

**ESTRUCTURA DE LA CORTEZA AL ORIENTE DE LA
SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MEXICO, BASADA EN LA
VELOCIDAD DE GRUPO DE LAS ONDAS DE RAYLEIGH**

J. RIVERA*

L. PONCE*

(Recibido: 26 de abril, 1985)

(Aceptado: 21 de agosto, 1985)

RESUMEN

Se usa la dispersión de las ondas de Rayleigh en su modo fundamental, correspondiente a dos explosiones nucleares efectuadas en Nevada, USA, y registradas en la estación sismológica UNM, en la ciudad de México, para estimar la estructura de la velocidad de la onda de cizalle en un perfil que corre aproximadamente a lo largo del flanco oriental de la Sierra Madre Occidental, México.

Los datos observados de la dispersión de la velocidad de grupo para el rango de períodos de 10 a 21 segundos pueden explicarse con 5 capas horizontales, elásticas y homogéneas sobre un semiespacio. El espesor promedio obtenido para la corteza es del orden de 40 km. Las velocidades de cizalle y los espesores obtenidos son los siguientes:

Sedimentos, $V_{s1} = 1.5$ km/s, $h_1 = 1.2$ km;

Granito, $V_{s2} = 2.90$ km/s $h_2 = 2.2$ km y $V_{s3} = 3.56$ km/s, $h_3 = 26$ km;

Basalto, $V_{s4} = 4.10$ km/s, $h_4 = 10.0$ km;

Manto Superior $V_{s5} = 4.50$ km/s, $h_5 = 10.0$ km;

Manto, $V_{s6} = 4.15$ km/s, $h_6 = \infty$.

Se presupone una razón de 1.78 para el cociente V_p/V_s .

Este modelo de velocidades sugiere que la estructura del flanco oriental de la Sierra Madre Occidental es transicional entre una de tipo Alpino y otra de tipo *Basin and Range*. El modelo concuerda satisfactoriamente con resultados anteriores basados en estudios de refracción hechos en los alrededores de la región y con las ideas sobre la evolución tectónica cenozoica del oeste del continente norteamericano.

* Instituto de Geofísica, UNAM, MEXICO, D.F., C.P. 04510.

ABSTRACT

Dispersion of fundamental mode Rayleigh waves for two large nuclear explosions from Nevada, USA, recorded at UNM, seismological station in Mexico City, was used to estimate the shear wave velocity structure along a profile running mainly along the eastern flank of the Sierra Madre Occidental, Mexico.

The observed group velocity dispersion data in the period range of 10 to 21 seconds can be explained by 5 homogeneous horizontal elastic layers over a half space. The average thickness of the crust is of the order of 40 km. The shear velocities and thicknesses obtained are as follows: Sediments, $V_{S1} = 1.5$ km/s, $h_1 = 1.2$ km; Granite, $V_{S2} = 2.90$ km/s, $h_2 = 2.2$ km and $V_{S3} = 3.56$ km/s, $h_3 = 26$ km; Basalt, $V_{S4} = 4.10$ km/s, $h_4 = 10.0$ km; Upper Mantle, $V_{S5} = 4.5$ km/s, $h_5 = 10.0$ km; Mantle, $V_{S6} = 4.15$ km/s, $h_6 = \infty$. A ratio of 1.78 is assumed for V_p/V_s .

The velocity model suggests that the structure of the eastern flank of the Sierra Madre Occidental is transitional between the Alpine and the Basin and Range types. The model agrees satisfactorily with earlier results based on refraction studies of the crust in the surrounding regions, and supports the ideas about the Cenozoic tectonic evolution of the western North American Continent.

INTRODUCCION

El estudio de la estructura de la corteza terrestre, en términos del tipo de materiales que la componen y de su espesor, tiene importancia dentro de la geofísica debido a que permite elaborar teorías acerca de la evolución de los continentes y, en general, del desarrollo de diversos procesos tectónicos.

Existen trabajos de diversos autores, quienes usando la dispersión de las ondas de Rayleigh en su modo fundamental, estudian las cortezas circundantes a México y del territorio continental. Papazachos y otros (1964) y Tarr (1969) estudian la corteza del Golfo de México y del Mar Caribe; Knopoff y otros (1969) y Thatcher y Brune (1973) estudian el Golfo de California; Fix (1975) estudia la región central del país en un perfil que va de Arizona a Chiapas y Aldaz y otros (1981) analizan la capa sedimentaria en Sonora. También se encuentran algunos trabajos que utilizan ondas sísmicas refractadas: Meyer y otros (1958, 1961) estudian un perfil que cruza la Sierra Madre Occidental en su parte sur, a la altura del estado de Durango y Valdés y otros (1985) reportan resultados preliminares en la región de Oaxaca-Guerrero, al sur de México. El sur del Golfo de California fue estudiado con esta técnica por Phillips (1964). Sosa (1977), usando el espectro del ángulo aparente de la incidencia de las ondas P y S, estimó el espesor y las velocidades medias para una corteza homogénea en las vecindades de la ciudad de México.

En este trabajo se estudia la estructura de la corteza a lo largo del perfil que une al Distrito Federal (DF) con el sitio de Pruebas Nucleares en Nevada (NTS), USA, usan-

do la dispersión de las ondas de Rayleigh en su modo fundamental. El perfil analizado (NTS-D.F.) corre casi paralelo al oriente de la Sierra Madre Occidental, aproximadamente a 200 km del centro de ella (Figura 1). Esta sierra es una meseta de aproximadamente 1 200 km de largo, entre 200 y 300 km de ancho y unos 3 000 m de altura. Se extiende desde el sur de Estados Unidos hasta aproximadamente la ciudad de Guadalajara, México, donde intersecta al eje neovolcánico.

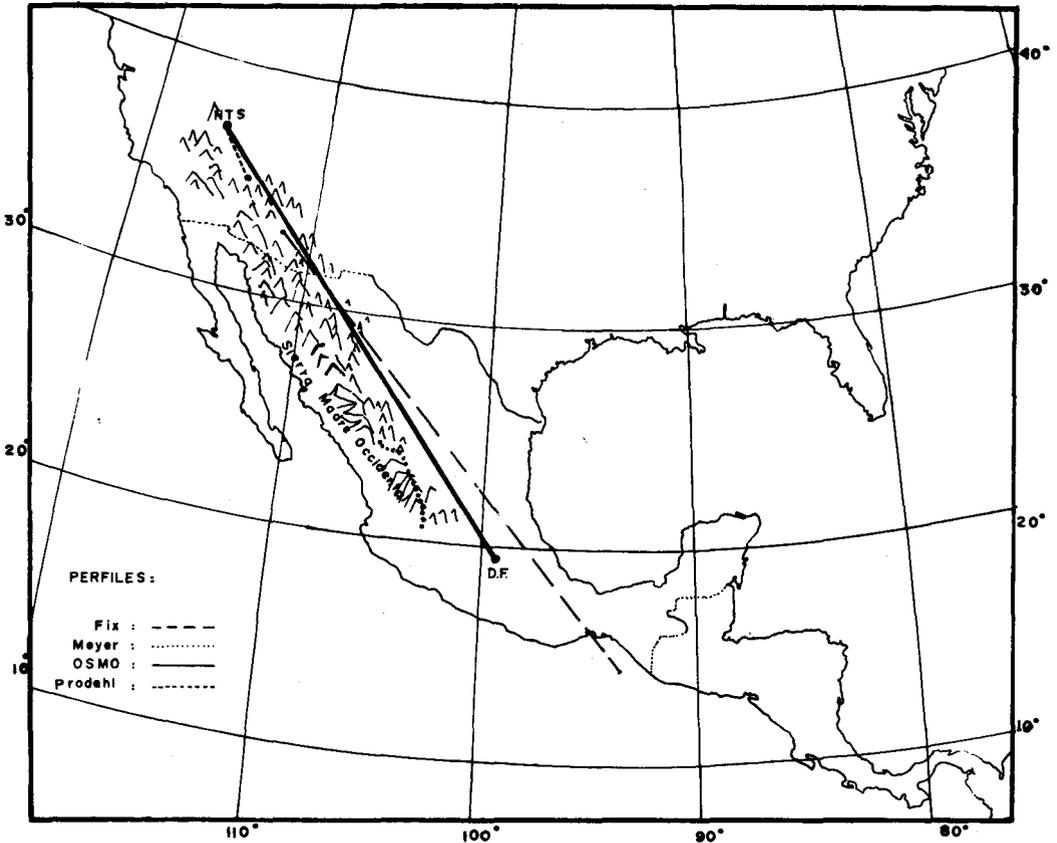


Fig. 1. Esquema de la localización del perfil estudiado (NTS-D.F.) que corre casi paralelo al oriente de la Sierra Madre Occidental. Se muestra la disposición geográfica de los perfiles estudiados por Meyer y otros (1958, 1961), Fix (1975) y Prodehl (1979). Perfiles cercanos a la región del presente estudio.

La margen oeste de la sierra presenta quebradas profundas producidas por la erosión, mientras que en las regiones norte y este se encuentran zonas con bloques fallados y cuencas sedimentarias.

Respecto a la geología superficial, la sierra está cubierta por rocas volcánicas que datan del terciario medio y cuya composición va desde tipo andesítico hasta riolítico (McDowell y Keizer, 1977).

Basándose en los principios de la tectónica global de placas, Atwater (1970) estudia la evolución tectónica cenozoica del occidente del continente norteamericano. Sus conclusiones sugieren que la Sierra Madre Occidental se originó por la interacción de las placas de Farallón y de Norteamérica, las que definían una zona de subducción activa desde fines del Mesozoico (80 ma) hasta el Terciario Medio (20 ma). Durante el Cuaternario y fines del Terciario, la corteza de la Sierra Madre Occidental debe haber experimentado un proceso de adelgazamiento y compactación, causado a lo menos por los fenómenos de denudación, enfriamiento y compensación isostática. El propósito de este trabajo es estimar el espesor actual de la corteza a lo largo de un perfil que corre al oriente de la Sierra Madre Occidental, México.

DATOS

Se analizaron las ondas superficiales producidas por dos explosiones nucleares efectuadas en Nevada, USA, y registradas en la estación sismológica UNM (WWNSS) de período largo ($T_s = 15s$, $T_g = 100 s$ y $A = 1 500$) en la ciudad de México. Los sismogramas respectivos se muestran en la Figura 2 y los parámetros epicentrales en la Tabla 1, según fueron reportados por la Comisión de Energía Atómica de los Estados

Explosión nuclear ZAZA:

Fecha: 27 de Septiembre de 1967

Hora : 17:00:0.03

Lugar: 37° 5' 56'' N

116° 3' 12'' W

Explosión nuclear KNOX:

Fecha: 21 de Febrero de 1968

Hora : 15:30:00

Lugar: 37° 7' 0'' N

116° 3' 13'' W

Unidos (USAEC). En ambos eventos, la porción del sismograma analizado considera las ondas superficiales que viajan con velocidades comprendidas entre $V_{\min} = 2.14$ km/s y $V_{\max} = 3.42$ km/s. La duración de las señales estudiadas es de 480 s. Cabe destacar que para el período en estudio, los sismogramas cuentan con claros pulsos de calibración.

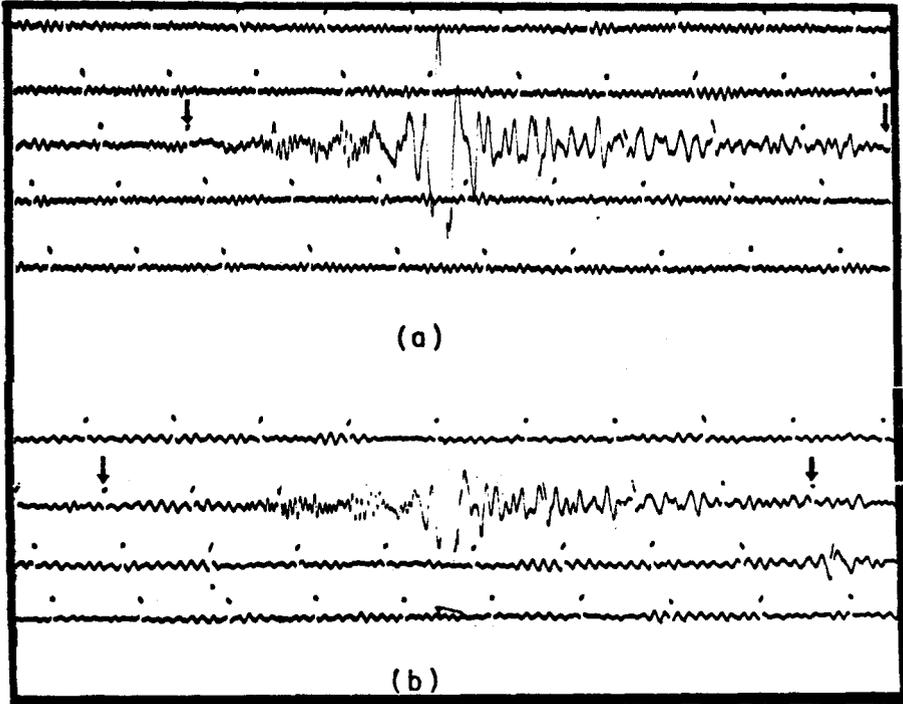


Fig. 2. Sismogramas correspondientes a las explosiones nucleares ZAZA (a) y KNOX (b), detonadas en el Sitio de Pruebas Nucleares en Nevada, USA en 1967 y 1968, respectivamente, y registradas en la estación UNM, México. Las flechas indican la porción del sismograma estudiado, que corresponde a una ventana de velocidades aparentes, comprendida entre 2.14 y 3.42 km/s.

El usar explosiones como fuentes sísmicas tiene la ventaja de que éstas se encuentran bien localizadas, tanto en espacio como en tiempo y todas las armónicas de las ondas superficiales generadas por ellas salen, teóricamente, con la misma fase, lo cual facilita mucho los análisis teóricos.

METODO DE ANALISIS

Entre las principales características que se observan en los sismogramas de eventos lejanos está la dispersión de las ondas de Rayleigh. Esta dispersión está estrechamen-

te relacionada con la estructura de la corteza terrestre. Es decir, si consideramos que la corteza puede representarse por superposición de un conjunto de capas horizontales caracterizadas por velocidades crecientes con la profundidad, encontramos que las armónicas de mayor longitud de onda alcanzan capas de mayor profundidad y por tanto de mayor velocidad; en cambio, las armónicas de menor longitud de onda viajarán por capas superficiales de menor velocidad, tardando más tiempo en llegar a la estación sísmica. De este modo, el grupo de ondas generado con la misma fase inicial comienza a dispersarse. La magnitud de esta dispersión dependerá, entre otras cosas, de las propiedades elásticas y del espesor de cada una de las capas que constituyen la corteza terrestre analizada.

Uno de los procedimientos utilizados para obtener la dispersión de las ondas superficiales es el de filtrar el sismograma alrededor de ciertos períodos y cuantificar la velocidad de grupo de cada uno de los paquetes de ondas así resultantes. Este procedimiento, conocido como "Técnica de Filtrado Múltiple" (Dziewonski y otros, 1969), permite obtener curvas experimentales de la velocidad de grupo de los paquetes de ondas en función de sus períodos centrales correspondientes. Este fue el procedimiento seguido en este trabajo.

Por otra parte, se construyen curvas de dispersión con base en un modelo teórico de corteza. El método se basa en una formulación hecha por Thomson (1950) y por Haskell (1953). Las curvas teóricas obtenidas, al ser comparadas con las experimentales, permiten inferir la estructura de la corteza estudiada en términos del número de capas, de sus propiedades elásticas y de sus espesores. Para lograr esto, se ajusta el modelo teórico inicial de corteza hasta que las curvas teóricas de dispersión concuerden con las experimentales dentro de un margen de error preestablecido.

El procedimiento de comparación seguido en este trabajo fue de ensayo y error, apoyado por un conjunto de curvas de dispersión a las que llamaremos curvas maestras (Savarensky y otros, 1965; 1967). Estas gráficas permiten tener una idea cualitativa de cómo se modifica la forma de una curva de dispersión debido a cambios en los valores de los parámetros de cada una de las capas. Estos parámetros son: densidad, espesor y velocidad de las ondas P y S. Para un modelo de "n" capas se pueden construir $4n-1$ curvas maestras, ya que cada capa posee 4 parámetros y la última, que es un semiespacio, sólo 3, ya que su espesor se supone infinito.

En la Figura 3 mostramos algunas curvas maestras especialmente calculadas para este trabajo. Al modificar el modelo teórico de corteza inicial, no es necesario modi-

ficar los valores de los $4n-1$ parámetros, ya que los que mayor influencia tienen sobre la forma de la curva de dispersión son los espesores y los valores de la velocidad de las ondas S, y generalmente se considera que la razón V_p/V_s mantiene un valor constante en todas las capas. En nuestro trabajo usamos una razón de 1.78.

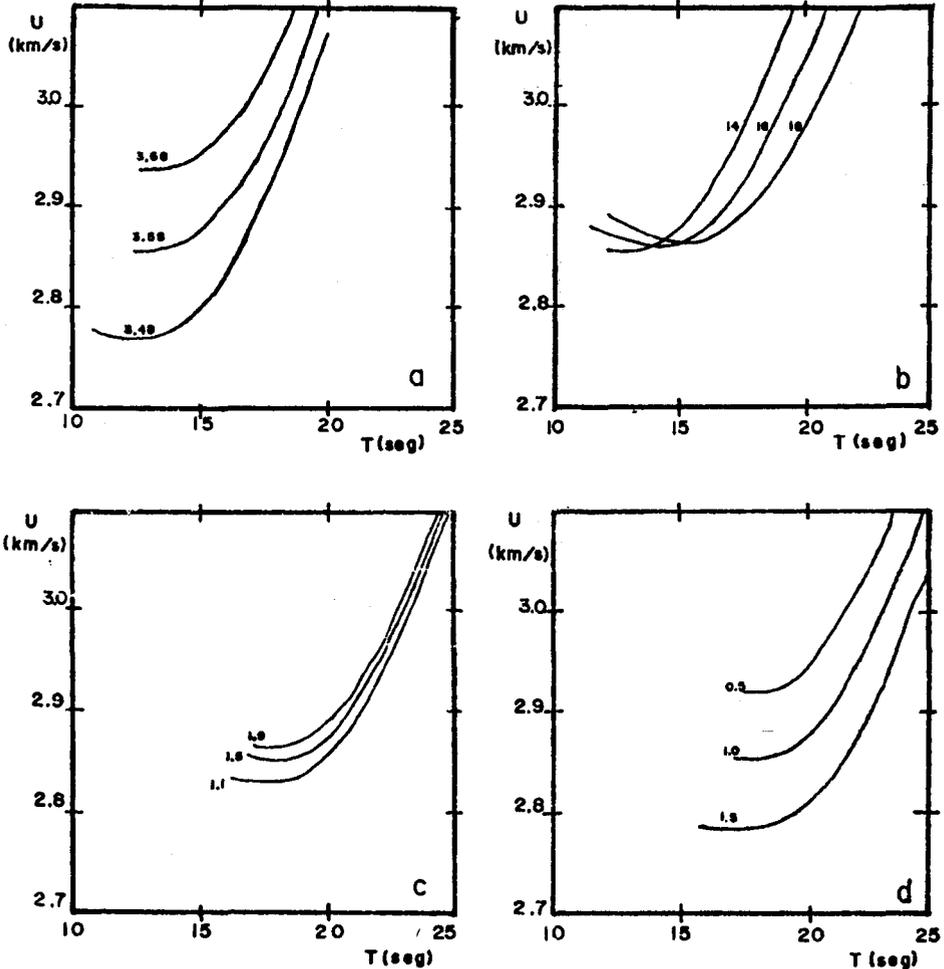


Fig. 3. Algunas curvas maestras usadas en este trabajo. Las gráficas a y b muestran los efectos sobre la curva de dispersión de la velocidad de grupo cuando se varía la velocidad de cizalle V_s y el espesor de la capa "3" del modelo de Fix, de 3.48 a 3.68 km/s y de 14 a 18 km, respectivamente. Las gráficas c y d muestran los efectos cuando se varían los valores de la velocidad V_s de 1.1 a 1.9 km/s y el espesor de 0.5 a 1.5 km en la capa "1" del mismo modelo (Tabla 2).

Los valores para las densidades en función de la profundidad se mantuvieron fijos y corresponden a los utilizados por Fix (1975).

ANALISIS DE DATOS

Los sismogramas (componente z) fueron digitalizados considerando un número de puntos que fuera múltiplo de 2 a fin de poder usar el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (Cooley y Tukey, 1965). El intervalo de digitalización fue de $\Delta t = 0.4380$ s. Los sismogramas digitalizados se filtraron usando la técnica de filtrado múltiple, con un filtro gaussiano cuyo ancho de banda en frecuencia fue de 0.25 y con un factor de atenuación de 55.262 (Herrman, 1973). El filtrado se hizo para períodos comprendidos entre 4 y 35 segundos; sin embargo, se encontró que la señal sísmica era comparable, en energía, al ruido sísmico fuera del intervalo 9 y 25 segundos de período. Esto se observa en las curvas de dispersión de la velocidad de grupo que resultan del filtrado, pues fuera del rango mencionado las curvas pierden resolución. Las Figuras 4 y 5 muestran las curvas de dispersión experimentales correspondientes a las dos explosiones nucleares estudiadas.

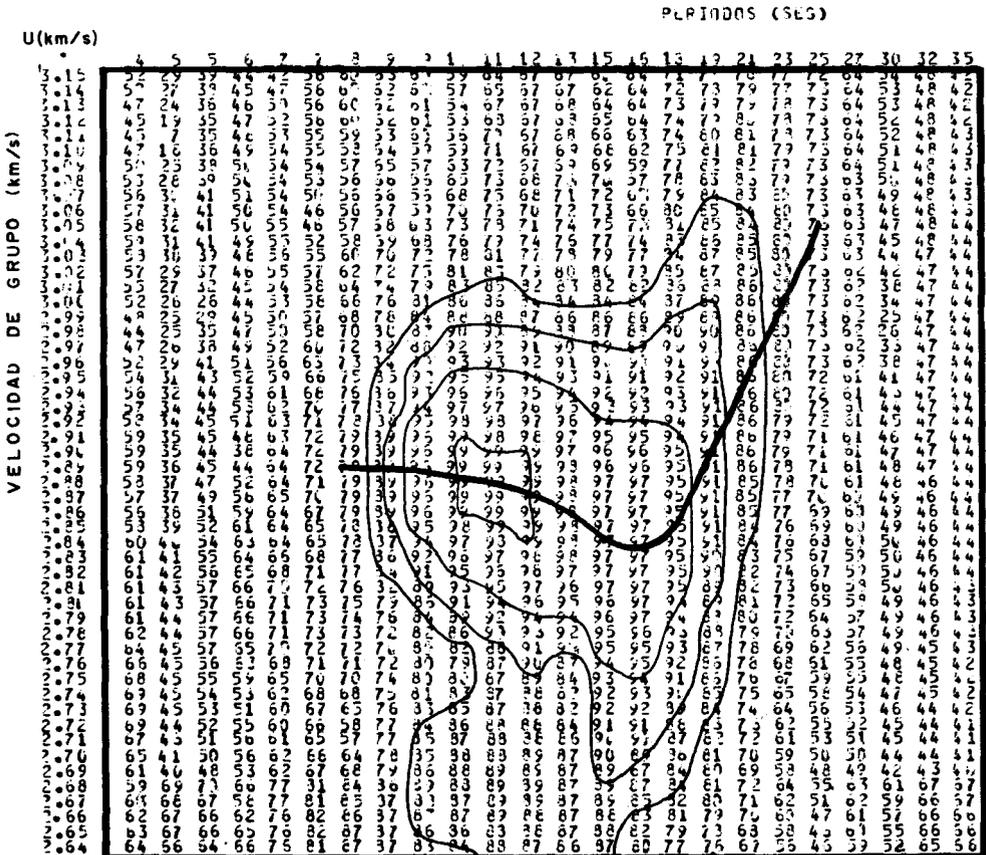


Fig. 4. Curva experimental de la dispersión de la velocidad de grupo para la explosión ZAZA (1967).

Cuando se filtra una señal sísmica, lo que se obtiene es un pulso de ondas cuya amplitud máxima viaja con una velocidad igual a la de grupo del paquete (Dziewonsky y otros, 1969). Los elementos de las matrices mostradas en las Figuras 4 y 5 contienen los valores de las amplitudes de las envolventes de estos paquetes de ondas; ellas se presentan en escala logarítmica y relativas al valor máximo, arbitrariamente normalizado igual a 99. Para obtener las curvas de dispersión de la velocidad de grupo se deben localizar y unir los máximos de cada columna de la matriz de amplitudes. Para localizar estos máximos se pueden trazar curvas de nivel, como se muestra en las Figuras 4 y 5.

Se observa que fuera del rango 9-25 segundos de período los valores máximos no se destacan con aceptable resolución y que ambas curvas experimentales son prácticamente coincidentes para el intervalo 9-21s de período.

Una vez obtenidas las curvas experimentales de dispersión se procedió a encontrar un modelo de capas para la corteza y el manto superior cuya curva teórica de dispersión ajustara con las experimentales. Para comenzar, elegimos el modelo de corteza (Tabla 2) propuesto por Fix (1975) en vista de que el perfil estudiado por él corría unos 200 km al oriente del analizado por nosotros (Figura 1).

V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (g/cm ³)	H (km)	Prof. (km)
3.00	1.50	2.32	1.0	1.0
5.59	2.87	2.62	3.0	4.0
6.12	3.58	2.90	14.0	18.0
6.91	3.80	3.09	12.0	30.0
7.49	4.50	3.26	8.0	38.0
7.80	4.50	3.32	12.0	50.0
7.37	4.12	3.30	0.0	-

Tabla 2. Modelo de capas para la meseta central (perfil: Arizona-Chiapas) propuesto por Fix (1975).

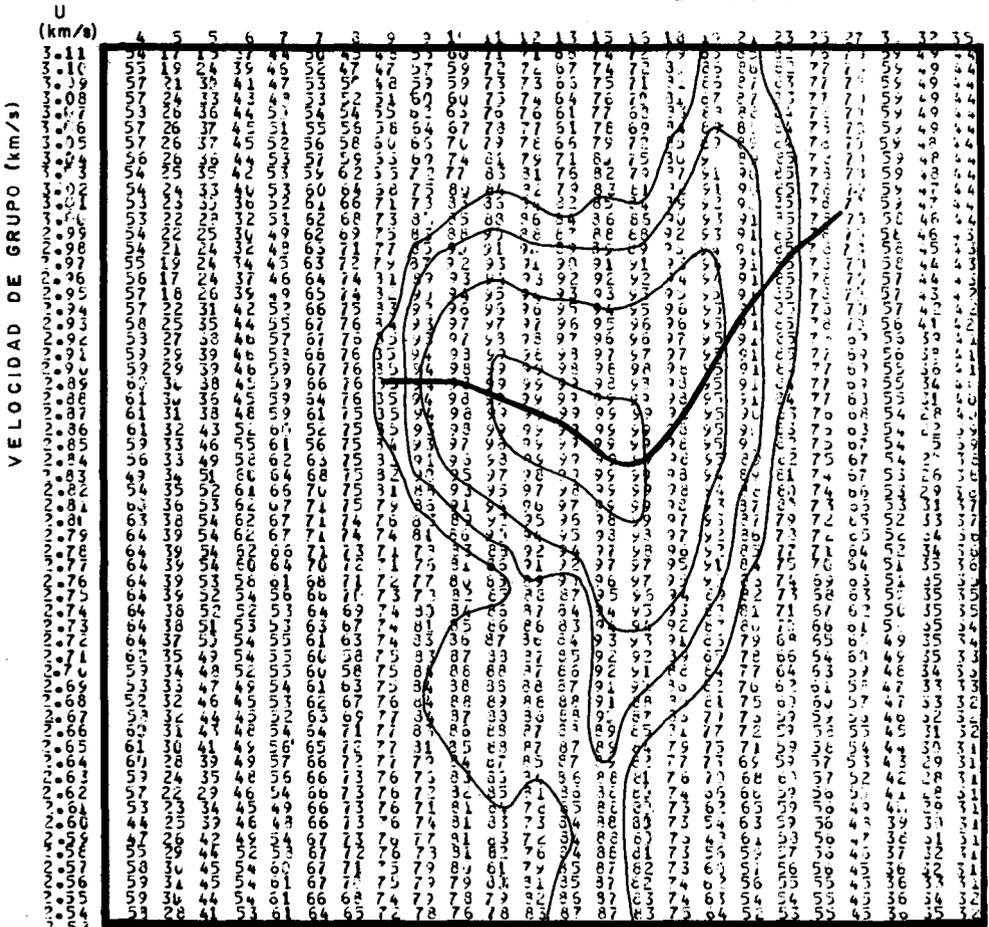


Fig. 5. Curva experimental de la dispersión de la velocidad de grupo para la explosión KNOX (1968).

En la Figura 6 mostramos, para su comparación, la curva teórica de dispersión según el modelo de Fix junto con las curvas experimentales para el perfil NTS-D.F. Como el modelo de Fix no ajusta nuestros datos, lo modificamos apoyándonos en las curvas correspondientes (Figura 3), hasta que la curva teórica de dispersión ajuste con las experimentales dentro de un margen de error de ± 0.01 km/s en la velocidad de grupo.

RESULTADOS

El modelo teórico de capas horizontales que resultó para el flanco oriental de la Sierra Madre Occidental (Modelo OSMO) se describe en la Tabla 3. En la Figura 6 dibu-

jamos la curva teórica de dispersión correspondiente a este modelo junto con las experimentales que resultaron del filtrado de nuestros sismogramas.

Se observa que existe buen ajuste para períodos comprendidos entre 10 y 21 segundos.

La Tabla 3 muestra también los márgenes de error en los parámetros del modelo de corteza teórico obtenido. Estos márgenes deben interpretarse así: si se modifica el valor de un parámetro dentro de su margen de error, la curva de dispersión teórica seguirá ajustando con las experimentales con un error menor o igual a 0.01 km/s, pero esto no garantiza que si se modifican dos o más parámetros a la vez, y aun dentro de su rango de error, las curvas sigan ajustando. Como puede observarse en la Tabla 3, la curva de dispersión es por lo general más sensible a cambios en la velocidad V_s . No se dan márgenes de error para las densidades y las velocidades V_p porque en este trabajo se consideró a las densidades como constantes e iguales a las utilizadas por Fix (1975) y a las velocidades V_p sujetas a una razón de 1.78 con las velocidades V_s .

Para analizar la influencia que tiene en el Modelo OSMO la posible región de baja velocidad del manto (semiespacio, $V_s = 4.15$ km/s) se procedió a eliminarla y consi-

V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (g/cm ³)	H (km)	Prof. (km)
2.67	1.5 ± 0.2	2.32	1.2 ± 0.5	1.2
5.16	2.9 ± 0.2	2.62	2.2 ± 0.2	3.4
6.34	3.56 ± 0.01	3.09	26.0 ± 0.5	29.4
7.30	4.10 ± 0.03	3.25	$10. \pm 2.0$	39.4
8.01	4.50 ± 0.05	3.30	$10. \pm 1.0$	49.4
7.39	4.15 ± 0.05	3.32	-	-

Tabla 3. Modelo de capas para la corteza y manto superior del flanco oriental de la Sierra Madre Occidental, propuesto en este trabajo (perfil NTS-D.F.; Modelo OSMO).

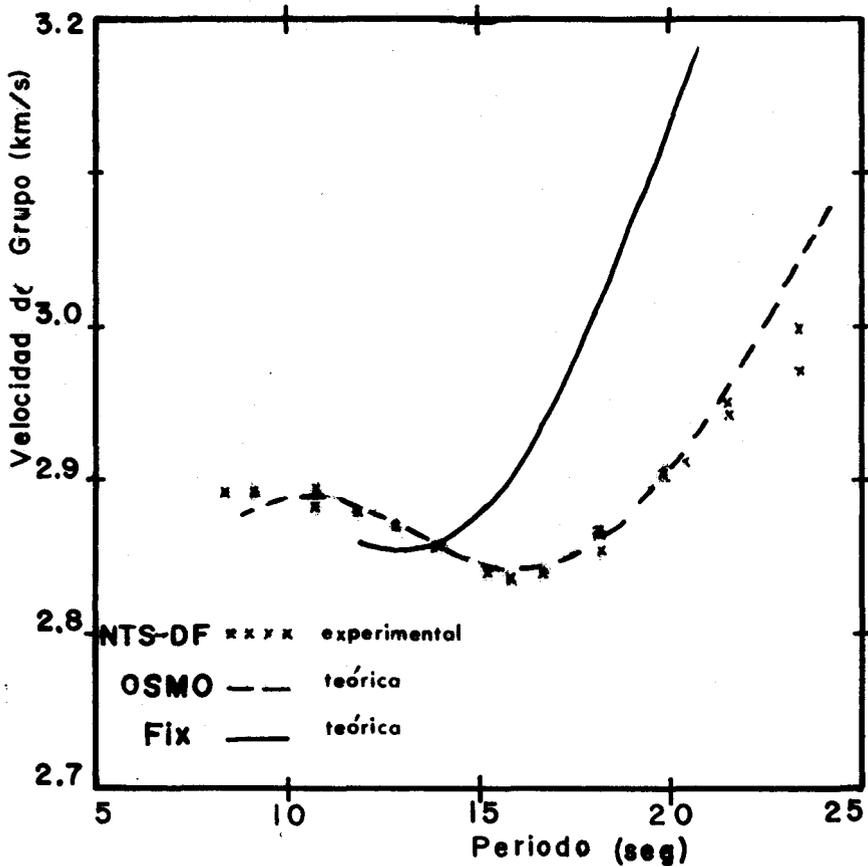


Fig. 6. Comparación entre las curvas experimentales de dispersión a lo largo del perfil NTS-D.F., la curva teórica correspondiente al modelo de capas para la corteza en la meseta central de México hallada por Fix (1975) y la curva teórica resultante del modelo OSMO obtenido en este trabajo (Tabla 3).

derar a la capa anterior ($V_s = 4.5$ km/s) como semiespacio (modelo OSMO I). En la Figura 7 se muestran las curvas teóricas resultantes para la velocidad de grupo, para los casos en que la interfase del semiespacio se fija a 35, 40 y 50 km, haciendo más delgada o más gruesa la capa basáltica de la corteza. Se observa que ellas no ajustan los datos con la precisión alcanzada por el modelo OSMO. Además, se estudió la influencia de la capa de alta velocidad del manto ($V_s = 4.5$ km/s) eliminándola y considerando sólo un semiespacio con $V_s = 4.15$ km/s (modelo OSMO II). En la Figura 7 se muestran las curvas teóricas de dispersión de la velocidad de grupo resultantes para espesores totales de la corteza iguales a 35, 40 y 50 km. Todas ellas, al igual que en el caso anterior, no ajustan adecuadamente los datos. Por lo tanto, consideramos que la estructura de velocidades para la corteza y el manto superior propuesto en el modelo OSMO, es representativa para la trayectoria NTS-D.F.

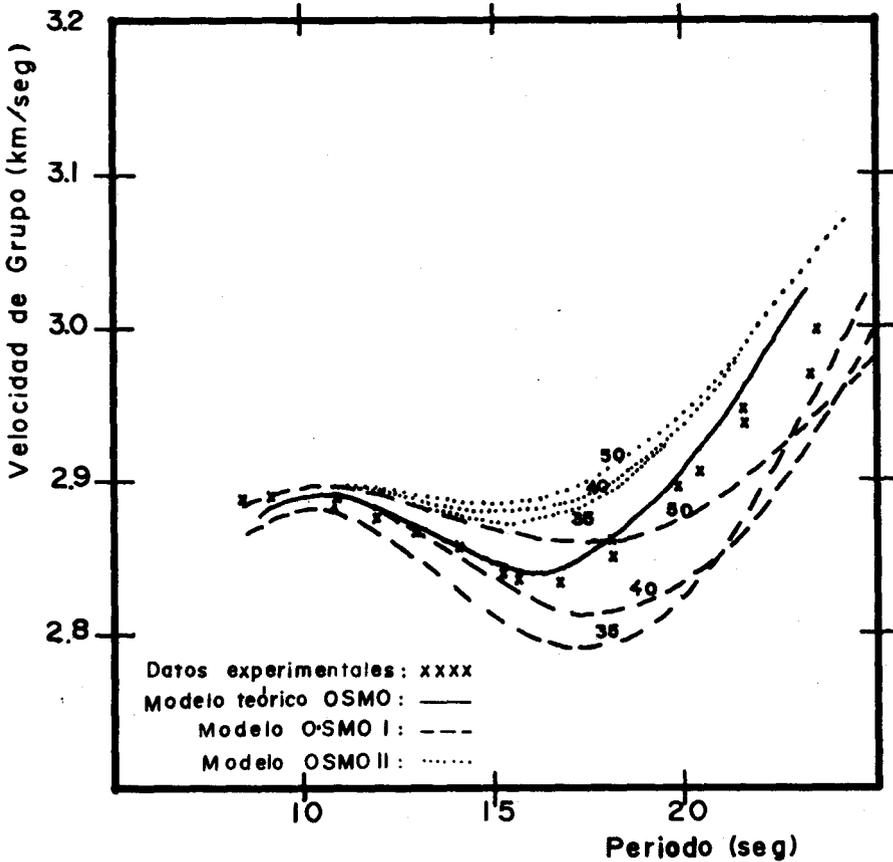


Fig. 7. Curvas teóricas de dispersión para el modelo OSMO y para los casos en que se elimine la región de baja velocidad del manto (OSMO I) o la región de alta velocidad de éste (OSMO II); los números asociados a cada curva teórica corresponden a los espesores totales de la corteza considerada, disminuyendo o incrementando el espesor de la capa basáltica. La curva que mejor ajusta los datos experimentales es la correspondiente al modelo OSMO (Tabla 3).

DISCUSION

A fin de observar las diferencias entre los modelos de corteza propuestos por Fix (1975) para el perfil "Arizona-Chiapas" y el propuesto por nosotros para el perfil "Distrito Federal-Nevada", presentamos en la Figura 8 los perfiles de la velocidad V_s en función de la profundidad. Se observa que la corteza del modelo OSMO es de mayor espesor (40 km) que el obtenido por Fix (30 km) y que, en general, los valores de la velocidad V_s son similares, a excepción de la capa correspondiente a la corteza inferior (capa basáltica) en la cual se presentan valores ligeramente mayores pa-

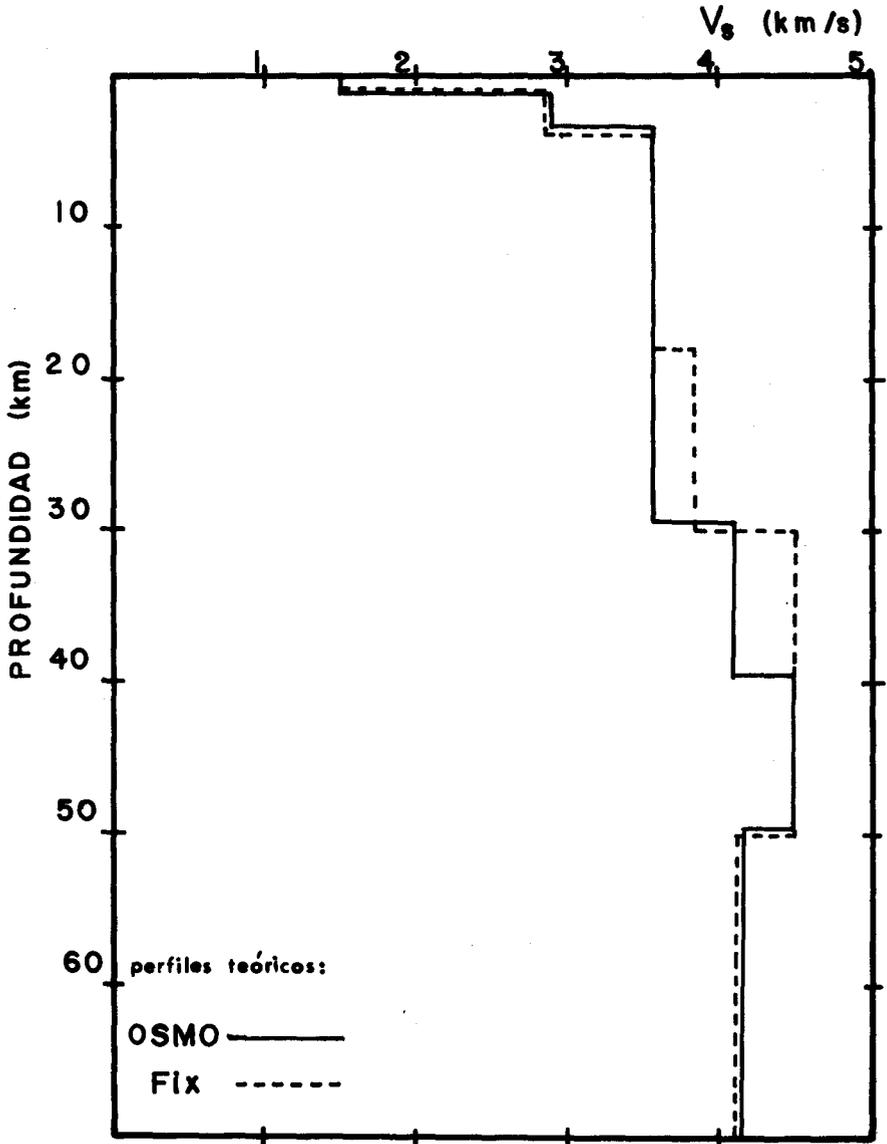


Fig. 8. Variación de la velocidad de las ondas de cizalle V_s con la profundidad, para los modelos: OSMO y Fix (1975).

ra la parte oriental de la Sierra Madre Occidental. El mayor espesor de la corteza en el Modelo OSMO se debe a una capa granítica más gruesa.

Una corteza de mayor espesor (40 km) para el flanco oriental de la Sierra Madre Occidental que el sugerido por Fix (1975) para la meseta Central de México es un resultado esperado de acuerdo con la evolución tectónica del oeste de América del Norte analizada por Atwater (1970). La Sierra Madre Occidental corresponde a un rasgo estructural que presentó una intensa actividad tectónica desde el Mesozoico Tardío (80 ma) hasta el Terciario Medio (20 ma), asociada a la subducción de la placa de Farallón por debajo de la Placa Norteamericana.

Meyer y otros (1958, 1961) estudiaron la estructura de la corteza de la parte sur de la Sierra Madre Occidental, usando el método de refracción sísmica y sugirieron 2 modelos (III y IV) que satisfacen convenientemente sus datos. Dichos perfiles se comparan en la Figura 9 con los obtenidos para el Modelo OSMO, considerando que $V_p = 1.78 V_s$. Ellos presentan, en general: 1) Velocidades promedio menores que las obtenidas para el modelo OSMO. 2) Mayores espesores para la capa "granítica". 3) Espesores para la corteza un poco mayores (44 km). 4) Mayores velocidades para el manto. Las diferencias estructurales de la corteza, presentes entre el núcleo de la Sierra Madre Occidental y su flanco oriental (OSMO) no contradicen los antecedentes sobre la evolución tectónica de la región (Atwater, 1970).

Existen escasos datos sobre la estructura de la corteza terrestre y manto superior que puedan servir de comparación con los resultados aquí reportados. En la parte norte, Prodehl (1979) reporta resultados de refracción sísmica, a lo largo de un perfil que corre desde el sitio de pruebas atómicas de Nevada (NTS) a la localidad de Kingman, USA (Figura 1). Esta región corresponde a la parte sur de la provincia tectónica denominada "*Basin and Range*", que se caracteriza por corteza más delgada que la de sus alrededores. Esta provincia tectónica no extiende al sur, en la dirección de nuestro perfil. Por lo tanto, su estructura cortical no debería coincidir con el valor promedio obtenido para el perfil NTS-D.F. según el modelo OSMO. En la Figura 9 se muestra la variación de las velocidades de las ondas longitudinales, V_p , con la profundidad obtenida por Prodehl (1979) para el perfil NTS-Kingman y se compara con el modelo OSMO. Las principales diferencias y semejanzas entre ambas curvas son: 1) la corteza en Nevada es más delgada (33 km) que a lo largo del perfil NTS-D.F. (40 km). 2) El modelo de Nevada no considera ninguna capa sedimentaria. 3) Las velocidades en la capa "granítica" son prácticamente idénticas. 4) En Nevada, la capa basáltica tiene un carácter transicional con un espesor promedio menor (6 km) que para el modelo OSMO (10 km).

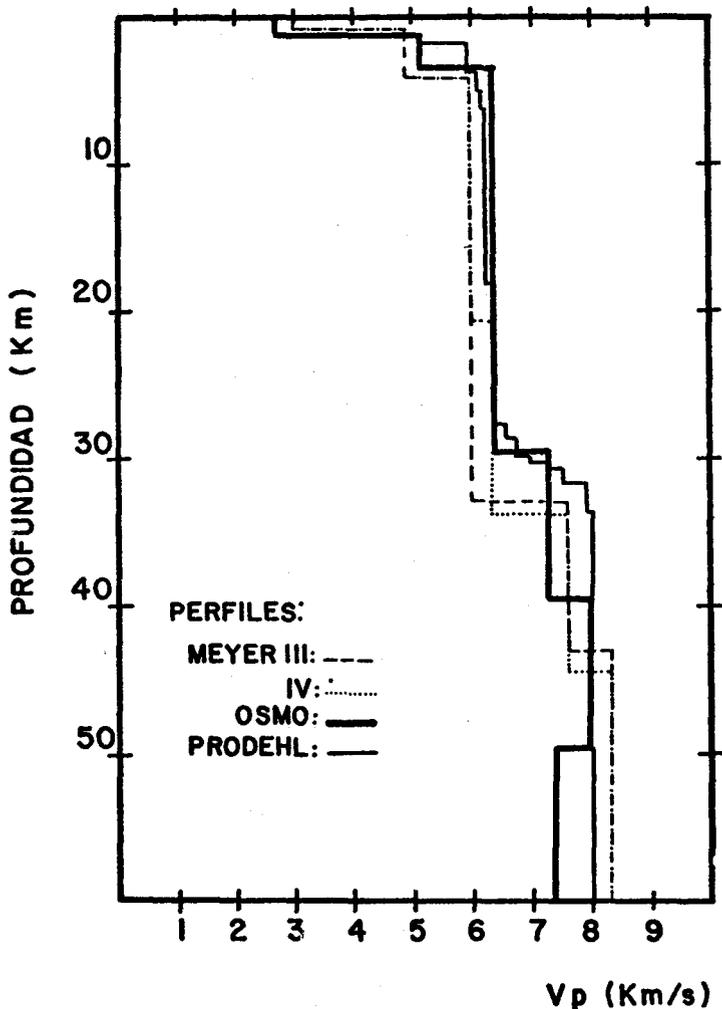


Fig. 9. Variación de la velocidad de las ondas longitudinales V_p con la profundidad, para los modelos OSMO, Nevada-Kingman (Prodehl, 1979), y núcleo de la Sierra Madre Occidental (Meyer y otros, 1961).

En la Figura 10 se muestra la curva teórica para la dispersión de la velocidad de grupo para los modelos OSMO y NTS-Kingman; esta última es típica para la provincia tectónica "Basin and Range". Ambas son semejantes, aunque los valores son un poco mayores (.05 - .1 km/s) para el perfil NTS-Kingman. Esto se explica tanto por la ausencia de sedimentos, como por las mayores velocidades del manto superior y una corteza más delgada. Según Hamilton y Myers (1966), la corteza de la provincia tectónica "Basin and Range" ha sufrido fenómenos de extensión, acompañados por

la reconstrucción de la corteza por volcanismo superficial e intrusiones profundas. No hay evidencias de que este fenómeno se hubiese presentado más al sur, a lo largo del perfil OSMO en México.

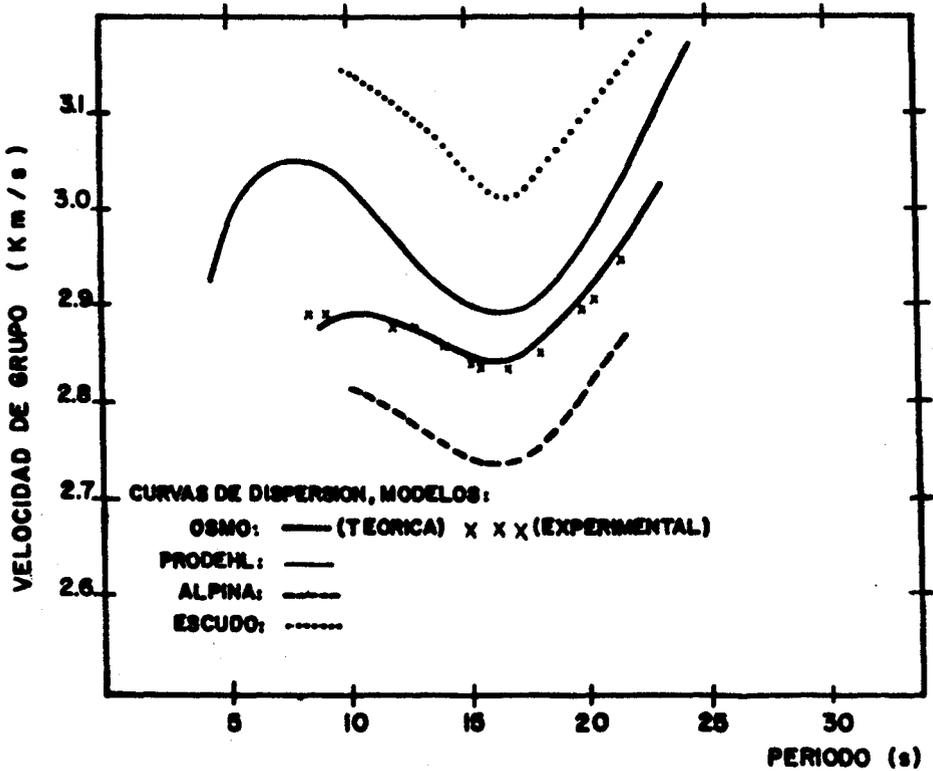


Fig. 10. Curvas de dispersión de la velocidad de grupo para el modo fundamental de las ondas superficiales de Rayleigh para los modelos OSMO, Nevada-Kingman, (Prodehl, 1979), y estructuras típicas Alpina y Escudo (Knopoff, 1966 y Brune, 1969) en comparación con los datos obtenidos para el perfil NTS-D.F.

En la misma Figura 10 se muestran curvas de dispersión teóricas para modelos de corteza Alpina (Knopoff, 1966) y de Escudo (Brune, 1969). De los resultados mostrados en esta figura se observa que la corteza para la parte oriental de la Sierra Madre Occidental es transicional entre una de tipo Alpino y otra de "Basin and Range".

En resumen, el modelo OSMO propuesto para la corteza y manto superior de la región oriental de la Sierra Madre Occidental, no está en contradicción con los resultados reportados por otros autores en las vecindades del perfil estudiado, y apoya el modelo de evolución tectónica Cenozoica propuesto por Atwater (1970) para la par-

te occidental del continente norteamericano. Por lo tanto, el modelo OSMO puede considerarse como representativo del perfil Nevada-Distrito Federal (NTS-D.F.).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Armando Cisternas, quien nos facilitó algunos de los programas de computación utilizados; a los doctores Cinna Lomnitz y Shri K. Singh, por sus comentarios y sugerencias; al personal de DETENAL que otorgó facilidades de digitalización y al Servicio Sismológico Nacional, UNAM, por permitirnos el acceso a los sismogramas.

BIBLIOGRAFIA

- ALDAZ, J. A., R. G. McINTYRE, y H. S. SLUSHER, 1981. An improved determination of the thickness of the sedimentary layer of the Sonoran Embayment. *Rev. Mex. Fís.*, 27, 129-142.
- ATWATER, T., 1970. Implications of Plate Tectonics for the cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 3513-3533.
- BRUNE, J. N., 1969. Surface waves and crustal structure, *en*: The Earth's Crust and Upper Mantle. Monograph 13, edited by P. J. Hart, pp.230-242, Am. Geophys. Union, Washington, D. C.
- Bulletin of the International Seismological Centre. Vol. 4, No. 10, y Vol. 5, No.2. Edinburgh, Scotland, 1971.
- COOLEY, J. y J. W. TUKEY, 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier Series. *Math. Comp.* 19, 297-301.
- DZIEWONSKI, A., S. BLOCH, y M. LANDISMAN, 1969. A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 427-444.
- FIX, J. E., 1975. The crust and upper mantle of Central Mexico. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 43, 453-499.
- HAMILTON, W. y W. B. MYERS, 1966. Cenozoic tectonics of the Western United States. *Rev. Geophys.*, 4, 509-549.
- HASKELL, N. A., 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 43, 17-34.
- HERRMANN, R. B., 1973. Some aspects of band-pass filtering of surface waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 663-671.
- KNOPOFF, L., S. MUELLER, W. L. PILANT, 1966. Structure of the crust and upper mantle in the Alps from the phase velocity of Rayleigh waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 56, 1009-1044.

- KNOPOFF, L., F. A. SCHWAB, y J. W. SCHULE, 1969. Dispersión de ondas Rayleigh al sur del Golfo de California. *Geofís. Int.*, 9, 39-52.
- McDOWELL, F. W. y R. P. KEIZER, 1977. Timing of Mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlán, México. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, 1479-1487.
- MEYER, R. P., J. S. STEINHART y G. P. WOOLARD, 1958. Seismic determination of crustal structure in the central plateau of Mexico. *Trans. Am. Geophys. Union*, 39, 525.
- MEYER, R. P., J. S. STEINHART, y G. P. WOOLARD, 1961. Central Plateau, Mexico, 1957, en: Explosion studies of continental structure. Carnegie Institution of Washington, Publication 622, Washington, D. C., 199-225.
- PAPAZACHOS, B. C., 1964. Dispersion of Rayleigh waves in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 54, 909-925.
- PHILLIPS, R. P., 1964. Seismic refraction studies in Gulf of California, en: Marine Geology of the Gulf of California, edited by T. H. van Andel y G. G. Shor, Jr. *Am. Assoc. Petroleum Geologists, Mem.* 3, 90-121.
- PRODEHL, C., 1979. Crustal structure of the Western United States. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 1034*, pp. 4, 25.
- SAVARENSKII, E. F., V. B. GLASKO y Ya. Sh. GRANIT, 1965. Dispersion curves of Rayleigh and Love waves as applied to two- and three- layer continental crust. *Izv., Earth Phys. Ser.*, No. 4, 38-51.
- SAVARENSKII, E. F., V. B. GLASKO, y Ya. Sh. GRANIT, 1967. The dependence of the phase and group velocities of Rayleigh and Love waves upon the parameters of a two-layered crust of the Earth. *Izv., Earth Physics*, No. 3, 35-42.
- SOSA, M. S., 1977. La determinación de la estructura de la corteza terrestre, bajo la estación sismológica UNM (Ciudad Universitaria), a partir del análisis espectral de ondas sísmicas internas. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 133 pp.
- TARR, A. C., 1969. Rayleigh wave dispersion in the North Atlantic Ocean, Caribbean Sea and Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 74, 1591-1607.
- THATCHER, W. y J. N. BRUNE, 1973. Surface waves and crustal structure in the Gulf of California region. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 1689-1698.
- THOMSON, W. T., 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *J. Appl. Phys.*, 21, 89-93.
- VALDES, C., W. MOONEY, S. K. SINGH, R. P. MEYER, C. LOMNITZ, J. H. LUETGERT, C. H. HELSLEY, B. T. R. LEWIS y M. MENA, 1985. Crustal structure in Oaxaca, Mexico, from seismic refraction measurements. *Bull. Seism. Soc. Am.* (sometido).