

# MODELOS DE CORTEZA DE LA REGION DEL CARIBE A PARTIR DE LA DISPERSION DE ONDAS SUPERFICIALES

**O'Leary Fernando González Matos<sup>1</sup>, Leonardo Alvarez<sup>2</sup>, Giuliano F. Panza,<sup>3</sup>  
Giordano Chimera.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Calle 17 # 61 Entre 4 y 6, Reparto Vista Alegre, Santiago de Cuba, Cuba 90400. C. Elect.: [oleary@sssn.ciges.inf.cu](mailto:oleary@sssn.ciges.inf.cu)

<sup>2</sup>Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Calle 212 No. 2906, e/ 29 y 31, La Coronela, Habana 35, CP 11600, Cuba

<sup>3</sup>Dipartimento de Scienze della Terra, Università di Trieste, via Weiss No. 4, Trieste 34127, Italia. C.elect.: [panza@goesun0.univ.trieste.it](mailto:panza@goesun0.univ.trieste.it)

## RESUMEN

En el presente trabajo con el empleo de herramientas del procesamiento de señales digitales (el análisis de Fourier, el filtrado de señales y el método de análisis espectro-temporal FTAN) se determinan las curvas de dispersión de la velocidad de grupo del modo fundamental de las ondas superficiales de Rayleigh, en seis registros de eventos sísmicos detectados por dos estaciones sismológicas de banda ancha ubicadas en Puerto Rico y Venezuela. Estas curvas permiten una caracterización, de forma general, del tipo de corteza por la que el tren de ondas se propagó, es decir a lo largo de sus trayectorias epicentro - estación en la región de Caribe, permitiendo establecer criterios comparativos con la caracterización dada por otros autores en la región.

Tomando las mismas como datos experimentales y haciendo uso de la teoría de inversión y aspectos de la teoría de la propagación de ondas sísmicas, en particular de las ondas superficiales de Rayleigh en medios estratificados, se realizó la inversión por el método de prueba y error, determinándose los seis conjuntos de posibles modelos de velocidades de la estructura media de la corteza y el manto superior, por la que los trenes de ondas se propagaron a lo largo de cada una de las trayectorias estudiadas. De esta forma se obtuvieron las características específicas de los mismos, dadas en valores de velocidades vs. profundidad, incluyendo el conjunto de valores en los que se intentó la inversión.

Con la aplicación de elementos teóricos empleados en técnicas tomográficas, se determinaron además las curvas de dispersión, y a partir de éstas, los modelos de velocidades que caracterizan las secciones de la corteza en tramos de trayectorias que fueron atravesados por dos (2) trenes de ondas, lográndose así un mayor grado de precisión en los resultados del procesamiento en las secciones estudiadas.

## ABSTRACT

In the present work, using some methods of the signal digital processing (the Fourier analysis, the filtering of signals and the method of frequency-time analysis – FTAN), the dispersion curves of the group velocity for the fundamental mode of the surface Rayleigh waves are determined; using six records of seismic events detected by two broad-band seismic stations located in Puerto Rico and Venezuela. These curves permit a characterization, in general term, of the type of crust by which the wave trains were propagated (i.e. along their trajectories epicenter – station) in the Caribbean region, allowing us to establish comparative criteria with the characterization given by other authors in the region.

Taking this curves as experimental data, and using the theory of inversion and some aspects of the theory of the seismic waves propagation, in particular of the surface waves of Rayleigh in layered media, it was

carried out the inversion by the trial and error method. As a result they were obtained six sets of possible velocities models of the middle structure of the crust and the mantle, by which the wave trains were propagated along each trajectory. In this way the specific characteristics of those media were obtained, given in terms of velocity vs. depth, including the set of values by which the inversion was performed.

With the application theoretical principles of tomographic studies, the dispersion curves were also determined, and starting from them, the models of velocities that characterize the crust in small regions that were crossed for two (2) wave trains, achieving a highest degree of precision in the results of the processing in the studied sections.

## **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años la región del Caribe ha sido objeto de estudio por numerosos geocientíficos, los que con tecnología avanzada y el empleo de diferentes métodos, han logrado caracterizar el área desde el punto de vista geológico y geofísico con un buen nivel de detalle, coincidiendo en reconocer su gran complejidad en ese sentido y la carencia de estudios de alta precisión en la misma.

En la actualidad en el área se dispone de estaciones de banda ancha con registros digitales que permiten un procesamiento muy preciso de los mismos, así como de ordenadores y programas de procesamiento que facilitan la obtención de curvas de dispersión de ondas sísmicas con un nivel de error mínimo con relación a la dispersión real de las ondas en el medio, por lo que con ellas es posible dar una caracterización precisa de la corteza de la región en estudio. Con el empleo de tales curvas y de potentes estaciones de trabajo, es posible además la obtención de modelos de velocidades de propagación de ondas sísmicas en el medio, a partir de la realización de la inversión de las mismas, lo que nos brinda un mayor grado de detalle con relación a las características del área en estudio.

La existencia en nuestro país de un gran volumen de registros resultado del trabajo de las estaciones del Servicio Sismológico Nacional, así como los actuales vínculos del CENAIIS con centros de datos sismológicos regionales y mundiales, permitirán no sólo que los resultados de este trabajo sean utilizados en las redes sísmicas locales y regionales, ó en estudios sismológicos en el área, en aras de precisar las características de un fenómeno que causa grandes pérdidas de vidas humanas y materiales y prevenir sus efectos, sino que abren una temática en las investigaciones sismológicas en nuestro país, teniendo utilidad como base metodológica para estudios posteriores a mayor escala y con una mayor resolución.

## **Materiales**

Para este trabajo se realizó en la búsqueda de los sismogramas de estaciones capaces de registrar con la mayor claridad posible el modo fundamental de las ondas superficiales de Rayleigh de un evento sísmico en una banda de frecuencias lo suficientemente amplia. Por ello debían ser de estaciones de banda ancha (BB...del inglés Broad Band) ubicadas en la región, y que por su tiempo de trabajo hubieran registrado eventos con alta resolución en los tipos de ondas antes mencionados. El primer paso fue

determinar que eventos cumplieran con los requisitos mínimos para nuestro trabajo e iniciar la búsqueda bajo los siguientes criterios:

Profundidad:  $h < 75\text{km}$

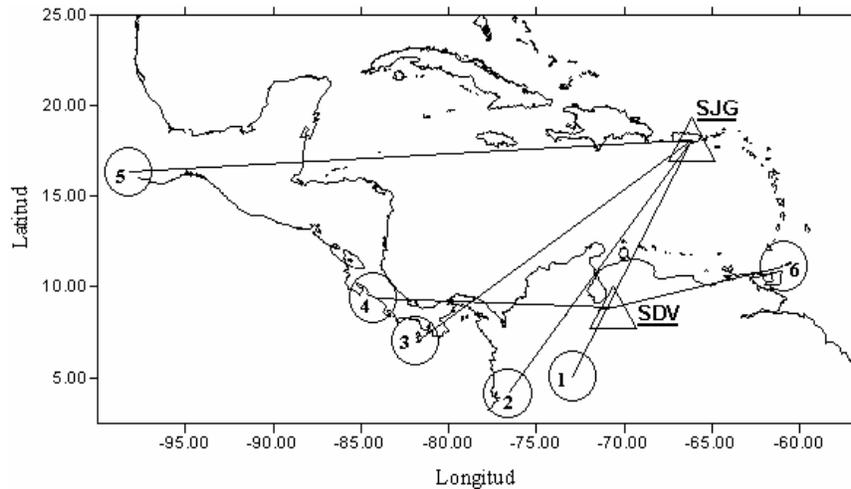
Magnitud:  $M_s > 5.0$

Latitud (Norte):  $0^\circ - 35^\circ$

Longitud (Oeste):  $50^\circ - 120^\circ$

Luego se analizó cuales de ellos pudieron haber sido registrados en las estaciones regionales y se hizo la solicitud al Centro Mundial IRIS localizado en la Universidad de Washington, EE.UU. Finalmente se analizaron los sismogramas obtenidos y se seleccionaron los que tenían un buen registro de las ondas superficiales de Rayleigh de los terremotos.

Como resultado fueron encontrados seis (6) registros de eventos sísmicos con esas características en 2 estaciones BB (ver figura 1)



**Figura 1.** Localización de las estaciones, epicentros y trayectorias utilizados en el trabajo.

**Tabla I.** DATOS DE LOS EVENTOS SÍSMICOS UTILIZADOS

Trayec.	Fecha	Lat.N	Long.W	Prof.(km)	Mag.	Dist.Epic.(km)	Localización
<b>SJG-1</b>	95/01/19	5.050	72.916	17	6.6.Ms	1628.83	Colombia
<b>SJG-2</b>	95/02/08	4.104	76.622	74	6.3Ms	1930.95	Colombia
<b>SJG-3</b>	95/02/28	6.976	81.860	21	6.0MI	2105.83	Sur de Panamá
<b>SDV-4</b>	96/09/04	9.365	84.266	33	6.1MI	1498.48	Costa Rica
<b>SJG-5</b>	97/07/19	16.333	98.216	33	6.3Ms	3409.19	Prox. Costa de Guerrero, Mexico
<b>SDV-6</b>	97/04/22	11.112	60.892	5	6.5Ms	1095.74	Islas Barlovento

**Tabla II.** DATOS DE LAS ESTACIONES DE BANDA ANCHA UTILIZADAS.

Estación	Nombre	Org. Patrocina	Latitud.N	Longitud. W	Altura(km)	Tipo
SJG	San Juan, Puerto Rico	GSN/USGS	18.1117	66.150	457	BB
SDV	Santo Dom. ,Venezuela	FUNVISIS	8.879	70.633	1518	BB

FUNVISIS... Fundación Venezolana de Sismología.

USGS... Servicio Geológico de los Estados Unidos.

GSN..... Red Sismológica Global.

Nota: Denominaremos las trayectorias con las iniciales de la estación y el número del evento.

## Métodos

Con cada uno de los registros de eventos en nuestro poder se procedió de manera similar en el procesamiento inicial:

1. El filtrado en tiempo y frecuencia con el objetivo de separar los trenes de ondas de interés de otros trenes de ondas que pudieran arribar a esas frecuencia o velocidades y que no forman parte del modo fundamental de ondas superficiales de Rayleigh.
2. El análisis en tiempo y frecuencia (FTAN) (Levshin, et.al.,1972), a partir de la técnica de filtrado múltiple (Dziewonski, et.al.,1969) permite la búsqueda de los máximos del valor absoluto de la función

$$H(t, w) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} G\left(\frac{y-w}{w}\right) F(y) e^{iyt} dy$$

donde:

$G(y)$ ... es un filtro de banda estrecha centrado en  $y=0$ .

$F(y)$ ...es el espectro de la señal de entrada.

esta función será una representación bidimensional de los valores de la amplitud espectral instantánea como función de la frecuencia y la velocidad cuyos máximos coincidirán con los valores de la curva de dispersión de la velocidad de grupo (Dziewonski & Hales, 1972).

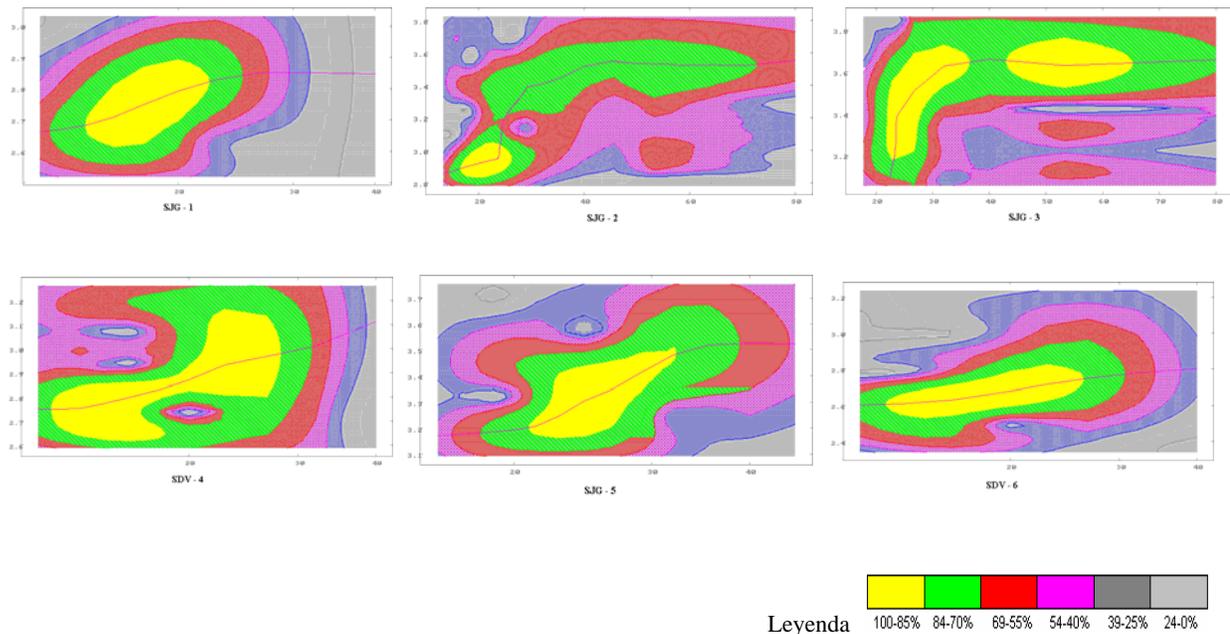
3. La comparación de las curvas de dispersión anteriormente señaladas con curvas de dispersión teóricas de los modelos de corteza típicos para caracterizar a grandes rasgos la corteza recorrida por la onda sísmica. Se utilizaron las curvas de dispersión teóricas expuestas por Russi, (1994).

4. La obtención de un modelo de velocidades inicial (cuya curva de dispersión sea similar a la experimental) para a partir de este iniciar la inversión y hallar con un mayor grado de detalle rasgos específicos de la corteza capaz de generar el tipo de ondas registrado. Se procesaron por promediación ponderada los modelos propuestos por Dengo y Case, (1990) y con el empleo del programa **RAY** (Panza, 1993) se obtuvieron las curvas teóricas.
5. La parametrización de los datos de entrada y la determinación de un paso ( $\Delta y_i$ ) para la inversión, a partir de la formulación dada por Panza, (1981). Para ello era necesario la determinación de las derivadas parciales de la velocidad de grupo en función del espesor de las capas y la velocidad de las ondas S en ellas, para cada frecuencia, lo que se hizo utilizando el programa **DER** (Panza, et.al.1980) que emplea los argumentos teóricos descritos por Rodi, (1975).
6. La inversión propiamente dicha la cual utiliza el método de prueba y error, y organiza el flujo de secciones por el método "hedhehog" desarrollado por V.Valyus (Keilis-Borok & Yanovskaya, 1967). Resulta extremadamente difícil (y conlleva a volúmenes de cálculo muy elevados) la inversión en un gran número de parámetros de la corteza, por lo que en este trabajo sólo se realizó con las velocidades de las ondas S en las distintas capas de la corteza y con el espesor de estas, considerando para algunas capas constante la relación entre las velocidades de las ondas P y S. El total de parámetros a variar sugerido por los autores es siempre menor o igual a 5 (Panza, 1981).
7. El volumen de datos experimentales a nuestra disposición al inicio de este trabajo, no nos permitía el análisis conjunto de los mismos como una red para estudios tomográficos en la región. Sin embargo, del análisis de las curvas de dispersión resultante de éstos y de la distribución geográfica de las trayectorias, resultó posible para algunos casos la interpretación conjunta de los mismos con un procesamiento similar. Esto fue posible aplicarlo para el caso de dos trayectorias cuyas curvas de dispersión evidenciaban la unión de varios tipos de corteza y eran interceptadas por una trayectoria de un solo tipo de corteza.

## Resultados

De la aplicación del análisis espectro-temporal a los registros de terremotos se obtuvieron:

- ◆ Las correspondientes curvas de dispersión de la velocidad de grupo del modo fundamental de las ondas superficiales de Rayleigh para sus trayectorias epicentro - estación en la región del Caribe, figura 1.



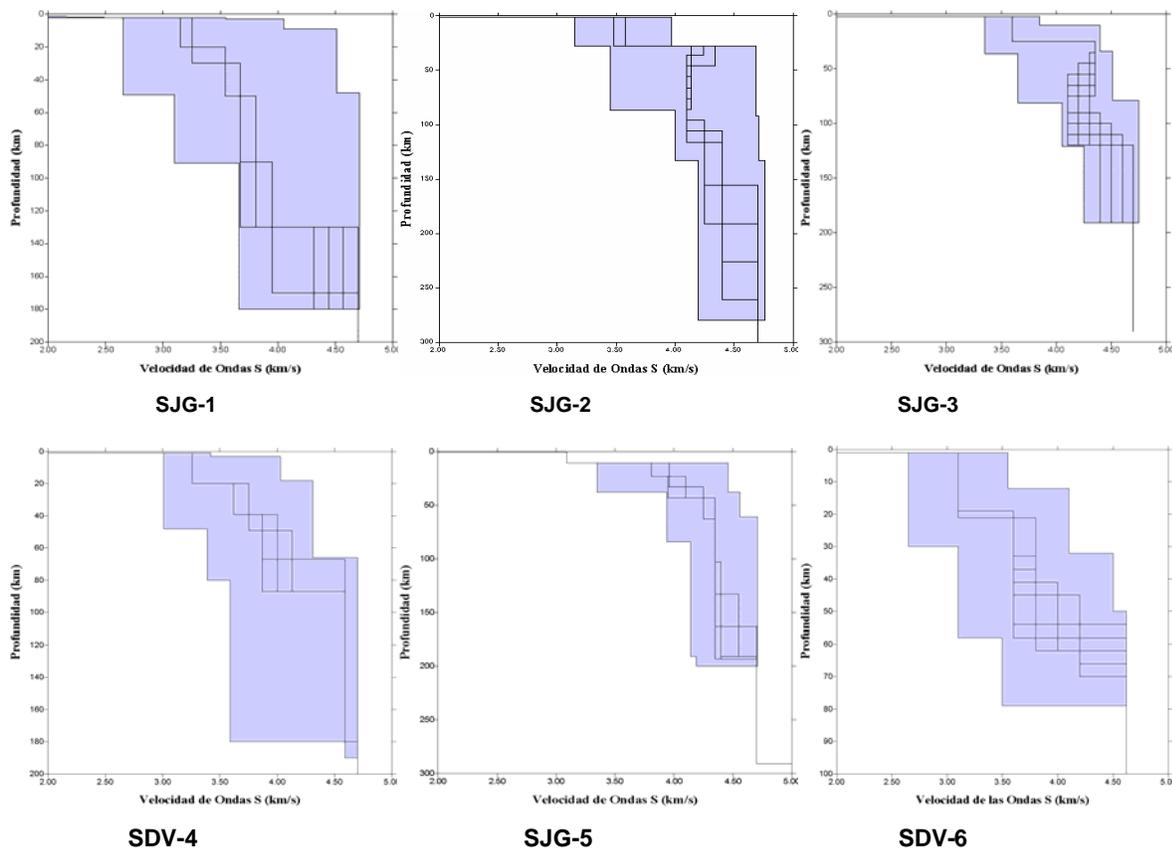
**Figura 1** Mapas y curvas de dispersión que resultan luego del proceso de filtrado en tiempo y frecuencia y la técnica de filtrado múltiple (FTAN) para cada trayectoria en estudio.

- ◆ Una caracterización general del tipo de corteza por el que el tren de ondas se propagó, que en algunos casos se ajusta a la información a priori existente sobre el tipo de corteza que atravesó, existiendo en otros ciertas diferencias. La misma se describe a continuación para cada trayectoria:
  1. SJG-1: característica de una corteza continental como habíamos predicho según los resultados de estudios anteriores. No obstante se observa una ligera influencia de corteza oceánica en los periodos cortos, probablemente motivada al atravesar una parte del Mar Caribe (Cuenca de Venezuela).
  2. SGJ-2: como habíamos predicho según los resultados de estudios anteriores es el resultado de la interferencia conjunta de distintos tipos de corteza, mostrándose un predominio de corteza continental en los periodos medios y de oceánica en los más bajos.
  3. SGJ-3: muestra un predominio casi absoluto de corteza continental en los periodos medios y bajos, siendo muy pobre la influencia de la corteza oceánica (Cuenca de Venezuela), lo que contradice las consideraciones hechas al respecto por Dengo & Case, (1990) con relación a las características de la corteza en estudio.
  4. SDV-4: es característica de una corteza continental en los periodos analizados, existiendo influencia de corteza de arco de islas coincidiendo con resultados de estudios anteriores.
  5. SJG-5: a diferencia de los resultados de estudios anteriores, existe un predominio de corteza continental en los periodos medios y sólo cierta influencia oceánica en los más bajos.

6. SDV-6: es característica de una corteza continental con influencia de arco de islas, muy similar a la primera en los periodos más bajos, coincidente con la información a priori existente.

A partir de la realización de la inversión con los modelos iniciales tomando como datos experimentales tanto las curvas de dispersión resultantes del proceso FTAN, como un modelo inicial para cada trayectoria, se obtuvo:

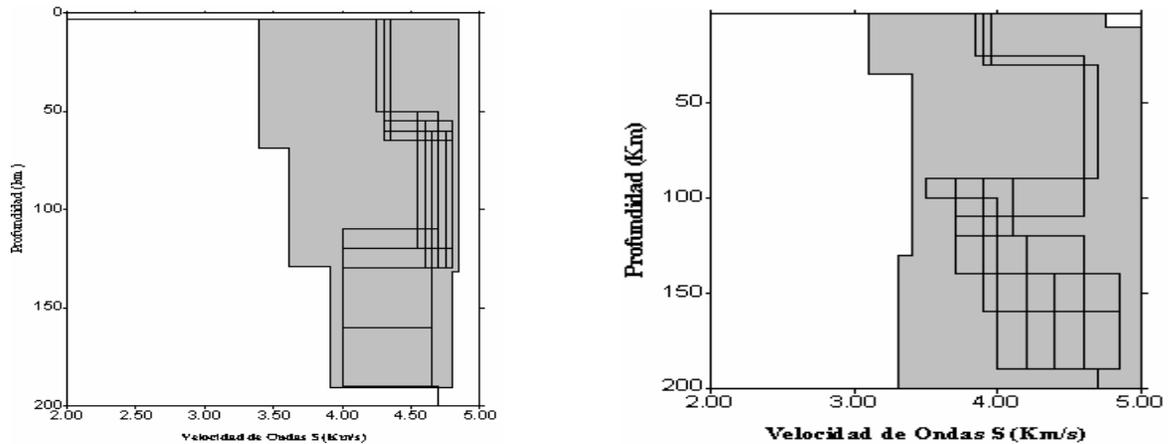
- ◆ Un conjunto de modelos de velocidades de la estructura media de la corteza y del manto superior a lo largo de cada una de las trayectorias estudiadas, en correspondencia con cada curva de dispersión, figura 2.



**Figura 2** Modelos de velocidades de la corteza obtenidos durante el proceso de inversión a partir de las curvas de dispersión para cada trayectoria (el área sombreada representa el conjunto de valores en los que se intentó la inversión).

El análisis de trayectorias combinadas permitió la obtención de curvas de dispersión y modelos de velocidades que caracterizan las secciones de la corteza que fueron atravesadas por dos (2) trenes de ondas, lográndose así un mayor grado de detalle en los resultados del procesamiento, figura 3. Los mismos se describen a continuación:

1. SJG-2 con SDV-4: el pequeño rango de valores de la misma no permite la obtención de modelos de velocidades con alta resolución, sin embargo los mismos de forma general evidencian las características oceánicas de la sección de la corteza en estudio.
2. SJG-3 con SDV-4: hasta la profundidad de 90 km se evidencian las características oceánicas de la sección de la corteza en estudio.



**Figura 3** Modelos de velocidades de la corteza obtenidos durante el proceso de inversión a partir de las curvas de dispersión combinadas de las trayectorias SJG-2 - SDV-4 y SJG-3 - SDV-4.

## Recomendaciones

La probada validez de los métodos utilizados y el aumento de las posibilidades de obtención de un mayor número de registros de banda ancha de la región, sugieren la aplicación de los mismos a un mayor número de trayectorias, lo que garantizará:

- ✓ Un mayor grado de detalle en los modelos de velocidades del área de estudio.
- ✓ La posibilidad del cálculo de la velocidad de fase entre dos estaciones lo que aumenta la precisión en los resultados.
- ✓ La realización de la tomografía sísmica de la velocidad de las ondas superficiales para la obtención de modelos de velocidades de la región.

## Bibliografía

Dengo, G.; Case, J.E. (1990) The Geology of North America. Volume H. The Caribbean Region. The Geological Society of America.

- Dziewonskii, A., Bloch, S., Landisman, M. (1969): A technique for the analysis of transient seismic signals. Bull. Seis. Soc. America, 59, pp. 427-444.
- Dziewonski A.M., Hales A.L.(1972) Numerical Analysis of Dispersed Seismic Waves. Methods in Computational Physics. Academic Press, New York. Volume 11.pp.39-84.
- Keylis-Borok, V.I., Yanovskaya, T.B. (1967): Inverse problems of seismology (structural review). Geophys. J. of the RAS, 13, pp.223-234.
- Levshin, A.L., Pisarenko, V.F., Pogrebinsky, G.A. (1972) On a frequency-time analysis of oscillations. Ann. Geophys., t. 28, fasc. 2, pp.211-218.
- Panza, G.F., Mueller, St., Calcagnile, G. (1980): Thee gross features of lithosphere-asthenosphere system in Europe from seismic surface waves and body waves. Pure and Appl. Geoph., v. 118, pp. 1209-1212.
- Panza, G.F. (1981): The resolving power of seismic surface waves with respect to crust and upper mantle structural models. En: The solution of the inverse problem in geophysical interpretation, Cassinis, R. ed., Plenum Publishing Corporation.
- Panza, G.F. (1993): Synthetic seismograms from multimode summation - Theory and computational aspects, Acta Geod. Geoph. Mont. Hung, 28, pp. 197-247.
- Panza, G.F. (1993): Structure of the lithosphere inferred from surface waves. Acta Geod. Geoph. Mont. Hung, pp. 257-288.
- 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. Seis. Soc. America, vol. 65, pp. 1105-1114.
- Russi M. , Febrer J. , Costa G., Nieto D. Y. , Panza G. F. (1994) Analysis of Digital Waveforms Recorded at the Seismographic Station Esperanza. Terra Antartica Vol. 1, pp. 162-166.