

# GEOFISICA INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNION GEOFISICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE  
GEOFISICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Vol. 20

México, D. F., 1o. de enero de 1981

Núm. 1

## *ATENUACION DE LAS ONDAS DE LOVE EN UNA ZONA DEL ATLANTICO QUE COMPRENDE LA PLATAFORMA DE LAS BERMUDAS Y EL ARCO VOLCANICO DEL CARIBE*

J. A. CANAS\* \*\*

*(Recibido: 1<sup>o</sup> dic., 1980)*

### RESUMEN

Se han determinado los valores promedio de los coeficientes de atenuación de las ondas de Love en el rango de períodos de 26 a 80 segundos para las trayectorias que unen la estación sismográfica de BEC (Islas Bermudas) con las estaciones SJG (Puerto Rico) y CAR (Venezuela).

Los valores de los coeficientes de atenuación obtenidos son anormalmente elevados, especialmente para los períodos comprendidos entre los 26 y los 80 segundos; dichos valores no están de acuerdo con relaciones de atenuación establecidas para el Océano Atlántico. Este hecho parece indicar que bajo la zona estudiada pueda existir una región muy bien desarrollada de bajos valores de Q.

\* *Department of Earth and Atmospheric Sciences,  
Saint Louis University, Saint Louis, Mo. (USA).*

\*\* *Cátedra de Geofísica, Universidad Complutense de Madrid,  
Madrid(3) (España).*

## ABSTRACT

The mean values of the attenuation coefficients of Love Waves in the range 26 to 80 seconds for the trajectories between the stations BEC (Bermuda Island), SJG (Puerto Rico) and CAR (Venezuela) were determined.

The attenuation coefficients thus obtained are abnormally high, particularly for the periods ranging from 26 to 50 seconds; such values do not agree with the relationships found for the Atlantic Ocean. This fact suggests that underneath the studied area a well developed zone of low Q values may exist.

## INTRODUCCION

Los estudios de atenuación de las ondas superficiales se han mostrado como magníficos indicadores de la situación de la Astenosfera (o zona de bajos valores de Q) en los Océanos Pacífico y Atlántico.

Recientemente Canas y Mitchell (1978) han puesto de manifiesto que el espesor de la Astenosfera así como los valores de los factores específicos de calidad (Q) son una función dependiente de la edad del suelo oceánico en tres regiones de distinta edad en el Océano Pacífico. Este hecho ha sido posteriormente confirmado para las placas de Nazca-Cocos tratadas conjuntamente (Canas y Correig, 1980). Asimismo se ha confirmado que bajo la Cordillera Este del Océano Pacífico el espesor de la Astenosfera es mayor y los valores de Q son más pequeños aquí que en cualquier otra región de dicho Océano (Canas *et al.*, 1980).

Canas y Mitchell (1981) han demostrado que en general, el comportamiento anterior puede aplicarse también al Océano Atlántico; en particular encontraron que la atenuación de las ondas de Rayleigh para regiones  $> 65$  M.a. era muy pequeña, con valores próximos a  $1.0 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1}$  en el rango de períodos de 15 a 110 segundos. Asimismo hallaron que la fricción interna puede estar íntimamente ligada a la velocidad de separación de las placas, así como a los procesos de dislocación en el manto superior.

En este estudio se trata de mostrar que la atenuación de las ondas de Love en la región estudiada puede ser comparable a la atenuación que sufren las ondas superficiales al atravesar las Cordilleras Este del Océano Pacífico y Central del Océano Atlántico. La confirmación de este hecho presupone que bajo la zona estudiada puede existir una región en la que los valores de Q sean anormalmente bajos.

## ANÁLISIS DE LOS DATOS

Utilizando tres terremotos ocurridos en la costa oeste de América del Sur y tres estaciones sismográficas situadas en el este del Océano Atlántico (Figura 1, Tabla 1), se han determinado los coeficientes de atenuación del modo fundamental de las ondas de Love correspondientes a los caminos de círculo máximo entre los pares de estaciones sismográficas: BEC-SJG y BEC-CAR.

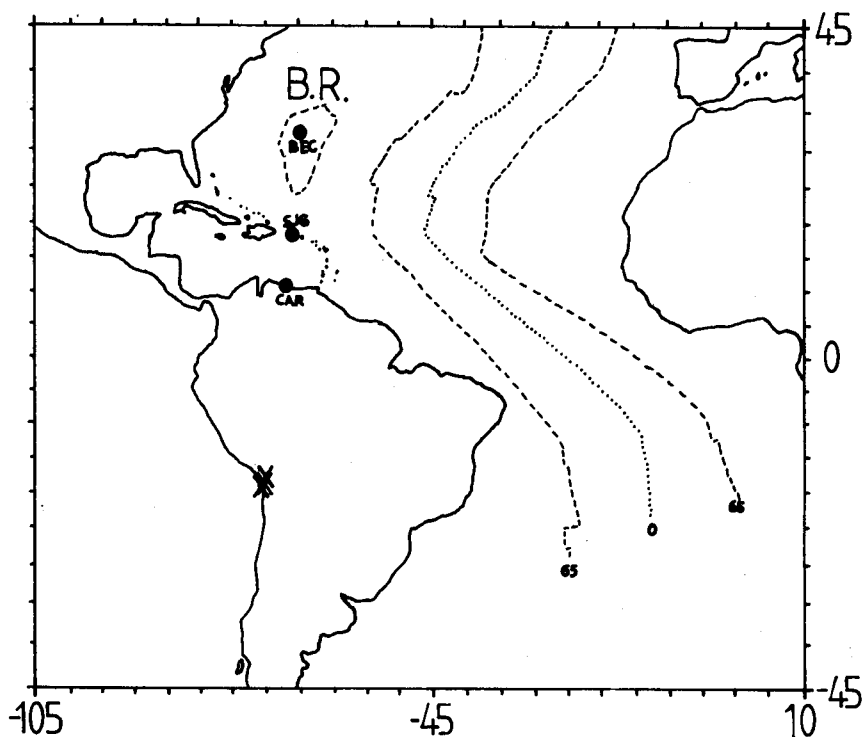


Fig. 1. Situación de los epicentros (x) y de las estaciones sismográficas (●) utilizadas en este estudio.

La obtención de los coeficientes de atenuación se ha llevado a cabo utilizando el método de las Dos Estaciones, lo que supone que los pares de estaciones citadas y los epicentros correspondientes deben hallarse aproximadamente en el mismo camino de círculo máximo. Para evitar en lo posible el problema de la conversión de modos superiores a inferiores y viceversa, las estaciones sismográficas han sido escogidas de tal forma que éstas estén situadas en la región costera y en islas del Atlántico; asimismo sólo períodos mayores o iguales a 26 segundos han sido utilizados en este

estudio, ya que Drake y Bolt (1980) han demostrado que para períodos menores o iguales a 25 segundos existe una mayor proporción de energía transportada por los modos superiores que por el modo fundamental. Para minimizar aun más el problema de interferencia, las amplitudes seleccionadas en cada estación, a partir de las cuales se obtienen los coeficientes de atenuación, se han obtenido tales que las velocidades de grupo observadas de las ondas de Love se ajustasen a las curvas teóricas de velocidad obtenidas del modelo de Tierra  $> 65$  M.a. correspondiente al Océano Atlántico (Canas y Mitchell, 1980). Es posible, no obstante, que alguno de los períodos menores pudiera hallarse contaminado por energía correspondiente a algún modo superior, especialmente en casos en los que el modo fundamental y los modos superiores no se hallan claramente separados.

Tabla 1

EPICENTROS Y PARES DE ESTACIONES  
SISMOGRAFICAS UTILIZADAS PARA LA OBTENCION  
DE LA ATENUACION DE LAS ONDAS DE LOVE

Fecha	Localización	Estaciones
12 Jun 65	20.55, 69.3W	BEC-CAR
8 Ago 65	19.65, 68.7W	BEC-CAR
24 Ago 66	19.95, 69.1W	BEC-CAR, BEC-SJG

Los sismogramas utilizados, pertenecientes todos ellos a la WWSSN, han sido digitalizados a intervalos irregulares. Posteriormente se ha obtenido un intervalo constante de 1.0 segundos por interpolación lineal. Las técnicas de filtrado múltiple en el dominio de las frecuencias (Dziewonski *et al.*, 1969) proporciona las amplitudes espectrales y velocidades de grupo buscadas en cada estación como una función del período. Previamente al análisis efectuado se obtuvo la componente transversal del movimiento a partir de las componentes Norte-Sur y Este-Oeste de los sismogramas.

COEFICIENTES DE ATENUACION DE LAS ONDAS DE LOVE

Los coeficientes de atenuación de las ondas de Love por aplicación del Método de las Dos Estaciones, vienen dados por:

$$\gamma(\omega) = \frac{\ln \left\{ \frac{A_1(\omega, r_1) I_2(\omega) (\sin \Delta_1)^{1/2}}{A_2(\omega, r_2) I_1(\omega) (\sin \Delta_2)^{1/2}} \right\}}{r_2 - r_1} \quad (1)$$

donde  $\gamma(\omega)$  es el coeficiente de atenuación en función de la frecuencia  $\omega$  ( $\omega = 2\pi/T$ ),  $A_1$  y  $A_2$  son las amplitudes espectrales de las ondas en las estaciones situadas a menor y a mayor distancia respectivamente ( $r_1, r_2$ ),  $I_1(\omega)$  e  $I_2(\omega)$  son las respuestas instrumentales de los sismógrafos y  $(\sin \Delta_1)^{1/2}$  y  $(\sin \Delta_2)^{1/2}$  corrigen por la distribución geométrica de la energía.

En la Figura 2 se muestran los coeficientes de atenuación obtenidos conjuntamente con sus desviaciones típicas. Puede observarse que en general éstos son mayores cuanto menor es el período.

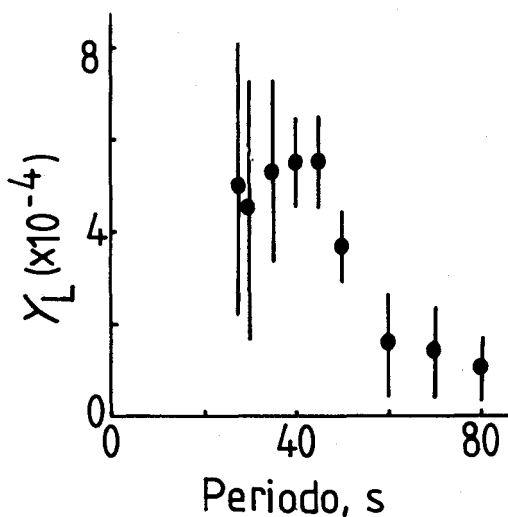


Fig. 2. Coeficientes de atenuación observados de las ondas de Love. Las barras verticales indican desviaciones típicas.

Canas y Mitchell (1981) obtuvieron tan sólo los coeficientes de atenuación de las ondas de Rayleigh para diversas regiones del Atlántico, una de ellas fue la región  $> 65$  M.a. La comparación de los valores de los coeficientes de atenuación de las ondas de Love obtenidos en este estudio, no puede ni debe hacerse con los coefi-

cientes de las ondas de Rayleigh, asimismo la experiencia ha demostrado (Mitchell *et al.*, 1976; Canas y Mitchell, 1978) que los coeficientes de atenuación de las ondas de Rayleigh son en general menores que los correspondientes a las ondas de Love. Para efectuar la comparación necesitamos pues obtener coeficientes de atenuación de las ondas de Love en una región  $> 65$  M.A. en el Océano Atlántico. Estos coeficientes se han obtenido, teóricamente, de la siguiente forma:

Los coeficientes teóricos de las ondas de Rayleigh son calculados a partir de la expresión (Anderson *et al.*, 1965; Mitchell, 1975):

$$\gamma_R = \frac{\pi}{T} \left\{ \sum_{\ell=1}^N \left( \frac{\alpha_{\ell}}{C_R^2} \frac{\partial C_R}{\partial \alpha_{\ell}} \right)_{\omega, \rho, \beta} Q_{\alpha \ell}^{-1} + \sum_{\ell=1}^N \left( \frac{\beta_{\ell}}{C_R^2} \frac{\partial C_R}{\partial \beta_{\ell}} \right)_{\omega, \rho, \alpha} Q_{\beta \ell}^{-1} \right\} \quad (2)$$

donde T es el período;  $\alpha$  y  $\beta$  son las velocidades compresional y de cizalla respectivamente,  $Q_{\alpha}$  y  $Q_{\beta}$  son los llamados factores específicos de calidad,  $C_R$  es la velocidad de fase de las ondas de Rayleigh y N es el número de capas considerado en el modelo,  $\omega, \rho, \beta$  y  $\omega, \rho, \alpha$  indican que la frecuencia, densidad y velocidad de cizalla o compresional se mantienen constantes.

La expresión 2 calcula los coeficientes de atenuación teóricos de las ondas de Rayleigh a partir de un modelo de fricción interna  $Q_{\beta}^{-1}$  ( $Q_{\alpha}^{-1}$  puede ser expresado en función de  $Q_{\beta}^{-1}$  siguiendo a Anderson *et al.*, 1965). El modelo de  $Q_{\beta}^{-1}$  para la región  $> 65$  M.a. en el Océano Atlántico es el de Canas y Mitchell (1980). Con el modelo teórico de  $Q_{\beta}^{-1}$  se puede proceder ahora a calcular los coeficientes de atenuación teóricos de las ondas de Love. Estos vienen dados por:

$$\gamma_L = \frac{\pi}{T} \sum_{\ell=1}^N \left( \frac{\beta_{\ell}}{C_L^2} \frac{\partial C_L}{\partial \beta_{\ell}} \right) Q_{\beta \ell}^{-1} \quad (3)$$

donde el subíndice L indica ondas de Love.

Las derivadas parciales  $\partial C_L / \partial \beta_{\ell}$  y las velocidades de fase  $C_L$  son calculadas a partir de programas estandar de cálculo numérico. El modelo de Tierra utilizado es el citado anteriormente.

En la Figura 3 se muestran los coeficientes teóricos de las ondas de Rayleigh y de Love para el modelo de Tierra y modelo de fricción interna citados. En la Figura 4 se comparan los coeficientes de atenuación de las ondas de Love obtenidos en este estudio con los teóricos correspondientes a la región  $> 65$  M.a. Puede observarse

por simple comparación que los obtenidos en este estudio son mucho mayores que los que teóricamente deben corresponder a dicha región. Este hecho indica que la atenuación de las ondas de Love en dicha zona, es anormalmente grande, cuando en cambio debería corresponderle una atenuación muy pequeña de acuerdo con relaciones establecidas entre la edad del suelo oceánico y los coeficientes de atenuación, que establecen que cuanto más joven es la edad del suelo oceánico, mayores son los coeficientes de atenuación (Canas y Mitchell, 1978; Canas *et al.*, 1980; Canas y Correig, 1980; Canas, 1980; Canas y Mitchell, 1980).

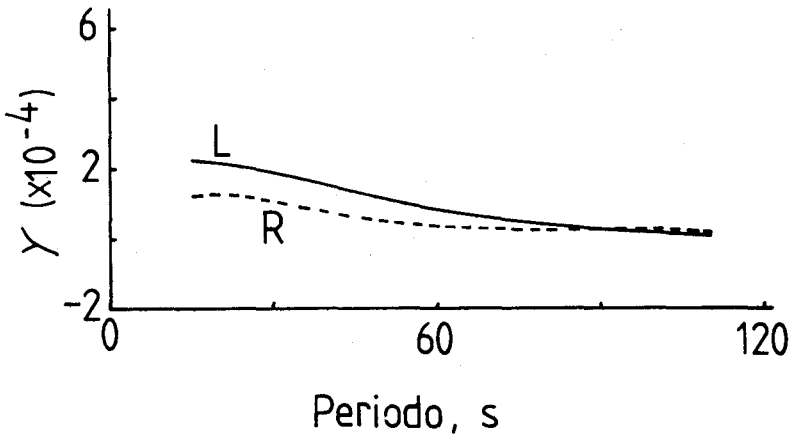


Fig. 3. Coeficientes de atenuación teóricos de las ondas de Rayleigh y de Love correspondientes a los modelos de Tierra y de fricción interna en una zona del Atlántico >65 M.a.

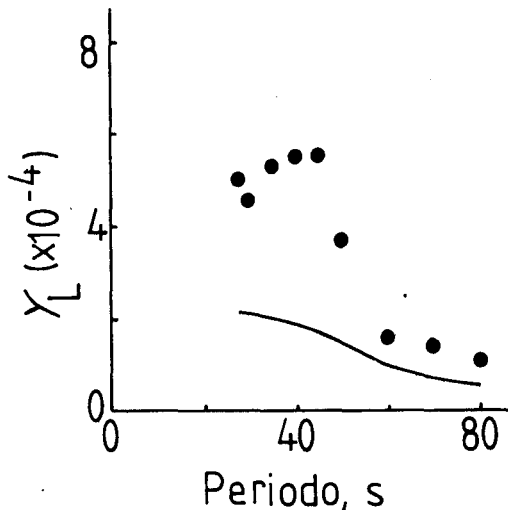


Fig. 4. Comparación entre los coeficientes de atenuación teóricos de las ondas de Love correspondientes a la región > 65 M.a. y los observados obtenidos en este estudio (●).

## DISCUSION

La zona bajo estudio es una zona complicada ya que las trayectorias utilizadas cruzan todas ellas en la dirección de máxima longitud el llamado "Bermuda Rise" (Plataforma de Bermudas) y el Arco Volcánico de la placa del Caribe. Algunas de las trayectorias utilizadas por Canas y Mitchell (1980) cruzaban dichas zonas en la dirección de mínima longitud, asimismo los caminos proporcionaban un promedio general para todo el Atlántico. Una posible explicación a los elevados valores de los coeficientes de atenuación observados podría venir dada por la existencia tanto debajo del "Bermuda Rise" como debajo del Arco Volcánico de un manto caliente que da lugar a una zona en la que los materiales que en ella se encuentran poseen bajos valores de  $Q$ . La inversión formal de los coeficientes de atenuación obtenidos, no se ha intentado ya que el rango de períodos de 26 a 80 segundos no es suficientemente extenso para obtener una clara distribución de  $Q$  con la profundidad. Ahora bien, los valores obtenidos indican que los coeficientes de atenuación de las ondas de Rayleigh deben ser normalmente elevados, lo que podría indicar que la distribución de  $Q$  bajo dicha zona pudiera ser parecida a la encontrada bajo zonas de extensión, tales como la Cordillera Central del Atlántico. Un futuro trabajo utilizando ondas de Rayleigh podría aportar luz acerca de la distribución de  $Q$  bajo dicha región.

## CONCLUSIONES

Los coeficientes de atenuación obtenidos en la región bajo estudio son anormalmente elevados, lo que indica la posibilidad de que bajo dicha zona exista una distribución de  $Q$  comparable a la existente bajo la Cordillera Central Oceánica o Cordillera Este del Pacífico.

Los coeficientes de atenuación observados podrían ser debidos a que bajo el "Bermuda Rise" y/o la Cadena Volcánica del Caribe existiese una distribución tal de materiales que produjesen efectos paralelos a los observados en zonas de extensión, tales como las Cordilleras Central del Atlántico y Este del Pacífico.

Establecido el hecho de que posiblemente exista tal zona, un futuro estudio (actualmente en progreso) utilizando ondas de Rayleigh (ondas en las cuales la distorsión debida a los modos superiores es pequeña) debe dar lugar a la obtención de un modelo de  $Q$  para dicha zona.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Universidades e Investigación (España) y por la Society of Exploration Geophysicists (USA).



## BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, D. L., A. BEN-MENACHEM y C. ARCHAMBEAU, 1965. Attenuation of seismic energy in the upper mantle. *J. Geophys. Res.*, 70, 1441-1448.
- CANAS, J. A. y B. J. MITCHELL, 1978. Lateral variation of surface wave anelastic attenuation across the Pacific. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68, 1637-1650.
- CANAS, J. A., 1980. Modelo de  $Q_{\beta}^{-1}$  para el Este del Océano Pacífico. *Anales de Física de la R. S. E. de Física y Química*. (Aceptado para publicación).
- CANAS, J. A. y A. M. CORREIG, 1980. Modelo de fricción interna de las ondas de cizalla para las placas Nazca-Cocos. *Geofísica Inter.* 19:2, pp.
- CANAS, J. A. y B. J. MITCHELL, 1981. Rayleigh wave attenuation and its variation across the Atlantic Ocean. *Geophys. J. R. astr. Soc.* (Aceptado para publicación).
- CANAS, J. A., B. J. MITCHELL y A. M. CORREIG, 1980.  $Q_{\beta}^{-1}$  models for the East Pacific Rise and the Nazca plate, *Mechanisms of Plate Tectonics and Continental Drift*, 123-133, eds. P. A. Davies and S. K. Runcom, Academic Press, London.
- DRAKE, L. A. y B. A. BOLT 1980. Love waves normally incident at a continental boundary. Preprint.
- DZIEWONSKI, A., S. BLOCH y M. LANDISMAN, 1969. A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 427-444.
- MITCHELL, B. J., 1975. Regional Rayleigh wave attenuation in north America. *J. Geophys. Res.*, 80, 4904-4916.
- MITCHELL, B. J., L. W. LEITE, Y. K. YU y R. B. HERRMAN, 1976. Attenuation of Love and Rayleigh waves across the Pacific at periods between 15 to 110 seconds. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1189-1202.