	595	628
5	729	670	717
6	937	720	753
7	962	789	982

Tabla 2. Valores dependencia frecuencial para cada estación sísmica

Estación sísmica	Ley de dependencia frecuencial
Quilca	$Q_c = (241.01) f^{(0.62)}$
Toquepala	$Q_c = (239.26) f^{(0.67)}$
Guadalupe	$Q_c = (234.58) f^{(0.75)}$
Promedio para la región	$Q_c = (238.28) f^{(0.68)}$

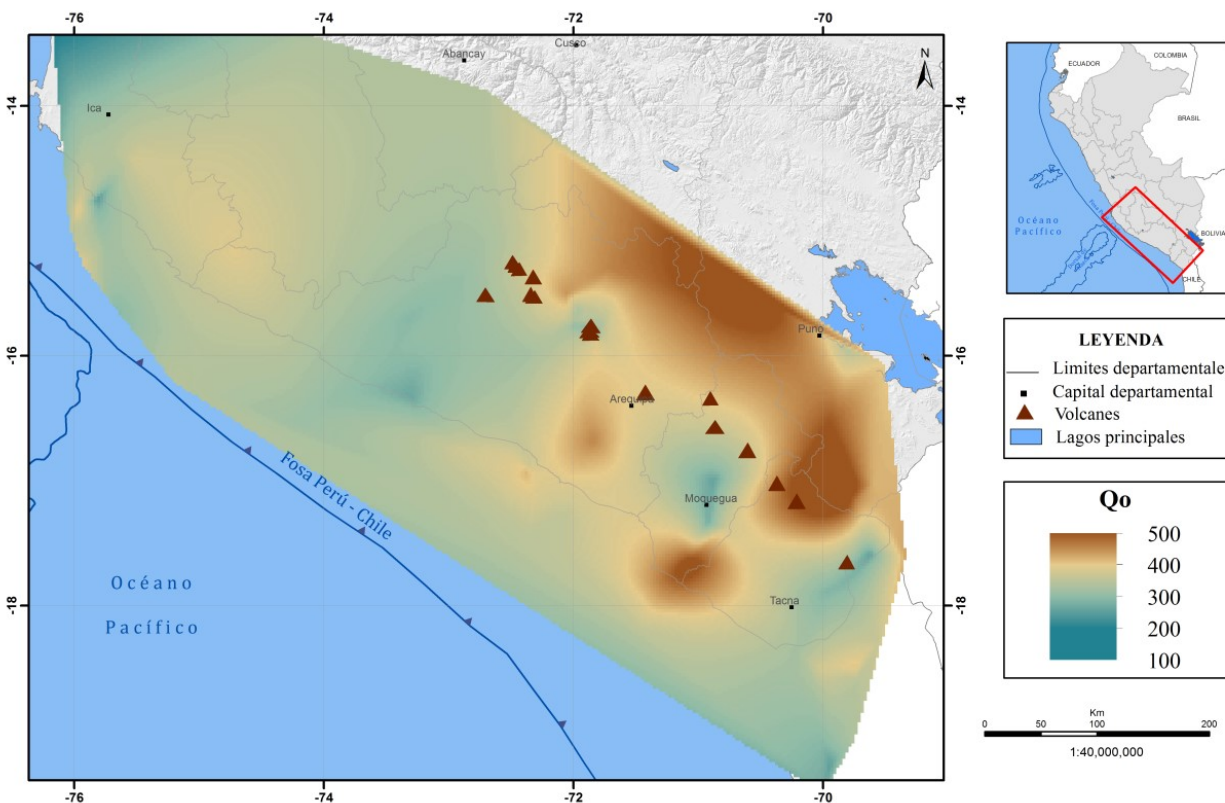


Figura 8. Mapa de Q_c a 1Hz (Q_o) para el borde Suroccidental del Perú.

En otras regiones del mundo en donde se tiene la presencia de volcanes como en Colombia, Indonesia e Italia (Complejo Volcánico del Ruiz, Monte Merapi, Monte Vesubio y Monte Etna), el análisis de las ondas coda a una frecuencia central de 4 Hz permitió caracterizar las propiedades físicas de estas unidades volcánicas. En este estudio se toma en cuenta este parámetro y se elabora un mapa de isovalores de Q_c a la misma frecuencia (Figura 9). Los resultados muestran la presencia de una franja de alta atenuación entre la fosa y el arco volcánico, y en este caso puede deberse a la fragilidad cortical que presenta esta zona lo cual favorece a la deformación de la Cordillera y a la presencia del arco volcánico.

Los perfiles realizados sobre el mapa de Q_c (Figura 10), muestran variación entre los valores de Q_c sobre la Cadena volcánica y la zona alejada de la misma.

Los perfiles B, C y D trazados sobre la zona volcánica presentan la misma forma y valores bajos de Q_c (menores de 600); es decir, la alta atenuación está presente a lo largo de la costa y hacia el interior del continente paralelo a la cadena volcánica, este comportamiento puede deberse a la presencia de fluidos como el magma, agua y gases, que sumados a la alta heterogeneidad y fracturación de la corteza, afectan al flujo de energía de las ondas sísmicas. En su trayectoria la amplitud de las ondas es atenuada por la absorción del medio y por la dispersión en las heterogeneidades encontradas.

El perfil A corresponde a la zona sin presencia de volcanes, los valores de Q_c son mayores a 600, definiendo zonas de menor atenuación.

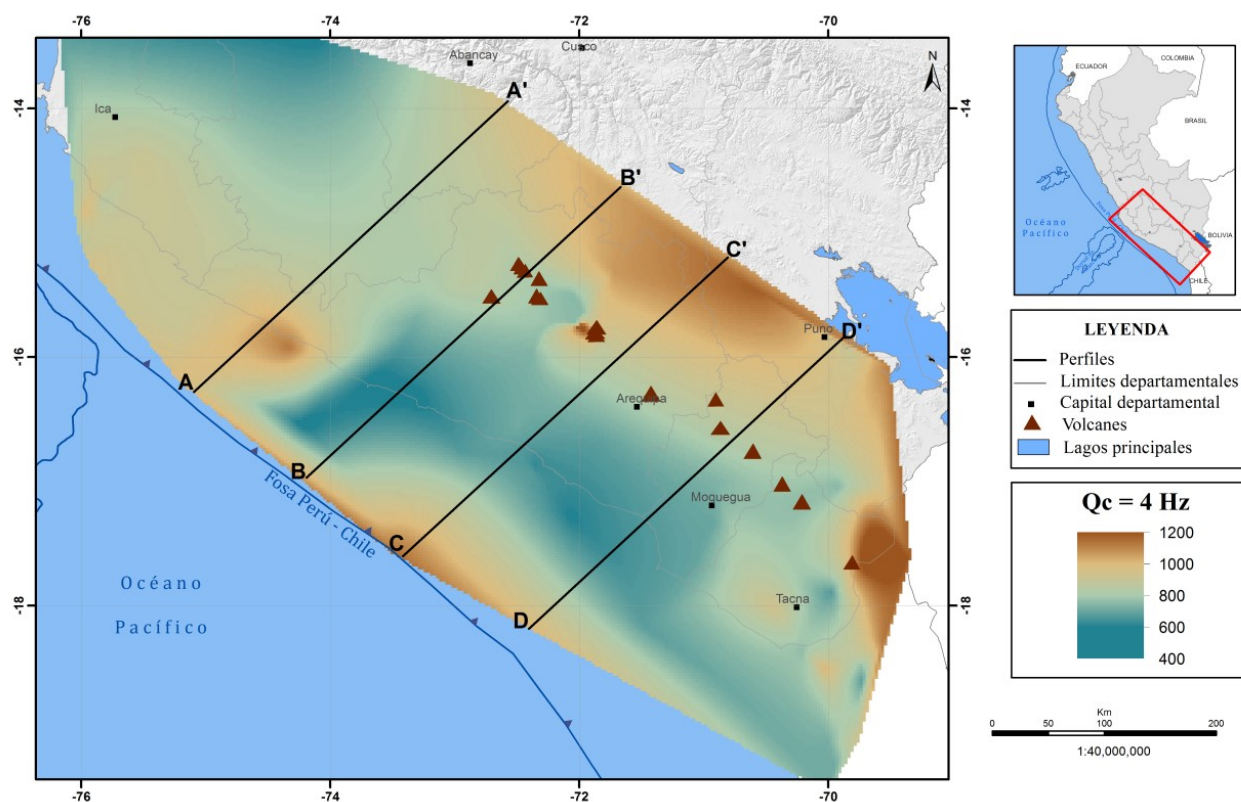


Figura 9. Mapa de perfiles (líneas negras) en el mapa de isovalores de Q_c para la frecuencia central de 4 Hz.

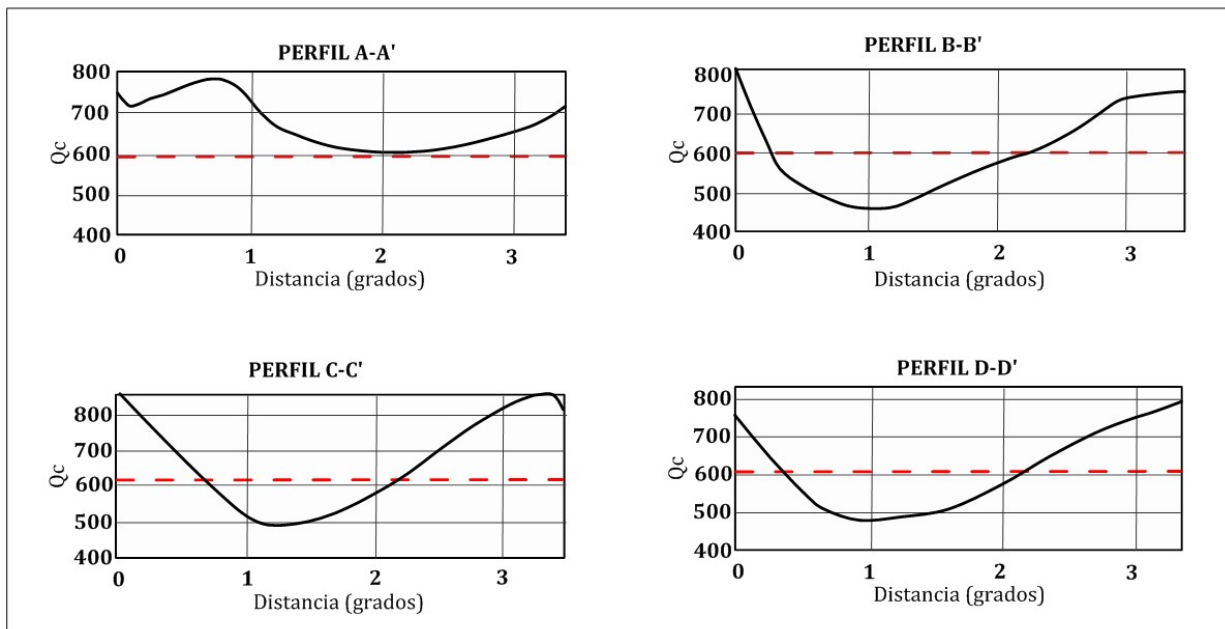


Figura 10. Perfiles de Q_c para frecuencia central de 4Hz.

En la Figura 11, se muestra el esquema propuesto en este estudio para explicar la compleja geodinámica de la zona sur del Perú. Se muestra los principales elementos geodinámicos atenuantes de las ondas sísmicas presentes en la región. Primero, la interacción de la Placa de Nazca

con la Sudamericana en cuyo proceso de subducción, la placa arrastra la corteza oceánica hacia el interior de la Tierra. Segundo el constante levantamiento de la Cordillera Andina en cuyo proceso se genera fracturación y la formación de fallamientos cerca de la superficie y en

profundidad, y por último, el arco volcánico conformado por estratos rocosos con altas temperaturas debido al ascenso de magma hacia la superficie.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se considera que la compleja geodinámica contribuye tanto, a la atenuación dispersiva como a la atenuación intrínseca

de las ondas sísmicas: la primera, causada por los efectos de redistribución de la energía sísmica en las heterogeneidades del medio (fracturas y fallas); y la segunda, por efectos de la absorción de la energía debido a la presencia de zonas de alta temperatura como es el arco volcánico.

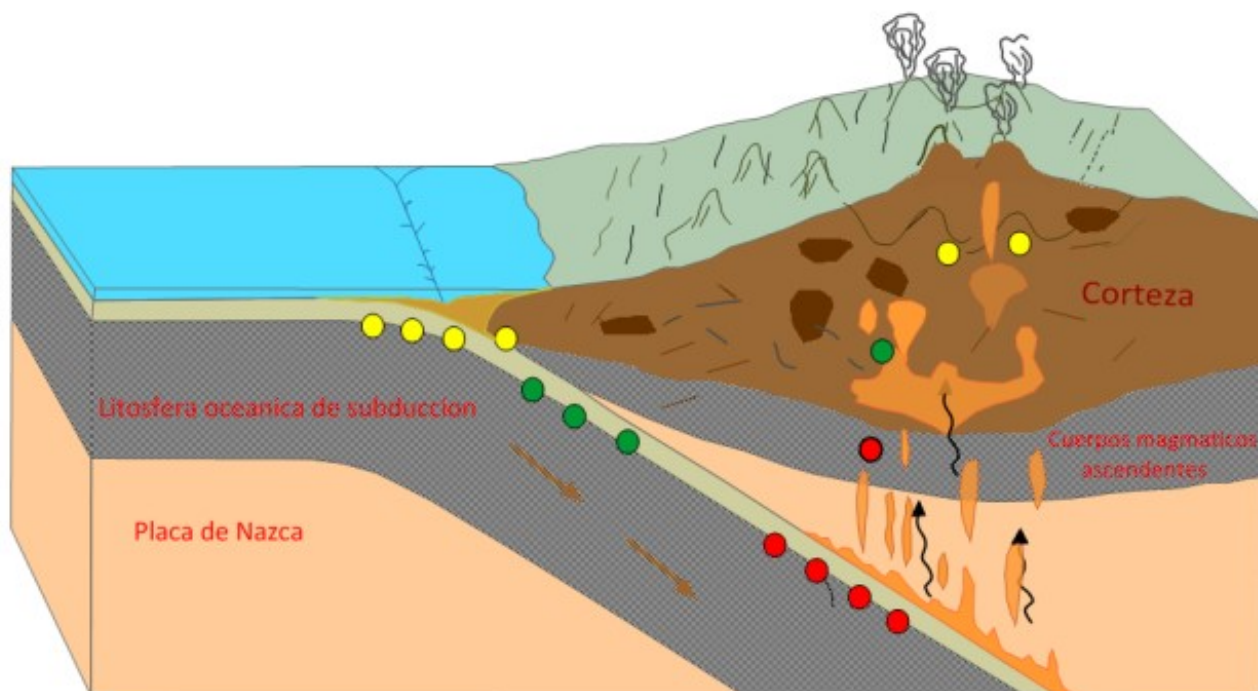


Figura 11. Diagrama de la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana. A mayor profundidad existe la formación de material magmático que asciende hacia la superficie. Los eventos sísmicos se originan (círculos de colores) como producto del proceso de subducción. Los volcanes que se formaron por el ascenso de cuerpos magmáticos (Modificado de Mattauer, 1989).

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que la estimación del factor Q_c es suficiente para conocer de manera cuantitativa la atenuación que sufren las ondas sísmicas en su trayectoria desde su fuente hasta una estación de registro. Para la zona Suroccidental del Perú existe una alta dependencia de Q_c con la frecuencia, lo que indica un alto grado de heterogeneidad debido a la presencia de importantes unidades geodinámicas, zonas de fracturación y altas temperaturas en profundidad. El mapa de isovalores de Q_c permite determinar que la atenuación se hace más intensa entre la línea de costa y el arco volcánico debido a la presencia de zonas de alta temperatura y fluidos magmáticos que atenúan las ondas sísmicas en su recorrido. La variación del factor Q_c permitió distinguir que la zona suroccidental del Perú, presenta alta atenuación sísmica, condicionada por sus características geodinámicas y sismotectónicas.

Referencias

Allmendinger, R. W., Jordan, T. E., Kay, S. M., Isacks, B.L. (1997). The evolution of the Altiplano - Puna Plateau of

the Central Andes. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 25, 139-174.

Aki, K. (1969), Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *J. Geophys. Res.*, 74, 615-631.]

Aki, K. y Chouet, B. (1975), Origin of Coda Waves: Source, attenuation and scattering effects. *J. Geophys. Res.*, 80, 3322-3342.

Barazangi, M. y Isacks, B. (1979). Subduction of the Nazca plate beneath Perú: evidence from the spatial distribution of earthquakes: *Geoph. Jour. Roy. Astr. Soc.*, v. 57, 537- 555.

Chouet, B. (1979). Temporal variation in the attenuation of earthquake coda near Stone Canyon, California, *Geophys. Res. Lett.* 6, 143-146.

Dainty, A. M., (1981). A scattering model to explain seismic Q observations in the lithosphere between 1 and 30 Hz. *Geophys. Res. Lett.*, 8, 1126-1128.

Havskov, J. (1989) Q and spectral analysis in Seisan.

Marocco R. (1980). *Geologie des Andes Peruvienes, un segment E-W de la chaîne des Andes peruvienes: La deflexion d' Abancay. Etude géologique de la Cordillera orientale et des Hauts Plateaux entre Cuzco et San Miguel Sed du Pérou.* Doc. O. R. S. T. O. M. 94 pp.

Martínez, C. (2005). Tesis doctoral: Estructura superficial de atenuación para ondas sísmicas directas:

- P y S, en ambientes volcánicos. Aplicación al volcán Isla Decepción (Antártida) y al volcán Etna (Italia). Universidad de Granada.
- Mattauer, M. (1989). *Monts et Merveilles, Beautés et richesses de la Geologie*. Hermann Editores de Ciencias y Arte. Paris, Francia.
- Rautian, T. J. y Khalturin, V.I. (1978), The Use of the Coda for the Determination of the Earthquake Source Spectrum, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 68, 923-948.
- Sato, H. and y Feller, M.C. (1998). *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth*. Springer Verlag, 309 pp.
- Sebrier, M., Huaman, D., Blanc, J., Machare, J., Bonnot, D. y Cabrera, J. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and state stress in the central Andes of southern Perú. *Tectonics*, 4, 739-780.
- Souza, J. L. and Mitchell (1998). Lg Coda Q variation across South America and their relation to crustal evolution. *Pure and Applied Geophysics*, 153, 587-612.
- Tavera, H. y Buforn, E. (1998). En A. Udias y E. Buforn (ed). *Sismicidad y Sismotectónica de Centro de Sudamérica*. Física de la Tierra. UCM., N° 10, 1987-219.