

DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE VELOCIDAD COMPRESIONAL A PARTIR DE LA DISPERSIÓN DE ONDAS Rg DE MUY CORTO PERÍODO

NAVARRO BERNAL, M.*; CORCHETE FERNÁNDEZ, V.*; BADAL NICOLÁS, J.I.**; VIDAL SÁNCHEZ, F.***; CANAS TORRES, J.A.**** y PUYADES BENEIT, L.****

* Departamento de Física Aplicada, Universidad de Almería

** Departamento de Física Teórica-Geofísica, Universidad de Zaragoza,

*** Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada

**** E.T.S. d'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya

RESUMEN

Las velocidades de grupo de las ondas Rayleigh de muy corto período son sensibles a las variaciones en la estructura de velocidad de las capas más superficiales de la corteza. En este estudio analizamos la dispersión de las ondas Rg generadas por explosiones locales que fueron registradas por la red sísmica de Almería. Hemos determinado la velocidad de grupo del modo fundamental y hemos regionalizado las velocidades observadas. El intervalo de períodos considerados es de 1-2 s, y la profundidad de penetración se encuentra entre 0 y 2 km de acuerdo con la relación de Knopoff. La estructura regional de velocidad de cizalla se ha obtenido por inversión lineal de las velocidades anteriores. Esto nos ha permitido obtener modelos de tierra regionales a partir de los cuales hemos estimado valores de velocidad compresional haciendo uso del cociente de Poisson $V_p/V_s = 1.73$. En Sierra Filabres, los valores que resultan fluctúan entre 3.5 km/s cerca de la superficie y 4.9 km/s a 2 km de profundidad. Sin embargo, en la cuenca del río Andarax, se deducen valores entre 2.6 y 4.3 km/s para el mismo intervalo de profundidad.

Palabras Clave: Ondas Reyleigh, dispersión, inversión, estructuras superficiales.

ABSTRACT

The group velocity of very short-period Rayleigh waves is sensitive to variations in the velocity structure of the top most crustal layers. In this study we analyze dispersed Rg waves generated by local blast which were recorder by the array of Almería. We have determined the group velocity of the fundamental mode and we have regionalized the observed velocities. Periods range between 1 and 2 s and the effective penetration depth or skin depth spans 0-2 km according to the relation of Knopoff. The regional shear-wave velocity structure has been obtained by linear inversion of the regionalized velocities. This has allowed us to obtain regional earth models from which we have estimated compressional velocity values using Poisson ratio $V_p/V_s = 1.73$. In Sierra Filabres the velocity results vary

between 3.5 km/s at surface and 4.9 km/s at a depth of 2 km. However, in the basin of the Andarax river velocity values from 2.6 to 4.3 km/s are deduced for the same depth interval.

Key words: Rayleigh wave, dispersion, inversion, shallow structure.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh de corto período, velocidad de fase y velocidad de grupo, y el cálculo de sus variaciones respecto de las velocidades de propagación de las ondas internas, V_p y V_s , así como de la densidad ρ , permiten, mediante un proceso de inversión, determinar un modelo de Tierra aproximado al modelo de Tierra real por el cual se han propagado, para rangos de profundidad entre 0 y 2 km, lo que supone un gran interés para la Geofísica, tanto en lo que se refiere a aspectos sísmológicos como a la localización de recursos naturales, ya que proporcionan información sobre las propiedades físicas de los materiales que la forman.

La determinación de los modelos elásticos de estructuras muy superficiales a partir de la inversión de los valores de dispersión de la velocidad de grupo de las ondas Rayleigh de corto período es una metodología que se utiliza muy recientemente en Sismología, y supone un método alternativo a las técnicas tradicionales de perfiles sísmicos, basadas unas en la reflexión y otras en la refracción de ondas sísmicas internas. Las ventajas del análisis de ondas Rg de corto período es que es un método muy barato si se usan los datos de redes permanentes ó de redes desplegadas temporalmente (p.e. análisis de microsismicidad), ya que sólo hay que seleccionar eventos superficiales (microterremotos o explosiones locales).

Las ondas Rg son un tipo particular de ondas superficiales originadas por fuentes explosivas y terremotos relativamente superficiales. Si el medio por el que se propagan las ondas es verticalmente heterogéneo, cada una de las componentes espectrales del tren de ondas tiene una velocidad característica según su período, de modo que las ondas con diferente período se separan en el curso de su propagación. Cada componente espectral porta información sobre las propiedades físicas del medio por el que se ha propagado y por tanto, el conocimiento de la dispersión de las ondas Rg producidas por un evento natural ó artificial es el paso previo para el modelado elástico de la estructura geológica por donde se propagan las ondas.

El estudio de la estructura de la corteza y manto superior de la Península Ibérica se ha realizado recientemente mediante la inversión de las velocidades de propagación de las ondas superficiales de largo período (Corchete et al., 1990; Badal et al. 1992 y Badal et al., 1993). Diferentes trabajos dentro y fuera de la Península Ibérica (Yao & Dorman, 1992; Kocaoglu & Long, 1993, Sarrate et al, 1993, y Navarro et al. 1993) han demostrado que las velocidades de grupo de muy corto período son sensibles a las variaciones en la estructura de velocidad de las capas más superficiales de la corteza.

En este trabajo mostramos que un detallado análisis de la dispersión de las ondas Rg de período entre 1 y 2 s permite obtener, a partir de un proceso de inversión de datos

sísmicos, la estructura superficial de la corteza para un rango de profundidad desde 0 a 2 km. Los eventos utilizados en este estudio corresponden a explosiones locales registradas por las estaciones de la Red Sísmica de Andalucía en Almería. Los eventos presentan una magnitud entre 1.8 y 2.4, y las distancias fuente-estación analizadas están comprendidas entre 10 y 50 km. La regionalización de los datos nos ha permitido poner de manifiesto la existencia de variaciones laterales de la estructura de velocidades del área de estudio, lo que sin duda tiene un gran significado tectónico. Esta técnica ha sido empleada anteriormente para ondas Rg registradas en período corto y analizadas en un rango de 0.5 a 2.0 s, detectándose variaciones laterales regionales de ondas Rayleigh en Illinois (Woods et al., 1989) y en Alabama (Kocaoglu & Long, 1993).

Hemos utilizado técnicas de filtrado digital que nos han permitido mejorar la relación señal-ruido (Corchete et al., 1989) y un método de inversión de velocidades de ondas sísmicas, basadas en el operador inverso estocástico (Badal, 1990). Hemos utilizado la técnica del filtrado múltiple (MFT) introducida por Dziewonski et al. (1969) que permite obtener los tiempos de grupo del tren de ondas Rg y un filtrado variable en el tiempo (TVF) introducido por Pilant & Knopoff (1964) desarrollado posteriormente por Cara (1973), que permite aislar el tren de ondas Rg a partir de una curva de dispersión dada.

Los modelos de velocidad compresional se han obtenido a partir de los modelos de velocidad de cizalla mediante la relación $V_p/V_s = 1.73$, ya que las ondas Rg son en general más sensibles a cambios en las constantes de cizalla que a otros parámetros estructurales (Bloch et al., 1969).

METODOLOGÍA

Análisis de dispersión

La curva de dispersión de la velocidad de grupo del modo fundamental de las ondas Rg se ha obtenido aplicando un filtro múltiple al sismograma real, una vez aplicado a éste un filtro variable en el tiempo.

La técnica del filtro múltiple (Dziewonski et al., 1969; Dziewonski et al., 1972; Dziewonski & Hales, 1972 y Herrmann, 1973) tiene como fundamento estudiar variaciones de amplitud de una señal sísmica como una función de la velocidad y del período usando un filtro gaussiano de anchura de banda relativa constante en el dominio de la frecuencia, y considera que el tiempo para el cual la amplitud de la señal sísmica filtrada mediante el filtro gaussiano centrado a una frecuencia ω_n alcanza su máximo, corresponde al tiempo de llegada del máximo de energía y por tanto al tiempo de grupo de la onda en la vecindad de dicha frecuencia. Una vez calculados los tiempos de grupo y conocida la distancia epicentral se determina la velocidad de grupo para cada período.

El filtrado variable en el tiempo permite obtener un tren de ondas de una señal compleja a partir de una curva de dispersión dada. La curva de dispersión implica que los armónicos integrantes de una función $f(t)$ interfieren constructivamente en la vecindad del tiempo de grupo. Fuera de este entorno se puede despreciar la contribución de las

componentes de Fourier al tren de ondas que se desea aislar. Entonces se puede resintetizar la señal asociada a la curva de dispersión dada sumando las componentes de Fourier truncadas en los límites superior e inferior del dominio de transmisión. La señal aislada es :

$$f(t) = \int_0^{\infty} F(f) W(t, f) e^{j2\pi ft} df$$

donde $W(t, f)$ es un filtro en dos dimensiones que es cero fuera del dominio de transmisión y de cuya elección depende la efectividad del filtrado en tiempo variable. Hwang y Mitchel (1986) proponen para $W(t, f)$ la ventana Tukey para señales con un espectro sin excesivos picos, mientras que para señales con un espectro con muchos picos proponen una ventana coseno.

Inversión de velocidades

En la obtención de los modelos de velocidad de cizalla a partir de las curvas de dispersión de velocidades de grupo del modo fundamental de las ondas Rayleigh se ha empleado una inversión estocástica, la cual nos proporciona en cada caso la solución particular del problema que mejor se ajusta a los datos observados. El problema de inversión se puede formular como:

$$(2) Y_D = AX_D + e$$

siendo $Y_D = Y - Y_0$ la diferencia entre los datos de velocidad de grupo observados y los correspondientes a un modelo inicial de partida, $X_D = X - X_0$ la diferencia entre el modelo final y el modelo inicial, e representa el vector residuo debido al error en los datos y A es el operador matricial formado por las derivadas parciales de la velocidad de fase y de la velocidad de grupo respecto de la velocidad de cizalla para cada período y para cada capa del modelo, y se computarán aplicando el procedimiento de Rodi et al. (1975). Una solución del problema (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) es:

$$X_D = (A^T A + L\mu I)^{-1} \cdot A^T \cdot Y_D$$

donde I es la matriz identidad y μ es una cantidad que es preciso ajustar a las peculiaridades de cada problema. La solución (3) se puede obtener mediante un proceso iterativo, adaptando el modelo inicial en cada iteración. La estima del vector residuo en cada paso haciendo que converja hacia un mínimo satisfactorio, determinará la toma de decisiones en cada caso.

Regionalización de velocidades

Debido a las posibles variaciones laterales en la estructura de velocidad a lo largo de un trayecto fuente-estación, la curva de dispersión observada representa el promedio de las propiedades de dispersión en dicho trayecto. Esto nos obliga a dividir la región que contiene los trayectos de ondas Rg en n subregiones, en las cuales se asume que la estructura de velocidad es lateralmente homogénea, y determinar su aportación a la dispersión.

Para una frecuencia dada, f , el tiempo de grupo de propagación de las ondas Rayleigh observadas es (Kocaoglu & Long, 1993):

$$T_i (f) = \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{U_j} (f)$$

donde m es el número de trayectos de propagación de ondas Rg, d_{ij} es la distancia recorrida en las j subregiones a lo largo del trayecto i y $U_j(f)$ es la velocidad de grupo de la subregión j .

Si el número de trayectos es mayor que el número de subregiones, ($m > n$), una solución del problema se puede obtener a partir de los mínimos cuadrados, minimizando el cuadrado de la magnitud del residuo:

$$\sum_{i=1}^m [t_i (f) - \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{U_j (f)}]^2$$

Para regionalizar la zona de estudio y decidir la separación de las diferentes subregiones nos hemos basado en el conocimiento geológico existente de la región (Montenat et al., 1990 y Ott d'Estevou & Montenat, 1990), recurriendo posteriormente a criterios estadísticos que permitan establecer la capacidad de los datos para separar las características regionales y poder elegir la mejor representación.

DATOS

En la realización de este estudio hemos utilizado las trazas digitales correspondientes a 15 explosiones locales (tabla 1) detectadas por la red sísmica de Andalucía en Almería con magnitudes entre 1.8 y 2.5 y registradas en 6 estaciones sísmicas. Los eventos han sido agrupados en 3 fuentes sísmicas siguiendo unos criterios de mínimos (Navarro et al., 1993), lo que nos ha permitido estudiar 10 trayectos fuente-estación (tabla 2) con distancias comprendidas entre 10 y 57 km, y cuya distribución en el área de estudio se puede ver en la figura 1. La figura 2 muestra un ejemplo de una de las trazas utilizadas en este estudio correspondiente a una explosión registrada por la estación de ECH situada en sierra Alhamilla, y en donde se puede observar la calidad de los datos empleados.

Evento N	Fecha			Tiempo origen			Profundida Mag focal		Epicentro	
	Año	Mes	Día	h-	min	seg			Lat(N)	Long(W)
1	1991	06	26	11-	10-	51.45	0.1	1.9	37.30	2.29
2	1991	06	27	16-	32-	46.81	0.1	2.1	37.27	2.30
3	1991	07	02	19-	56-	22.34	0.1	2.5	37.28	2.33
4	1991	07	09	17-	01-	25.80	0.1	2.3	37.29	2.31
5	1991	07	08	16-	23-	43.77	0.1	1.9	37.26	2.32
6	1991	07	10	10-	49-	47.55	0.9	2.4	36.90	2.51
7	1991	07	12	16-	51-	11.84	0.1	2.3	37.29	2.30
8	1991	07	23	10-	01-	09.16	0.1	2.2	36.90	2.51
9	1991	07	24	05-	09-	28.37	0.1	1.9	37.27	2.31
10	1991	08	02	09-	24-	14.77	0.1	2.2	36.89	2.51
11	1991	08	13	09-	20-	57.48	0.0	2.1	36.90	2.51
12	1991	08	20	11-	15-	38.34	0.1	2.3	37.28	2.33
13	1991	08	28	17-	19-	02.14	0.1	1.8	37.28	2.32
14	1991	09	06	12-	34-	27.19	0.1	2.4	37.26	2.32
15	1991	09	20	17-	13-	36.92	0.1	2.2	37.27	2.33

TABLA 1.- Relación de eventos seleccionados con un tren de ondas superficiales tiempo Rayleigh

RESULTADOS DE DISPERSIÓN

Los valores de velocidad de grupo obtenidos en los diferentes trayectos analizados (Navarro, 1994) están comprendidos entre 1.12 y 2.30 km/s para un rango de períodos entre 0.3 y 4.17 s, siendo para cada caso la curva de dispersión diferente. Las curvas de dispersión analizadas presentan rangos de períodos diferentes, observándose que presentan respecto de las estaciones ECH, ALB, SGD y ENX un rango común entre 1 y 2 s, lo que nos ha permitido regionalizar los datos de 8 trayectos para dicho rango de períodos y obtener las curvas de dispersión regionalizadas de la subregiones: sierra de Filabres, cuenca de Tabernas-Sorbas, cuenca del Andarax y sierra de Gádor.

Trayecto	Eventos	Fuente-Estación	Distancia
1	6,8,10,12	S1 - ECH	15.227
2	8,10,12	S1 - SGD	26.005
3	8,10,12	S1 - ENX	9.850
4	8	S1 - ALB	18.519
5	2,7,13	S2 - ECH	35.643
6	2	S2 - ISI	48.997
7	2,14,15	S3 - ECH	28.487
8	1,12,14	S3 - ALB	31.391
9	2,12,14	S3 - SGD	57.270
10	4,5,7,9,12	S3 - CLR	22.413

TABLA 2.- Trayectos fuente-estación analizados.

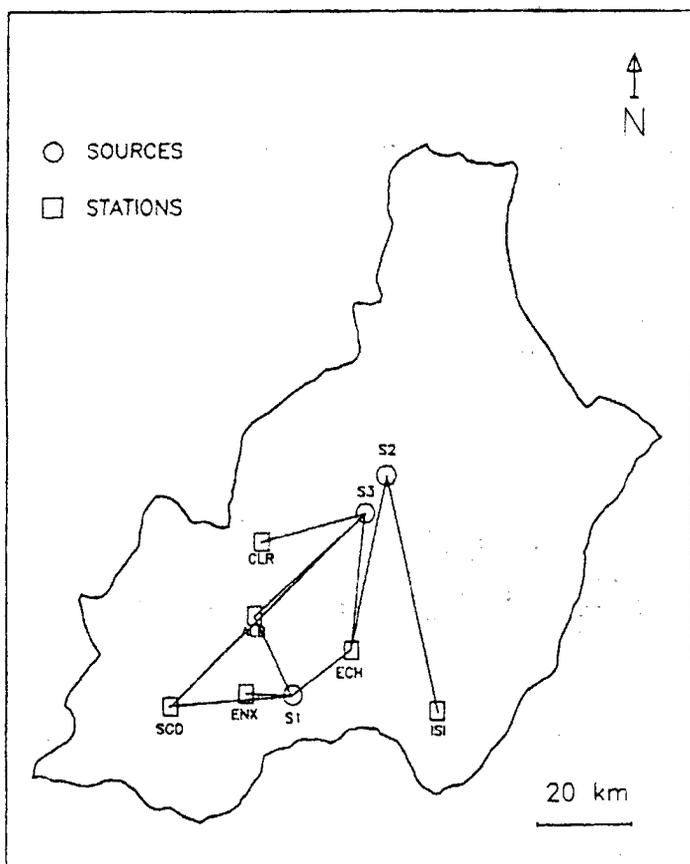


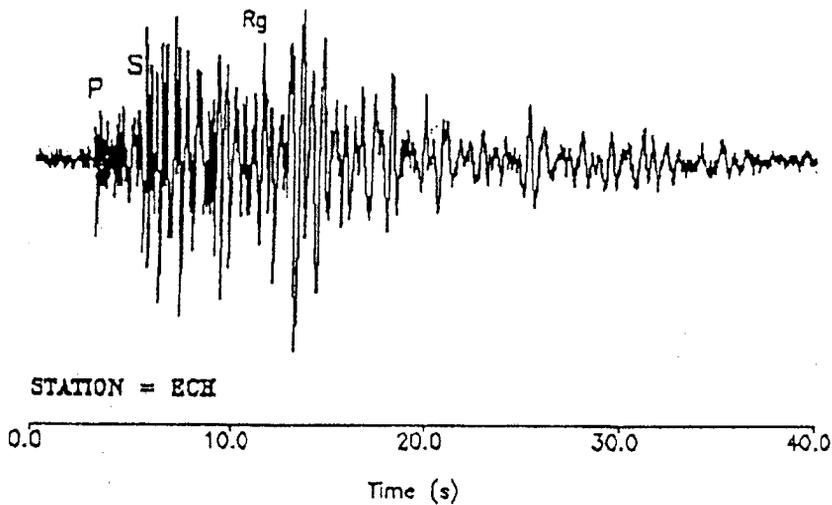
FIG. 1.- Distribución espacial de los trayectos analizados. Los círculos representan fuentes seleccionadas y los cuadrados las estaciones empleadas.

La figura 3-a presenta la curva de dispersión de la Sierra de Filabres. Esta región presenta los valores más altos de velocidad de grupo, comprendidos entre 1.93 km/s y 2.25 km/s con una desviación estándar entre 0.03 y 0.04. La figura 3-b presenta la curva de dispersión de la Cuenca de Tabernas-Sorbas, siendo los valores de la velocidad de grupo desde 1.72 km/s hasta 1.84 km/s con una desviación estándar entre 0.04 y 0.06. La cuenca del Andarax (figura 3-c) presenta los valores de dispersión de la velocidad de grupo más pequeños, comprendidos entre 1.35 km/s y 1.68 km/s, con una desviación estándar entre 0.03 y 0.10. Por último, la figura 3-d muestra la curva de dispersión de Sierra de Gádor, con valores de la velocidad de grupo desde 1.82 km/s hasta 1.92 km/

s y una desviación estándar entre 0.02 y 0.04. Por lo general, los valores de la velocidad de grupo aumentan con en el periodo excepto en la región de Sierra de Gádor, donde los valores de velocidad decrecen entre 1.5 y 2 s, lo que pone de manifiesto que la energía se propaga más lentamente con la profundidad para este rango.

MODELOS DE VELOCIDAD COMPRESIONAL

La inversión de las curvas de dispersión regionalizadas ha permitido obtener los modelos de velocidad de cizalla regionalizados, y teniendo en cuenta la relación $V_p = 1.73 V_s$ hemos determinado los modelos de velocidad compresional regionales. Hemos utilizado un modelo de capas plano-paralelas formado por 14 capas, 10 de las cuales presentan un espesor de 0.1 km y 4 capas de 0.25 km.



FECHA	HORA	LATITUD	LONGITUD	PROF	MAG	DISTANCIA
91/08/12	9:20:57.48	36.904	-2.510	0.0	2.1	15.29

FIG. 2.- Ejemplo de simograma correspondiente a uno de los ejemplos utilizados en este trabajo de magnitud 2.1 y distancia epicentral 15,29 km registrado por la estación ECH.

Sierra de Filabres (Figura 4-a) presenta los valores de velocidad compresional más altos, con valores comprendidos entre 3.70 km/s y 5.01 km/s con una desviación estándar desde 0.05 a 0.14, para un rango de profundidad entre 0 y 2 km, aumentando los valores con la profundidad, lo que interpretamos como que dicha región presenta una estructura más rígida y que dicha rigidez aumenta con la profundidad. La figura 4-b presenta el modelo de velocidad compresional para la cuenca de Tabernas-Sorbas. Los valores de velocidad están comprendidos entre 1.92 km/s y 2.38 km/s para un rango de profundidad entre 0 y 2 km, con una desviación estándar entre 0.04 y 0.16. Los resultados muestran una distribución de materiales con una rigidez parecida entre 0 y 0.5 km, posteriormente aumentan su rigidez hasta 1 km para posteriormente estabilizarse entre 1 y 2 km de profundidad. La cuenca del río Andarax presenta los valores más bajos de velocidad compresional (Figura 4-c), con valores comprendidos entre 1.56 km/s y 2.55 km/s con una desviación estándar entre 0.04 y 0.14 para el mismo rango de profundidad. Existe un canal de baja velocidad entre 0.2 y 0.5 km, debido probablemente a la existencia de niveles friáticos en ése rango de profundidad. A partir de 0.5 km la estructura aumenta en rigidez con la profundidad. Los valores de velocidad compresional para Sierra de Gádor (Figura 4-d) están comprendidos entre 3.23 km/s y 4.26 km/s para un rango de profundidad entre 0 y 2 km, con una desviación estándar desde 0.04 hasta 0.16. La estructura que caracteriza a esta región presenta cierta homogeneidad entre 0 y 5 km, aumenta la velocidad entre 0.5 y 1.25 km y disminuye hasta 2 km.

Con el fin de comprobar la fiabilidad de los resultados obtenidos, hemos calculado los núcleos de resolución para cada uno de los modelos obtenidos a diferentes profundidades de referencia. Una buena resolución del problema exige que el máximo absoluto para cada profundidad aparezca claramente diferenciado de otros posibles máximos relativos. Las figuras 5a, 5b, 5c, y 5d muestran los núcleos de resolución de los modelos de velocidad compresional de Sierra de Filabres, cuenca de Tabernas-Sorbas, cuenca del Andarax y Sierra de Gádor respectivamente para diferentes profundidades. La concordancia entre el máximo absoluto y el parámetro de la profundidad deseada nos indica que el grado de aproximación entre el modelo de Tierra calculado y el modelo de Tierra real es óptimo.

Los resultados obtenidos en los modelos de velocidad compresional para las diferentes regiones analizadas indican que existen fuertes variaciones laterales de las propiedades físicas de los materiales en superficie y en profundidad, para este rango de profundidad. Esto nos permite afirmar que la región estudiada es vertical y lateralmente heterogénea. Las figuras 6a y 6b presentan la distribución de velocidades regionales V_p para las profundidades de referencia 0.1 y 0.5 km respectivamente, dando una visión 3D de la estructura de la región estudiada, observándose una variación lateral de la velocidad, que discrimina una subregión de otra.

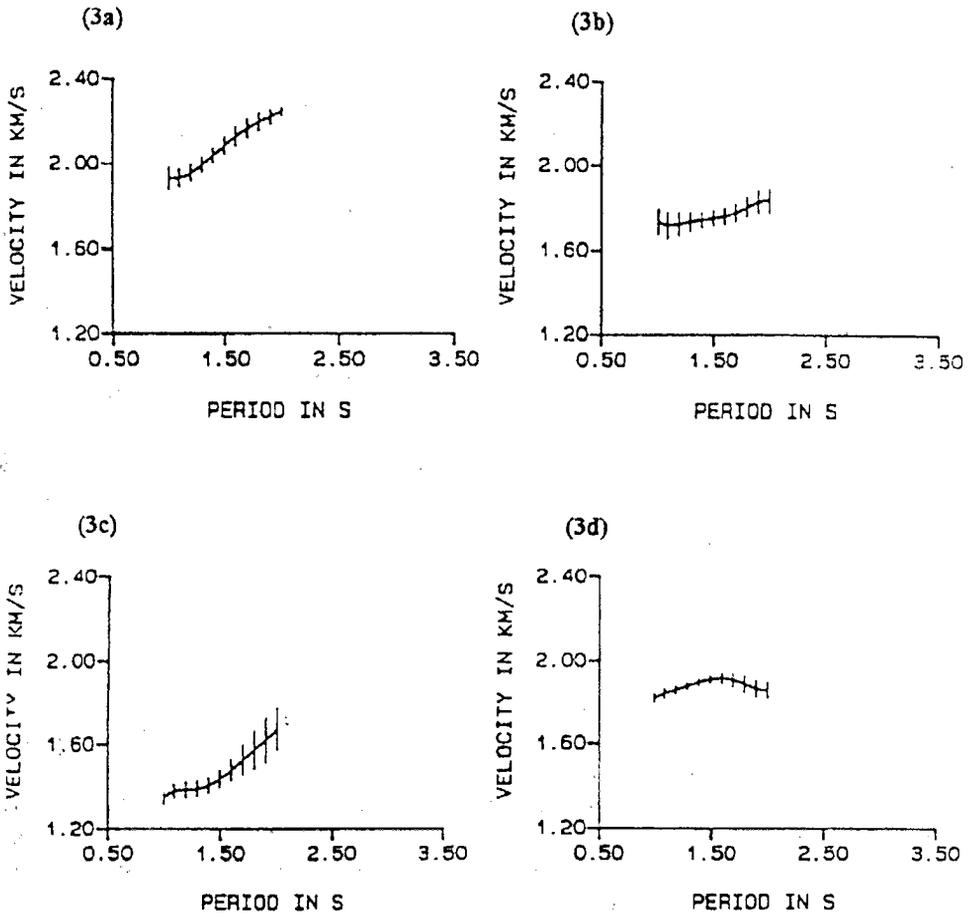


FIG. 3.- Curvas de dispersión de la velocidad de grupo de ondas R_g .
 Las barras representan las desviaciones estándar de los datos.
 La curva continua representa el ajuste teórico a los datos obtenidos.

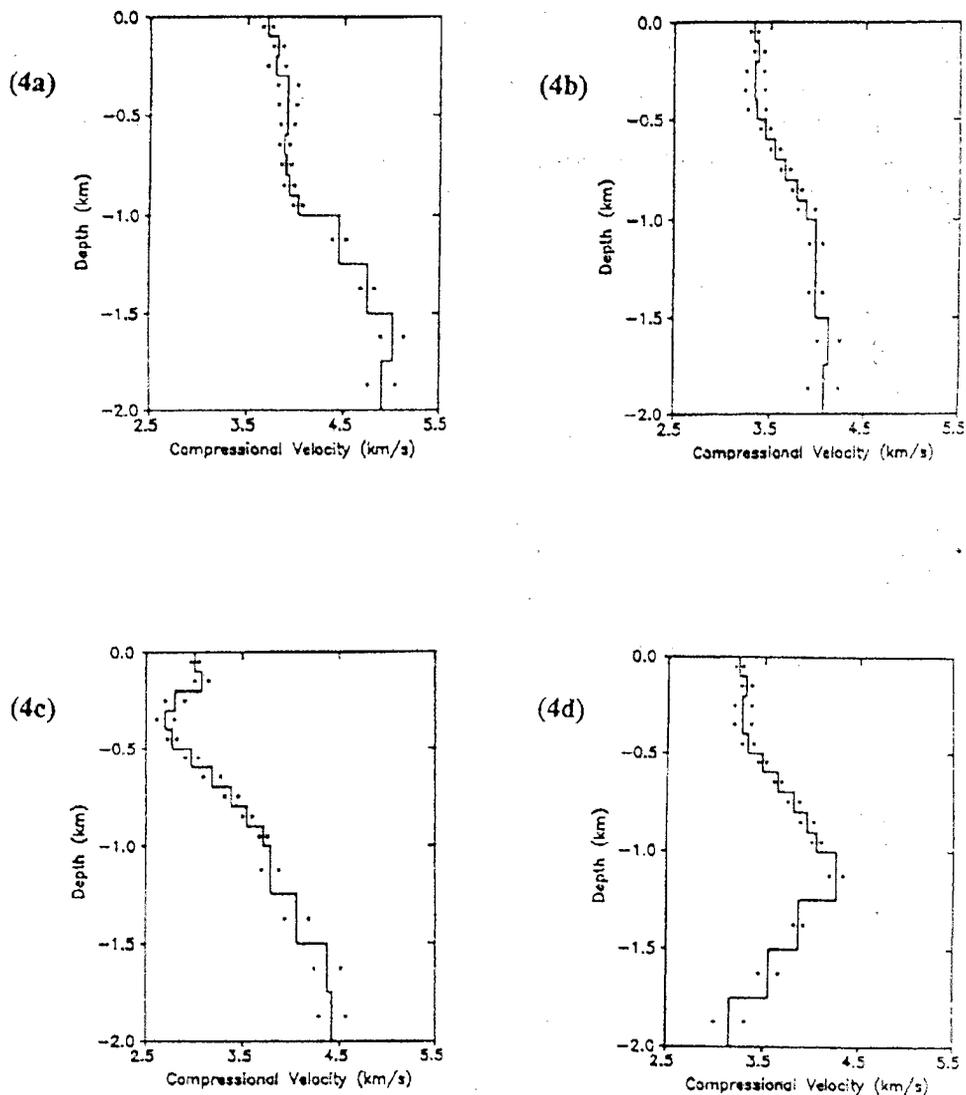


FIG. 4.- Modelos de velocidad compresional obtenidos para las diferentes regiones analizadas.

CONCLUSIONES

A pesar de la complejidad tectónica del área estudiada, los resultados obtenidos confirman que la inversión de los valores de dispersión de las velocidades de grupo del modo fundamental de ondas Rg de corto período, es una buena metodología para el estudio de las propiedades físicas de las estructuras muy superficiales de la corteza. La técnica de filtrado múltiple utilizada con señales de período corto dispersadas, proporciona buenos datos de dispersión y la técnica de filtrado variable en el tiempo es efectiva en el tratamiento de señales de corto período para evitar las distorsiones debidas a períodos muy cortos y sobre todo a las interferencias producidas por contaminación de fases y contaminación modal.

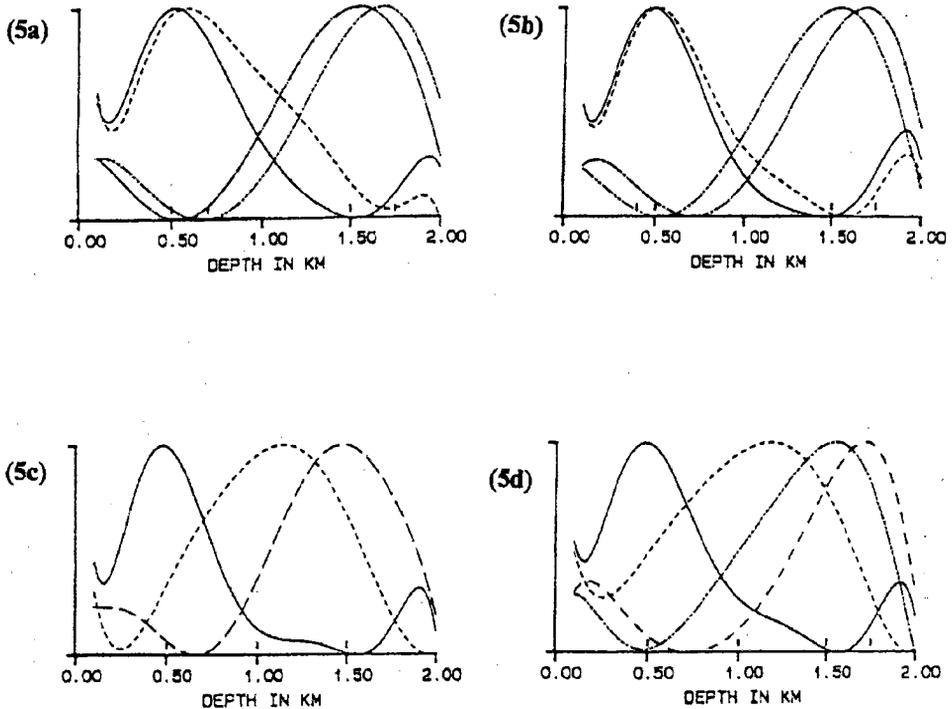


FIG. 5.- Núcleos de resolución del modelo de velocidad compresional para diferentes profundidades de referencia.

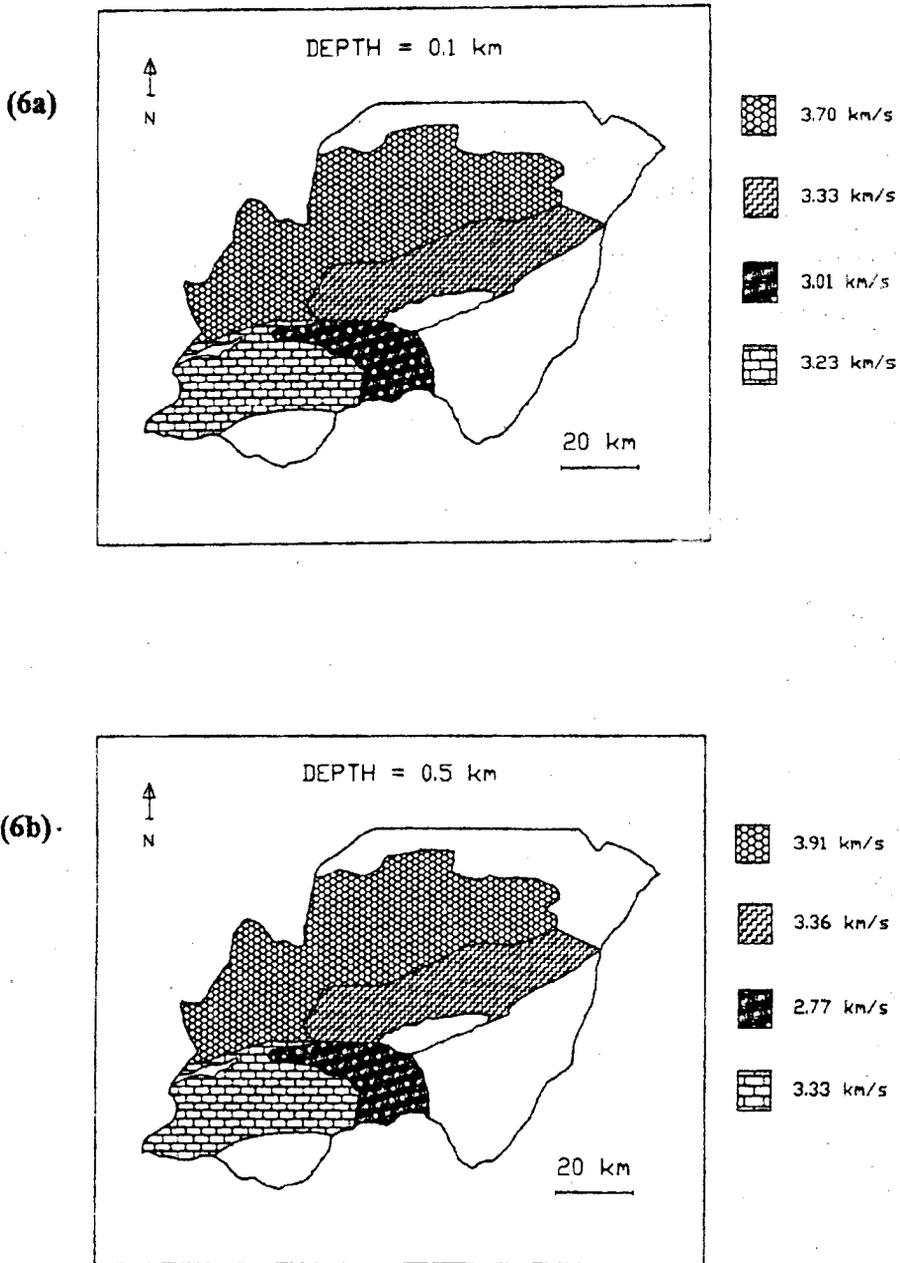


FIG. 6.- Distribución lateral de la velocidad compresional.

Los valores de dispersión de la velocidad de grupo son por lo general bajos, aunque similares a los obtenidos por otros autores (Macbeth & Burton, 1986; Kocaoglu & Long, 1993 y Sarrate et al., 1993) en otras regiones de estudio, utilizando registros de período corto con un rango similar. Los valores de velocidad de grupo presentan diferencias notables entre las diferentes regiones analizadas, lo cual se corresponde con las diferentes estructuras geológicas analizadas.

La aplicación de las técnicas de inversión a los valores de dispersión de la velocidad de grupo regionalizados ha permitido obtener los modelos de velocidad compresional de las cuatro regiones analizadas para un modelo de Tierra estratificado en un rango de profundidad entre 0 y 2 km. Se han observado diferencias significativas en los modelos de velocidad compresional obtenidos, observándose que los valores más bajos corresponden a las cuencas sedimentarias analizadas (Andarax y Tabernas-Sorbas), mientras que los valores más altos se corresponden con las estructuras montañosas (Sierra de Filabres y Sierra de Gádor). La rigidez de las estructuras modeladas no aumenta en todos los casos con la profundidad, observándose canales de baja velocidad a distintas profundidades, destacando los casos de la cuenca del Andarax entre 0.2 y 0.5 km y la de Sierra de Gádor entre 1 y 2 km.

BIBLIOGRAFÍA

- BADAL, J. (1990). "Inversion of seismic wave velocities by means of the stochastic inverse operator". *Rev. Acad. Ciencias. Zaragoza* 45.
- BADAL, J., CORCHETE, V., PAYO, G., SERÓN, F.J., CANAS, J.A. & PUYADES, L. (1992). "Deep Structure of the Iberian Peninsula determined by Rayleigh wave velocity inversion". *Geophys. J. Int.* 108, 71-88.
- BADAL, J., CORCHETE, V., PAYO, G., CANAS, J.A. & PUYADES, L. (1993). "Shear wave velocity structure below the Iberian Peninsula as obtained by a detailed analysis of surface wave". *Tectonophysics*, 225, 167-190.
- BLOCH, S., HALES, A.L., & LANDISMAN, M. (1969). "Velocities in the crust and upper mantle of southern Africa from multi-mode surface-wave dispersion." *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 1599-1629.
- CARA, M. (1973). "Filtering of dispersed wavetrains". *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 33, 65-80.
- CORCHETE, V., BADAL, J., PAYO, G. & SERÓN, F.J. (1969). "Filtrado de ondas sísmicas dispersadas". *Rev. de Geofísica*, 45, 39-58.
- CORCHETE, V., BADAL, J., PAYO, G., CANAS, J.A., PUYADES, L. & SERÓN, F.J. (1990). "An attempt at joint inversion of rayleigh wave phase and group velocities in Iberian," *Rev. Geofísica*, 46, 83-96.
- DZIEWONSKI, A.M., BLOCH, S. & LANDISMAN, M. (1969). "A technique for the analysis of transient seismic signals". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 427-444.
- DZIEWONSKI, A.M., MILLS, J. & BLOCH, S. (1972). "Residual dispersion measurement. A new method of surface-waves analysis". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 62, 129-139.
- DZIEWONSKI, A.M. & HALES, A.L. (1972). "Numerical analysis of dispersed seismic waves". *Meth. comp. Phys.*, 11, pp. 39-85, Academic Press Inc., New York.
- HERRMANN, R.B. (1973). "Some aspects of band-pass filtering of surface waves, Bull. Seism". *Soc. Am.*, 63, 663-671.

- HWANG, H.J. & MITCHELL, B.J. (1986). "Interstation surface waves analysis by frequency-domain Wiener deconvolution and modal isolation". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 847-864.
- KOCAOGLU, A.H. & LONG, L.T. (1993). "Tomographic Inversion of Rg Wave Group Velocities for Regional Near-Surface Velocity Structure". *J. Geophys. Res.*, 98, 6579-6587.
- LEVENBERG, K. (1944). "A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares". *Quart. Appl. Math.*, 2, 164-168.
- MACBETH, C.D. & BURTON, P.N. (1986). Propagation of 0.7-2.5 Hz Rayleigh waves in Scotland". *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 101-120.
- MARQUARDT, D.W. (1963). "An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters". *SIAM J.*, 11, 431-441.
- MONTENAT, C., OTT D'ESTEVOU, P. & LA CHAPELLE, G. (1990). "Le Bassin de Nijar-Carboneras et le couloir du bas-Andarax". *Doc. et Trav. IGAL*, 12-13, 129-164.
- NAVARRO, M., CORCHETE, V., ROMACHO, M.D. & GARCÍA, J.M. (1993). "Análisis de dispersión de datos sísmicos". *Homenaje a Safwan Al Khouri Ibrahim. Universidad de Granada*, 7 pp.
- NAVARRO, M., CORCHETE, V., BADAL, J., VIDAL, F., CANAS, J.A. & PUJADES, L. (1993). "Shallow structure of Almería (Southern Spain) from high-frequency Rayleigh-wave data". *Publicación I.G.N.. Serie Monografía n 10*, p. 299-309.
- NAVARRO, M. (1994). "Modelización tridimensional elástica y anelástica de Almería a partir del análisis de ondas sísmicas. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 281 pp.
- OTT D'ESTEVOU, P. & MONTENAT, C. (1990). "Le Bassin de Sorbas-Tabernas". *Doc. et Trav. IGAL*, 12-13, 101-128.
- PILANT, W.L. & KNOPOFF, L. (1964). "Observations of multiple seismic events, Bull". *seism. Soc. Am.*, 54, 19-39
- RODI, W.L., GLOVER, P., LI, T.M.C. & ALEXANDER, S.S. (1975). "A fast, accurate method for computing group-velocity partial derivatives for Rayleigh and Love modes, Bull". *seism. Soc. Am.*, 65, 1105-1114.
- SARRATE, J., CANAS, J.A., PUYADES, L., BADAL, J., CORCHETE, V., & PAYO, G. (1993). "Shallow structure of part of northwestern Iberia from short-period Rayleigh-wave observations". *Tectonophysics*, 221, 95-105.
- WOODS, M.T., RUSELL, D.R. & HERRMANN, R.B. (1989). "Dispersion of short period Ryleigh waves within the Ozark Uplift and Illinois Basin". *Seismol. Res. Lett.*, 60, 111-118.
- YAO, P.C. & DORMAN, J. (1992). "Short-Period Surface wave dispersion and shallow crustal structure of central an eastern Tennessee. *Bull. seism. Soc. Am.*, 82, 962-979.