

# Modelos regionalizados de la litosfera y astenosfera del Océano Pacífico deducidos a partir de la inversión de las velocidades de las ondas superficiales y de los coeficientes de atenuación. (\*)

por JOSÉ A. CANAS TORRES

Departamento de Física de la Tierra y del Cosmos  
Universidad de Barcelona (Centro coordinado del C.S.I.C.)

## RESUMEN

A partir del análisis de las curvas de dispersión y coeficientes de atenuación de ondas superficiales que se han propagado a través del Océano Pacífico hemos obtenidos modelos promedio y regionalizados del Océano Pacífico. Esta regionalización se ha efectuado para las regiones de la litosfera comprendidas entre 0-50, 50-100 y 100-> 100 M.a. Los principales resultados de este estudio son los siguientes: Los coeficientes de atenuación de las ondas sísmicas aumentan al decrecer la edad de la litosfera. El espesor de la litosfera aumenta al incrementarse su edad. El límite inferior de la astenosfera es aproximadamente constante, y sus límites superiores son de unos 45 km para la región 0-50 M.a., 75 km para la región 50-100 M.a. y unos 105 km para la región 100->100 M.a. Entre una profundidad de 180 a 300 km los valores de  $Q_{\beta}^{-1}$  decrecen suavemente, pudiendo localizarse entre estas profundidades el llamado subcanal de baja velocidad.

## ABSTRACT

By analysing dispersion curves and attenuation coefficients of surface waves travelling through the Pacific Ocean mean and regionalised models of the Pacific Ocean have been obtained. Regionalisations have been carried out for the regions 0-50, 50-100 and 100->100 M.a. old. The main results obtained are the following: attenuation coefficients of surface waves increase as the age of the lithosphere decreases. The depth of the Lithosphere increases with its age. The lower limit of the Asthenosphere is approximately constant, being its upper limit of about 45 km for the region 0-10 M.a., 75 km for the region 50-100 M.a. and 105 km for the region 100->100 M.a. old. From a depth of about 180 km to 300 km  $Q_{\beta}^{-1}$  values are slightly decreasing; into this region may be located the low velocity subchannel.

## INTRODUCCIÓN

Los coeficientes de atenuación, factores de calidad específicos  $Q$ , velocidades de las ondas superficiales, densidades y valores del Parámetro  $Q_{\beta}^{-1}$  de las ondas de cizalla son un potente indicador de la constitución de la corteza y manto terrestre.

El objeto de este estudio es investigar la variación de los coeficientes de atenuación, factores de calidad específicos  $Q$ , velocidades de las ondas superficiales, densidades y valores del parámetro  $Q_{\beta}^{-1}$  de las ondas de cizalla para poder determinar modelos promedio y regionalizados del Océano

Pacífico que nos permitan obtener información, desde un punto de vista sísmológico, acerca de la constitución de la litosfera y astenosfera terrestre. Siguiendo definiciones universalmente aceptadas, la litosfera comprende la corteza y el manto superior hasta el límite que separa la zona de baja velocidad del manto superior. Esta última recibe el nombre de astenosfera.

Se intenta también establecer una relación entre los valores de las distintas variables enumeradas y la edad del suelo oceánico del Pacífico.

Así pues este estudio trata de ser una completa investigación de la constitución del suelo oceánico del Pacífico utilizando la propagación de las ondas sísmicas superficiales originadas por fuentes naturales.

## OBTENCIÓN DE DATOS Y SU ANÁLISIS

Se han analizado 18 registros de terremotos (Tabla 1) ocurridos a lo largo del mundo. Los 18 registros pertenecen a la World Wide Standardized Sismograph Network (WWSSN), componentes de largo periodo 4, 5 y 6. La cantidad total de terremotos fue seleccionada de tal forma que cualquiera de los estudiados estuviese situado a lo largo de un círculo máximo con cualquier par de estaciones sísmográficas y cumpliendo además la condición de no hallarse situado en el camino más corto entre ambas estaciones. Para escoger tales terremotos se utilizó un programa de cálculo numérico que investiga los terremotos situados dentro de una específica ventana en azimut respecto al círculo máximo generado conjuntamente con el par de estaciones sísmográficas. Las figuras 1 y 2 muestran las trayectorias, epicentros y estaciones utilizadas para las ondas de Rayleigh y de Love respectivamente.

Las amplitudes espectrales de las ondas de Rayleigh y de Love en función del periodo así como las velocidades epicentro-estación han sido obtenidas utilizando programas de cálculo numérico basados en técnicas de filtrado y análisis de Fourier.

(\*) Resumen de la Tesis doctoral. Facultad de Física, Universidad de Barcelona (20 de Junio 1978).

TABLA 1. Pares de estaciones utilizadas en las observaciones de velocidades y atenuaciones para cada terremoto.

Fecha	Epicentro Situación	Estaciones para ondas Rayleigh	Estaciones para ondas Love
18-Nov-63	29.9N, 113.6W	KIP-RAB	
23-Oct-64	19.8N, 56.0W	KIP-RAB	
20-Ago-65	22.8S, 176.2W	RAR-GIE	
22-Dec-65	58.4N, 153.1W	KIP-RAR	
7-Ago-66	31.8N, 114.5W	KIP-RAB	
15-Jun-68	5.6N, 82.6W	KIP-GUA	KIP-GUA
10-Jul-68	36.8S, 78.5E	KIP-HNR	
20-Sep-68	10.7N, 62.7W	RAR-GIE	RAR-GIE
22-Oct-69	34.6N, 121.6W	KIP-HNR	
11-Mar-70	57.5N, 153.9W	KIP-RAR	
9-Feb-71	34.4N, 118.4W	KIP-HNR	
12-Ago-72	5.0N, 82.6W	KIP-GUA	
5-Sep-72	19.9S, 169.0W	RAR-GIE	RAR-GIE
6-Ene-73	14.7S, 166.4E	AFI-GIE	
25-Jun-74	26.1S, 84.3E		KIP-RAB
27-Sep-74	2.7N, 71.4W	AFI-GIE	AFI-GIE
14-Jul-75	40.4S, 78.4E	KIP-HNR	KIP-HNR
19-Sep-75	34.8S, 81.8E		KIP-HNR

### VELOCIDADES DE LAS ONDAS SUPERFICIALES

Las velocidades de grupo y de fase de las ondas de Rayleigh y de Love entre pares de estaciones sismográficas han sido obtenidas utilizando las expresiones:

$$U(T) = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

donde  $U(T)$  es la velocidad de grupo en función del período.  $\Delta_2$  y  $\Delta_1$  son las distancias en kilómetros desde el epicentro hasta las estaciones situadas a mayor y menor distancia, siendo  $t_2$  y  $t_1$  los tiempos de llegada del mismo período  $T$  hasta las estaciones situadas a distancias  $\Delta_2$  y  $\Delta_1$ .

$$C(\omega) = \frac{\omega (r_2 - r_1)}{\phi_2(\omega) - \phi_1(\omega) + 2\pi N} \quad (2)$$

donde  $C(\omega)$  es la velocidad de fase en función de la frecuencia  $\omega$ .  $N$  es un entero que se determina efectuando comparaciones con curvas teóricas para períodos mayores o iguales a 100 segundos.  $r_2$  y  $r_1$  significan lo mismo que  $\Delta_2$  y  $\Delta_1$  en la ecuación 1.  $\phi_2(\omega)$  y  $\phi_1(\omega)$  son las fases de las ondas de frecuencia  $\omega$  registradas en las estaciones situadas a mayor y menor distancia.

Debido a que sólo para el caso de las ondas de Rayleigh se posee una región pura (50-100 M.a.), para las trayectorias (figura 1), la regionalización sólo se ha efectuado para el caso de las ondas de Rayleigh. Esta regionalización se ha llevado a cabo utilizando la expresión:

$$V(T) = \sum_i \alpha_i V_i(T) \quad (3)$$

donde  $V(T)$  es el promedio total de velocidad obtenido para el período  $T$ , representando la velocidad de grupo o de fase indistintamente.  $\alpha_i$  son los pesos correspondientes a cada región y trayectoria y  $V_i(T)$  es la velocidad a determinar para cada una de las tres regiones bajo estudio.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3 y 4.

Las características generales obtenidas para las velocidades regionalizadas son las siguientes:

- 1) Períodos menores de 40 segundos no siguen estrictamente la regla de que a mayor edad litosférica corresponde mayor velocidad.
- 2) Períodos mayores de 40 segundos siguen en general la regla susodicha.
- 3) Las velocidades de la zona más moderna (0-40 M.a.) se hallan claramente diferenciadas de las correspondientes a las regiones más antiguas (50-100 M.a. y 100->100 M.a.).

### COEFICIENTES DE ATENUACIÓN DE LAS ONDAS SUPERFICIALES

Los coeficientes de atenuación han sido obtenidos utilizando el método que consiste en medir las amplitudes de las ondas originadas por un terremoto y registradas en el par de estaciones sismográficas situadas en un mismo círculo máximo con el terremoto. La expresión final utilizada y que nos proporciona los coeficientes de atenuación en función de la frecuencia es la siguiente:

$$\gamma(\omega) = \frac{\ln \{ A_1(\omega, r_1) I_2(\omega) (\text{sen} \Delta_1)^{1/2} / A_2(\omega, r_2) I_1(\omega) (\text{sen} \Delta_2)^{1/2} \}}{r_2 - r_1} \quad (4)$$

donde  $A_2$  y  $A_1$  son las amplitudes registradas en las estaciones situadas a mayor y menor distancia.  $I_2$  e  $I_1$  son las correspondientes respuestas instrumentales.  $r_2$  y  $r_1$  son las distancias epicentrales hasta las estaciones situadas a mayor y menor distancia y las funciones seno presentes son los factores de distribución geométrica de la energía para ambas estaciones.

Una vez calculados los coeficientes de atenuación  $\gamma(\omega)$  utilizando la expresión 4, hemos efectuado su posterior regionalización. Ésta se ha llevado a cabo por medio de la expresión siguiente:

$$\gamma(\omega)r = \sum_{i=1}^n \gamma_i(\omega)r_i \quad (5)$$

donde  $r$  y  $r_i$  son las distancias total y regionalizadas para cada una de las trayectorias estudiadas.  $\gamma_i(\omega)$  son los coeficientes de atenuación regionalizados.

Los coeficientes de atenuación regionalizados de las ondas de Rayleigh se muestran en la figura 5. De la simple observación de esta figura puede concluirse que existe una relación entre los coeficientes de atenuación y la edad del suelo oceánico del Pacífico, siendo éstos más altos al decrecer la edad de la litosfera oceánica.

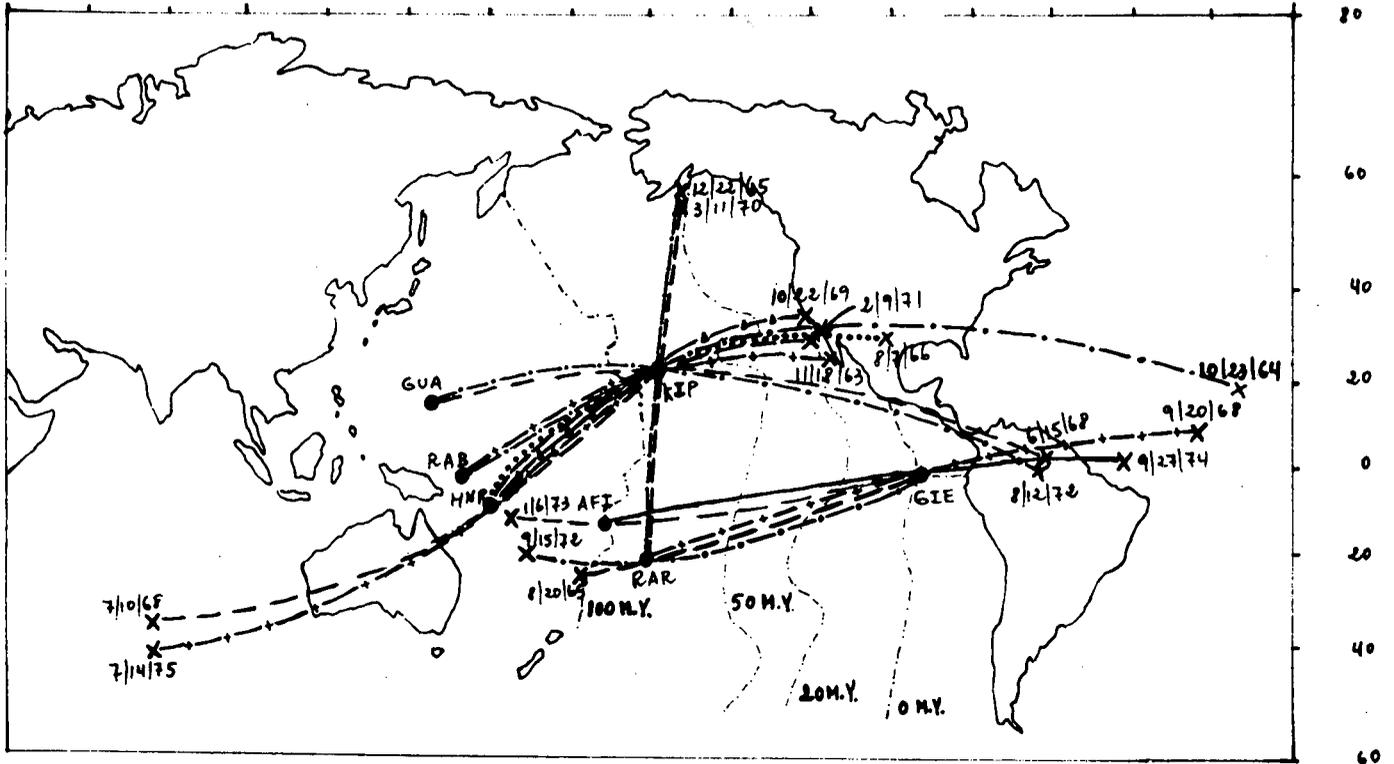


Fig. 1. Trayectorias de las ondas Rayleigh en su propagación entre epicentros y pares de estaciones sismográficas situadas en un mismo círculo máximo.

**FACTORES ESPECÍFICOS DE CALIDAD Q**

Los factores específicos de calidad de las ondas de Rayleigh  $Q_R$  y de las ondas de Love  $Q_L$  en función del periodo han sido obtenidos utilizando la expresión final:

$$Q(\omega) = \pi/\gamma(\omega) U(\omega)T \tag{6}$$

donde  $\gamma(\omega)$  y  $U(\omega)$  son los coeficientes de atenuación y velocidades de grupo correspondientes a la frecuencia  $\omega$  (o periodo T).

La regionalización posterior de los factores de calidad específicos de las ondas de Rayleigh  $Q_R$  se efectúa utilizando la ecuación 6, teniendo en cuenta que en esta ecuación se introducen sólo los valores regionalizados de los coeficientes de atenuación y velocidades de grupo. En la figura 6 se muestran los coeficientes de atenuación regionalizados obtenidos para las ondas de Rayleigh. Puede observarse que los valores de  $Q_R$  crecen al aumentar la edad del suelo oceánico, lo cual indica también en este caso que la atenuación en las zonas más modernas del Océano Pacífico es mayor que en las más antiguas. Puede deducirse de aquí que las zonas litosféricas y las zonas de baja velocidad para

las distintas regiones deben tener diferencias esenciales para las velocidades de las ondas P y S y espesores correspondientes.

**INVERSIÓN DE LAS VELOCIDADES Y DE LOS COEFICIENTES DE ATENUACIÓN DE LAS ONDAS SUPERFICIALES**

Para efectuar la inversión de los resultados obtenidos se han adecuado los modelos de Tierra obtenidos por Leeds et al. (1974) y los de Yu (1978) a nuestras observaciones. Dicha adecuación se ha llevado a cabo utilizando un programa de cálculo numérico que ajusta los modelos iniciales a las observaciones obtenidas. Una vez obtenidos los modelos finales de Tierra se procede siguiendo el método de inversión estocástica desarrollado por Der et al. (1970), Franklin (1970) y Jordan y Franklin (1971) a obtener la fricción interna de las ondas de cizalla  $Q_p^{-1}$ . La obtención de estos valores se efectúa mediante un programa de cálculo numérico que resuelve la expresión final:

$$[\Delta P'] = [W][A']^T \{ [A'] [W][A']^T + [S] \}^{-1} [\Delta C'] \tag{7}$$

donde  $[\Delta P']$  representan los valores  $Q_p^{-1}$  a determinar.

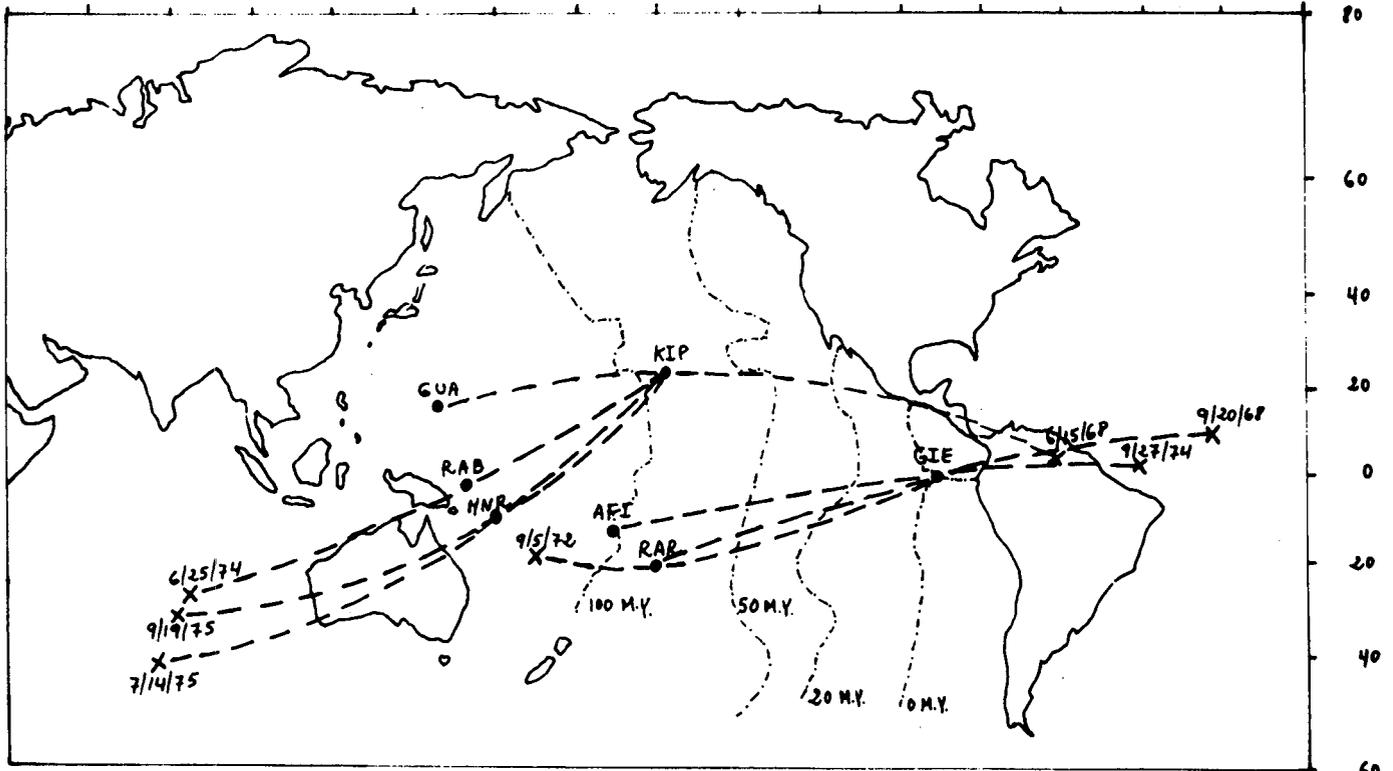


Fig. 2. Trayectorias de las ondas Love en su propagación entre epicentros y pares de estaciones sismográficas situadas en un mismo círculo máximo.

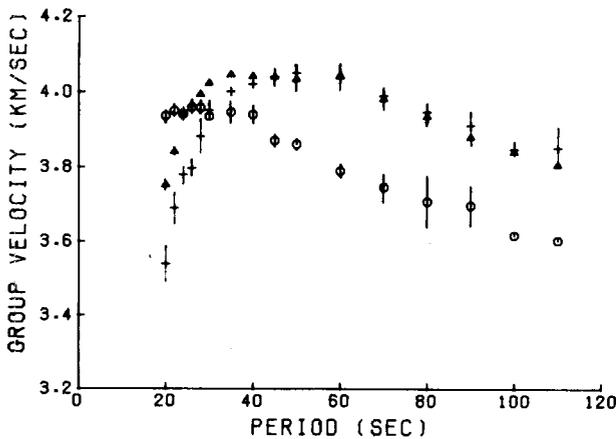


Fig. 3. Regionalización de las velocidades de grupo de las ondas Rayleigh. Los círculos representan las observaciones para la región 0-50 M.a., los triángulos la región 50-100 M.a. y las cruces la región de edad superior a los 100 M.a. Las barras verticales indican desviaciones típicas.

[W] es la matriz-covarianza de los parámetros de las capas en que se divide el modelo de Tierra. [S] es la matriz-covarianza de las observaciones. [A'] es la matriz de derivadas parciales de las velocidades respecto a los parámetros de cada capa.  $[\Delta C']$  es la matriz-diferencia entre los valores observados y los valores correspondientes al modelo de Tierra utilizado, los exponentes T y -1 matriz traspuesta y matriz inversa respectivamente.

Los mejores modelos de  $Q_{\beta}^{-1}$  vendrán determinados por aquellos que presenten mejor resolución y menor desviación típica. La matriz resolución y las desviaciones típicas vienen dadas por Wiggins (1972) utilizando una transformación dada por Lanczos (1961). El programa de computación utilizado calcula también las resoluciones y desviaciones típicas expuestas.

La figura 7 muestra los modelos regionalizados de  $Q_{\beta}^{-1}$  obtenidos, la figura 8 muestra los modelos promedio obtenidos utilizando las observaciones obtenidas de las ondas de Rayleigh-Love, Rayleigh y Love respectivamente. Las figuras 9 y 10 muestran las resoluciones de los modelos y finalmente la figura 11 muestra la relación existente entre la edad de la litosfera, límites inferiores de ésta, límites superiores de la astenosfera y los valores máximos de  $Q_{\beta}^{-1}$  correspondientes.

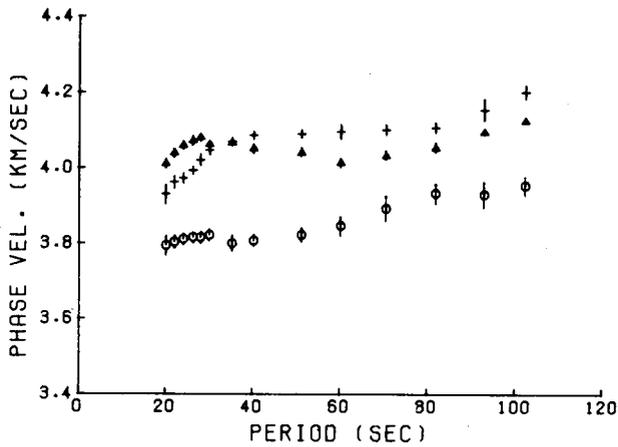


Fig. 4. Regionalización de las velocidades de fase de las ondas Rayleigh. Para el significado de los símbolos véase el pie de la Figura 3.

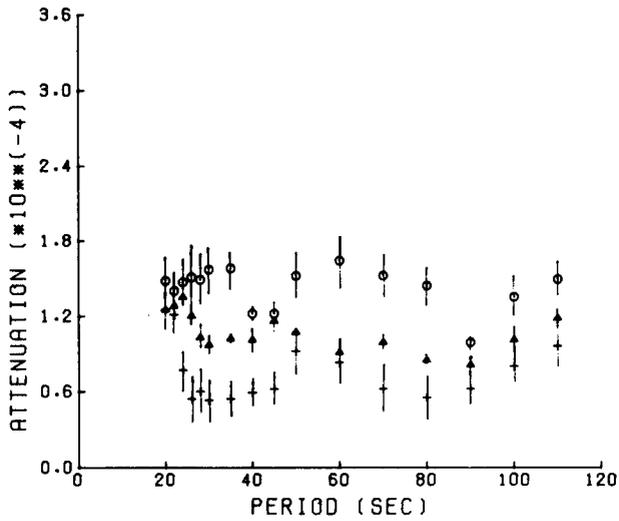


Fig. 5. Regionalización de los coeficientes de atenuación de las ondas Rayleigh. Para el significado de los símbolos véase el pie de la Figura 3.

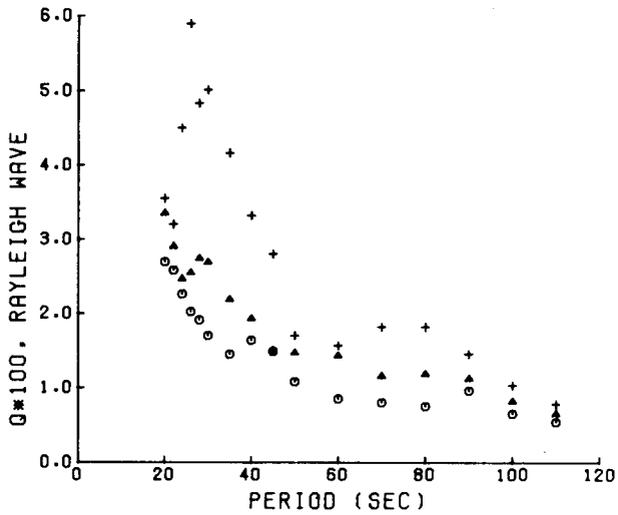


Fig. 6. Regionalización de los factores específicos de calidad  $Q_R$  de las ondas Rayleigh. Para el significado de los símbolos véase el pie de la Figura 3.

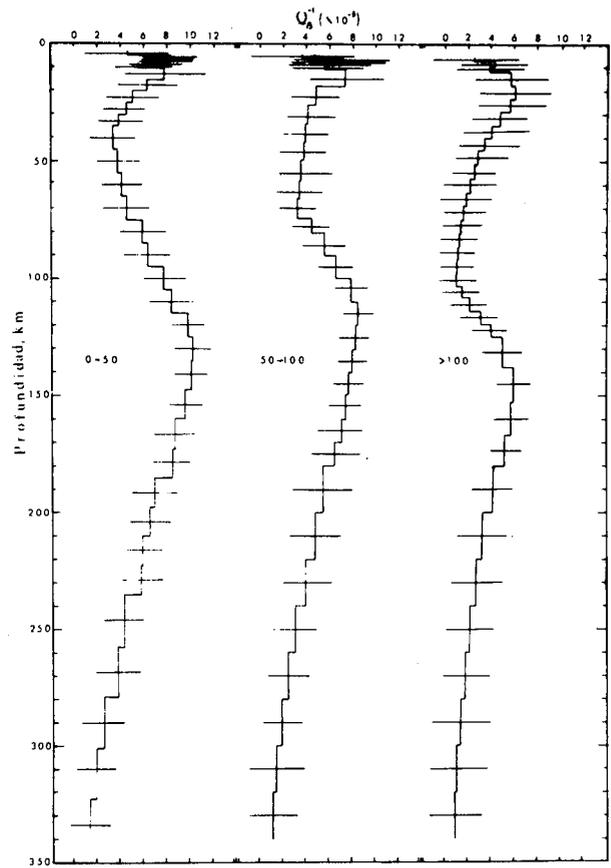


Fig. 7. Modelos regionalizados de  $Q_{\beta}^{-1}$  para el Océano Pacífico. Las barras horizontales indican desviaciones típicas.

Los modelos obtenidos para las regiones 0-50, 50-100 y 100->100 M.a. muestran las siguientes características: alrededor de los 45, 75 y 105 km para dichas regiones respectivamente, el valor de la curva  $Q_{\beta}^{-1}$  en función de la profundidad empieza a incrementar hasta valores máximos de alrededor de  $10 \times 10^{-3}$ ,  $8 \times 10^{-3}$  y  $6 \times 10^{-3}$  respectivamente. Este hecho indica también que la atenuación es mayor cuanto más moderna es la edad de la litosfera oceánica. Un hecho importante en los tres modelos es que el comienzo de la zona en que la atenuación incrementa hasta los valores anteriormente citados da una idea clara del límite superior de la capa de baja velocidad (astenosfera), incrementando la profundidad el límite superior de ésta al incrementar la edad litosférica. Asimismo puede observarse que el espesor de la zona en que la atenuación es mayor, decrece al incrementar la edad debido al aumento de profundidad del límite inferior de la litosfera. Observemos también que entre las profundidades de 250 y 300 km los valores de  $Q_{\beta}^{-1}$  para las tres regiones poseen prácticamente el mismo valor que tenían al empezar a decrecer. Aceptando como límite inferior de la astenosfera, para las tres regiones consideradas, la profundidad dada por el valor en que  $Q_{\beta}^{-1}$

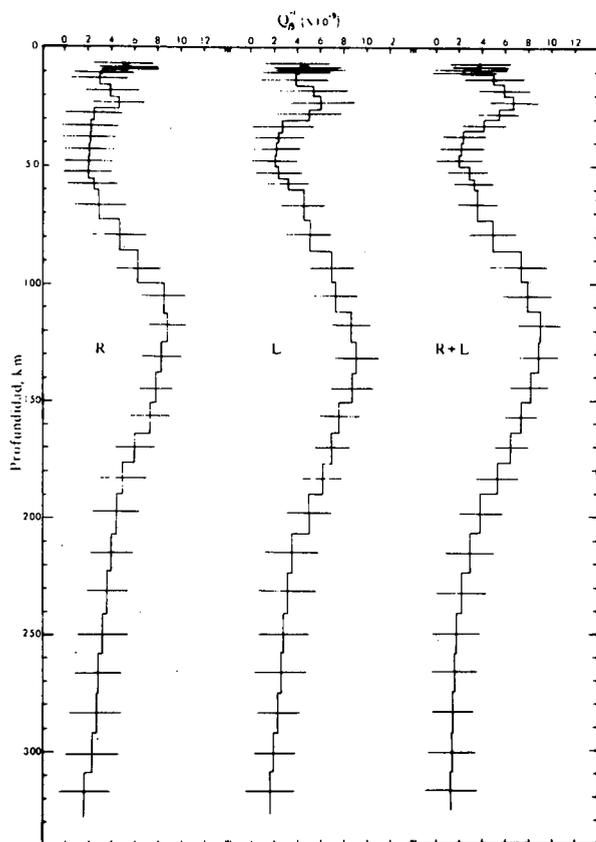


Fig. 8. Modelos promedio de  $Q^{-1}$  para el Océano Pacífico. Las barras horizontales indican desviaciones típicas.

decrece en forma más suave, éste viene dado para las tres regiones alrededor de los 180 km.

Los modelos promedio obtenidos para todo el Océano Pacífico resultantes de las inversiones de las observaciones de las ondas de Rayleigh-Love, Rayleigh y Love respectivamente sitúan el límite inferior de la litosfera (o límite superior de la astenosfera) alrededor de los 60 km, quedando situado el límite inferior de la astenosfera también alrededor de los 180 km. Este modelo se muestra consistente con los modelos regionalizados obtenidos.

## CONCLUSIONES

La regionalización de las velocidades de grupo y de fase de las ondas de Rayleigh para las regiones 0-50, 50-100 y 100->100 M.a. y para el rango de períodos de 20 a 110 segundos muestran en general que las velocidades incrementan al incrementar la edad de la litosfera oceánica.

La regionalización de los coeficientes de atenuación de las ondas de Rayleigh para las tres regiones estudiadas muestra que los coeficientes de atenuación incrementan al decrecer la edad de la litosfera oceánica. Este hecho indica

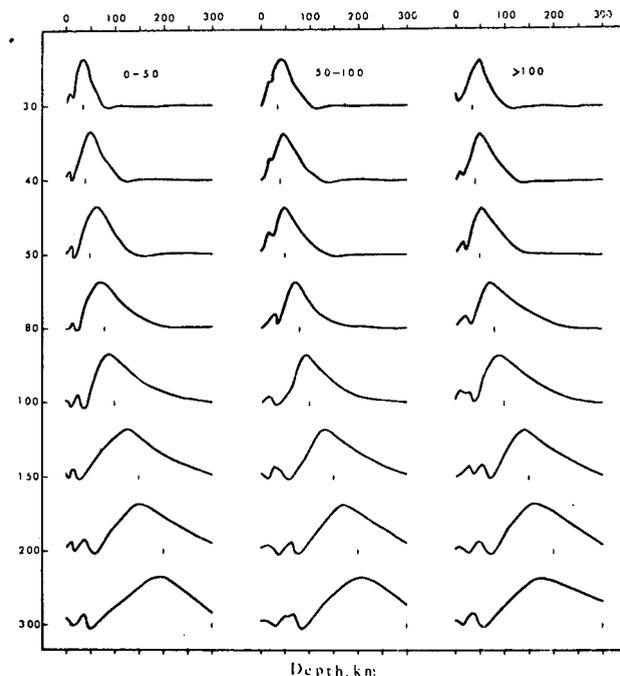


Fig. 9. Funciones de resolución de los modelos regionalizados de  $Q$ .

que la energía transportada por las ondas sísmicas se atenúa más cuando las ondas viajan por zonas más modernas.

La regionalización de los factores específicos de calidad  $Q_R$  de las ondas de Rayleigh indica que éstos son menores al decrecer la edad de la litosfera oceánica. Este hecho indica claramente que también los factores específicos de calidad son una función dependiente de la edad de la litosfera. Este resultado concuerda con el obtenido para los coeficientes de atenuación.

La regionalización de la fricción interna de las ondas de cizalla  $Q_\beta^{-1}$  deducida a la inversión simultánea de los coeficientes de atenuación y velocidades de grupo y de fase de las ondas de Rayleigh muestran los siguientes hechos:

- La atenuación de la energía transportada por las ondas sísmicas es mayor al decrecer la edad de la litosfera.
- La litosfera del Pacífico aumenta su espesor al incrementarse su edad, o el límite superior de la astenosfera se halla a mayor profundidad al incrementarse la edad de la litosfera.
- El límite inferior de la astenosfera parece ser aproximadamente constante.
- El límite superior de la astenosfera para la región 0-50 M.a. es de unos 45 km, 75 km para la región 50-100

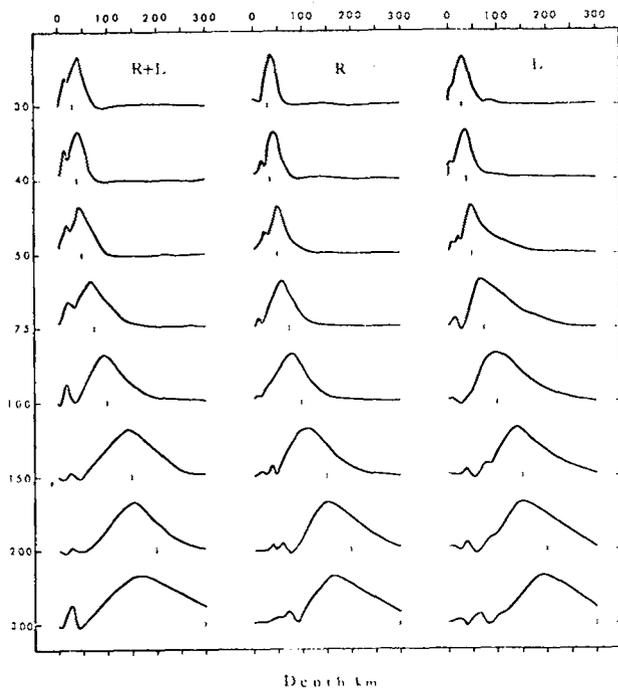


Fig. 10. Funciones de resolución de los modelos promedio de  $Q_{\beta}^{-1}$ .

M.a. y de unos 105 km para la región 100->100 M.a., quedando el límite inferior para las tres regiones situado alrededor de los 180 km.

e) De los 180 km hasta alrededor de los 300 km, los valores de  $Q_{\beta}^{-1}$  decrecen suavemente, pudiendo hallarse situada entre estas profundidades el llamado subcanal de baja velocidad (o zona de moderada atenuación del manto superior).

Los modelos promedio del Océano Pacífico obtenidos de la inversión de los coeficientes de atenuación y de las velocidades de las ondas de Rayleigh; de los coeficientes de atenuación y de las velocidades de las ondas de Love y de los correspondientes a las ondas de Rayleigh y de Love simultáneamente son aproximadamente iguales, situando el límite inferior de la litosfera (o límite superior de la astenosfera) entre los 55 y 60 km con un subcanal de baja velocidad extendiéndose hasta una profundidad alrededor de los 300 km. Los resultados obtenidos para estos modelos promedio se muestran consistentes con los regionalizados.

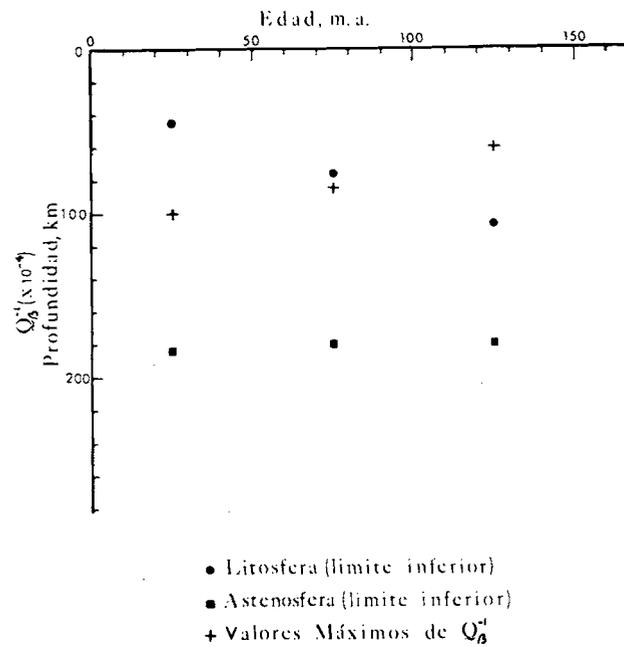


Fig. 11. Espesores de la Litosfera y Astenosfera y valores máximos de  $Q_{\beta}^{-1}$  en función de la edad del suelo Oceánico del Pacífico.

#### BIBLIOGRAFÍA

- DER, Z. A., R. MASSE and M. LANDISMAN (1970). Effects of observational errors on the resolution of surface waves at intermediate distances. *J. Geophys. Res.*, 75, 3399-3409.
- FRANKLIN, J. N. (1970). Well-posed stochastic extension of ill-posed linear problems. *J. Math. Analysis Applic.*, 31, 682-716.
- JORDAN, T. H. and J. N. FRANKLIN (1971). Optimal solutions to a linear inverse problem in Geophysics. *Proc. Nat. Acad. Sci. Am.*, 68, 291-293.
- LANCZOS, A. R., L. KNOPOFF and E. G. KAUSEL (1974). Variations of upper mantle structure under the Pacific Ocean. *Science*, 186, 141-143.
- LANCZOS, C. (1961). *Linear Differential Operators*. Van Nostrand Co., London.
- LEEDS, A. R., KNOPOFF and E. G. KAUSEL (1974). Variations of upper mantle structure under the Pacific Ocean. *Science*, 186, 141-143.
- WIGGINS, R. A. (1972). The general inverse problem: Implication of surface waves and free oscillations of Earth structure. *Rev. Geophys. Space Sci.*, 10, 251-285.
- YU, G. K. (1978). Regionalized Pacific Crust and Upper Mantle Structure inferred from Surface Wave Phase and Group Velocity Inversion. Ph. D. Dissertation, Saint Louis University.

Recibido, 21 marzo, 1979