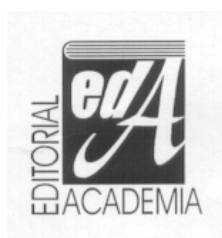


NUEVAS INVESTIGACIONES SISMOLOGICAS EN CUBA

**Editores: Tomás J. Chuy Rodríguez
Leonardo Álvarez Gómez**



La Habana, 2002

ESTUDIO TOMOGRÁFICO DE LA ESTRUCTURA DE LA CORTEZA Y DEL MANTO SUPERIOR EN LA REGIÓN DEL CARIBE MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA DISPERSIÓN DE LA VELOCIDAD DE GRUPO DE LAS ONDAS SUPERFICIALES DE RAYLEIGH

O'Leary González, Leonardo Alvarez, Giuliano F. Panza, Giordano Chimera

RESUMEN

Un esquema general de la estructura de la corteza superior y el manto de la región de Centro América y el Caribe es presentado como resultado del procesamiento de mas de 200 sismogramas de trazas epicentro-estación grabadas por estaciones digitales de banda ancha del Sistema del Servicio Sismológico Nacional de Cuba y de la Red Sísmica Mundial GSN. Mediante el análisis FTAN (Levshin et al.,1972,1992) de ondas superficiales de Rayleigh, las curvas de dispersión de su modo fundamental de oscilación fueron obtenidas para periodos entre 10 s y 40 s con un error de las mediciones realizadas que osciló entre 0.06 y 0.09 Km/seg.

A partir de estas curvas de dispersión fueron obtenidos 7 mapas tomográficos para diferentes periodos y con resolución espacial de 400Km y de la regionalización de los mismos fueron identificadas 5 regiones principales. El valor medio de las curvas de dispersión obtenidas para cada región fue invertido por el método no lineal "hedgehog" (Valyus,1968) y se obtuvieron los correspondientes modelos de velocidades vs profundidad para las ondas S en la corteza y el manto superior.

Como resultado de este proceso se detectó, que la profundidad del Moho varía en un rango entre 23 y 35 Km en las regiones 1 y 2, donde está presente un tipo de corteza acrecionaria, mientras que en las regiones 4 y 5 esta profundidad es de alrededor de 25 Km en correspondencia con la presencia de dos tipos de corteza, la oceánica y la acrecionaria (Dengo y Case, 1982).

La región 3 presenta un espesor de 10 Km en la corteza y se evidencia un canal de baja velocidad en el manto motivado por la presencia de la joven Cresta de Caimán. Otros rasgos característicos evidenciados son la presencia de canales de baja velocidad en la corteza de las regiones 2 y 5.

ABSTRACT

An overview of the crust and upper mantle structure of the Middle America and Caribbean region is presented as a result of the processing of more than 200 trace epicenter-station seismograms recorded by digital broadband station from SSSN and GSN seismic networks. By FTAN (Levshin et al.,1972,1992) processing of Rayleigh surface waves, group velocity dispersion curves of its fundamental mode are obtained in the period from 10 s to 40 s. The error of the measurements ranges from 0.06 and 0.09 Km/s.

From these dispersion curves, 7 tomographic maps for different periods and with average spatial resolution of 400 Km. are obtained and from a regionalisation of the tomographic maps, 5 main regions were identified. The mean dispersion curves obtained for each region have been inverted by the non-linear procedure "hedgehog" (Valyus,1968) and the corresponding S-wave velocity models vs. depth in the crust and upper mantle were found.

The Moho depth varies in the range (23 – 35 Km) in regions 1 and 2, where accretionary type of crust is present, while in regions 4 and 5 it is about 25Km, in agreement with the presence of mixed oceanic-accretionary types of crust (Dengo and Case, 1982). In region 3 the crust thickness is less than 10Km and a shallow low

velocity channel in the mantle is evidenced, in agreement with presence of the young Cayman Ridge. Other interesting features can be observed in the models of inversion, amount which the more significant is the presence of a well developed low velocity channel in the crust of regions 2 and 5.

PALABRAS CLAVE: ondas de Rayleigh, dispersion, tomografía, estructura de la corteza

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 Sistema Servicio Sismológico Nacional (SSSN), así como los actuales vínculos del CENAIIS con centros de datos sismológicos regionales y mundiales, permite que los resultados de este trabajo sean utilizados en las redes sísmicas locales y regionales, ó en estudios sismológicos en el área, en aras precisar las características de un fenómeno que causa grandes pérdidas de vidas humanas y materiales y prevenir sus efectos.

MATERIALES

Para este trabajo se realizó en la búsqueda de los sismogramas de banda ancha (BB, del inglés Broad Band) ubicadas en la región, y que por su tiempo de trabajo hubieran registrado eventos con alta resolutiveidad en los tipos de ondas antes mencionados, bajo los siguientes criterios:

Profundidad: $h < 75km$

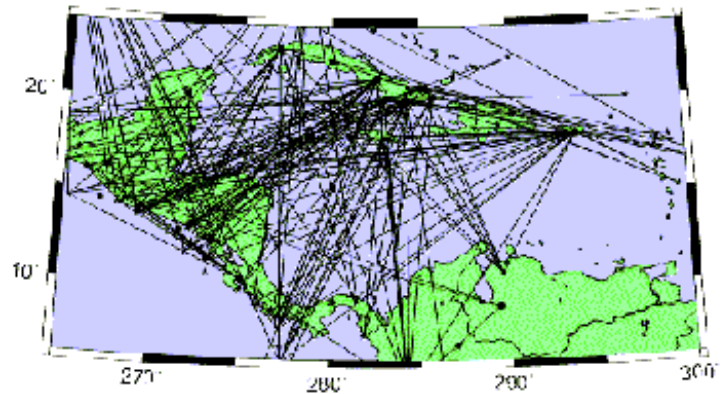
Magnitud: $M_S > 5.0$

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

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

Se analizaron los sismogramas de estaciones cubanas y/o regionales (obtenidos estos últimos del Centro Mundial IRIS localizado en la Universidad de Washington, E.E.U.U.) y se seleccionaron los que tenían un buen registro de las ondas superficiales de Rayleigh de los terremotos. Como resultado fueron encontrados (205) registros de eventos sísmicos con esas características en 13 estaciones BB (Fig. 1).

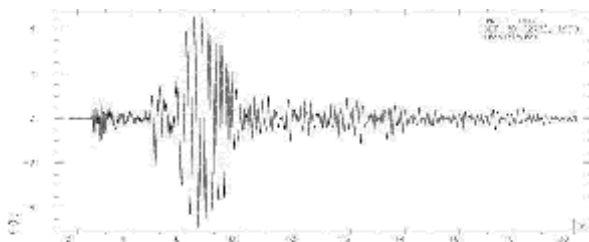
Figura 1. Trayectorias epicentro – estación utilizadas en el trabajo.



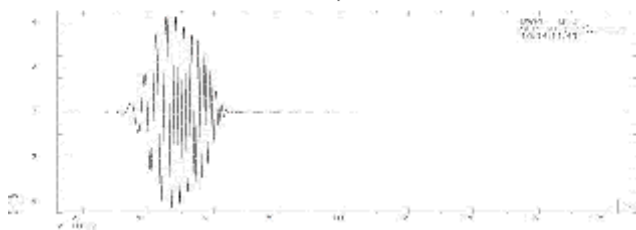
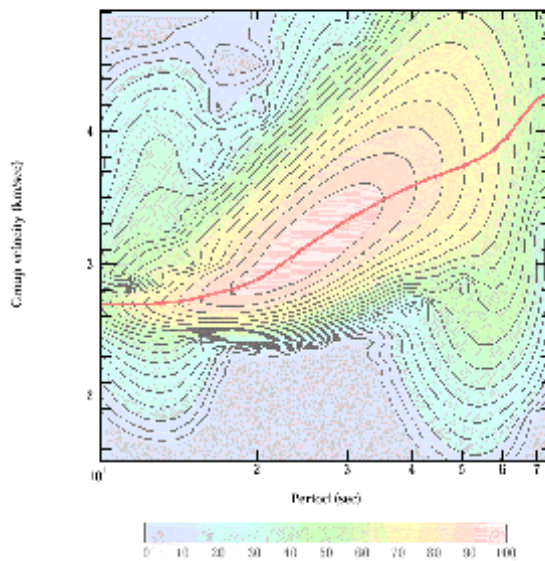
RESULTADOS

a) Determinación de las curvas de dispersión

Los sismogramas fueron sometidos a un análisis en tiempo y frecuencia (FTAN) (Levshin, et.al.,1972,1992) (Fig. 3), a partir de la técnica de filtrado múltiple (Dziewonski, et.al.,1969), la cual se basa en la búsqueda de los máximos del valor absoluto de la función



FTAN



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

donde $G(y)$ es un filtro de banda estrecha centrado en $y=0$ y $F(y)$ 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 y Hales, 1972).

En la Fig. 2 se muestra un ejemplo de este proceso, que podemos resumir de la forma siguiente. La señal original es filtrada en tiempo y frecuencia para acotar el espacio de trabajo. La señal filtrada es usada para calcular la función $H(t, w)$, cuya representación gráfica se denomina mapa FTAN. Sobre este mapa se identifican las zonas de máximo, y a lo largo de ellas se repite el filtrado, acotando aún más el espacio de trabajo. Como resultado de esto se identifica la señal pura del modo fundamental de la onda de Rayleigh y se determinan los valores de su curva de dispersión $u(w)$.

Figura 2. Análisis FTAN (referencias en el texto).

b) Análisis tomográfico de la velocidad de grupo de las ondas de Rayleigh en el Caribe.

Para el análisis tomográfico se utilizó la metodología descrita en (Ditmar y Yanovskaya, 1987; Yanovskaya y Ditmar, 1990; Yanovskaya, 1997), mediante el programa SWT_DY, confeccionado por estos autores. La resolución de los resultados finales depende del grado de cubrimiento de la región de estudio que tengan las trayectorias epicentro-estación disponibles, por lo que no es uniforme dentro de ella. Esta se calcula para cada punto en forma de una elipse que engloba el área efectiva de suavizamiento, y se expresa por dos parámetros, uno en Km. que simboliza la mínima distancia que el método es capaz de diferenciar, y otro adimensional que indica el grado de alargamiento de las elipses (Fig.3.). Este último (que en la figura se simboliza por ex) cuando es pequeño corresponde a una orientación más o menos uniforme a lo largo de todas las direcciones, y cuando excede el valor 1 corresponde al caso de las trazas que tienen una orientación preferencial, y por tanto la resolución a lo largo de ellas es pequeña.

Como resultado de este análisis se observa una resolución de 400 Km en la región del Caribe centro-occidental, las Antillas Mayores y el sur de Centro América, con valores de $ex \leq 1$. Esta resolución es superior a la obtenida por Vdovin et al. (1999) para esta área de estudio y ello se debe fundamentalmente a la inclusión en este trabajo de las estaciones del SSSN, no usadas por esos autores.

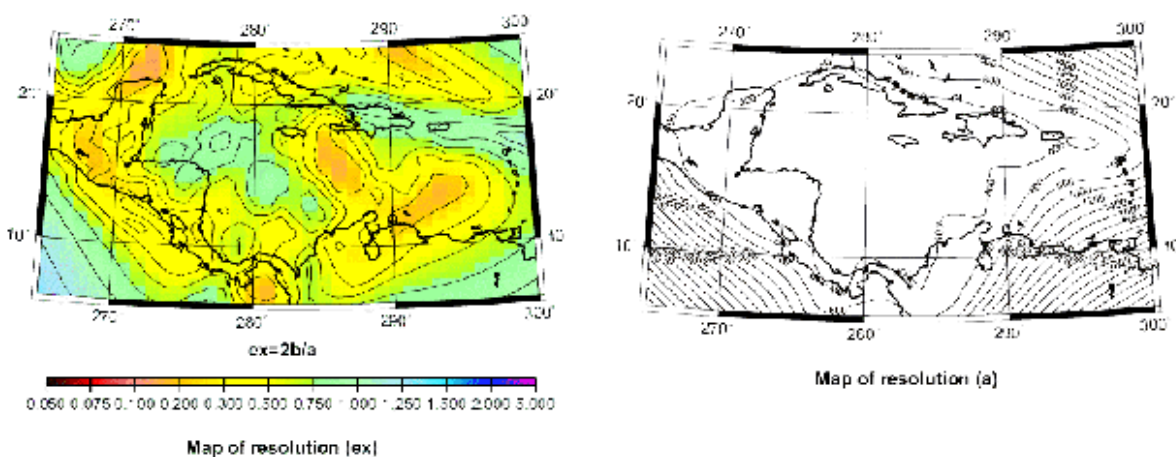
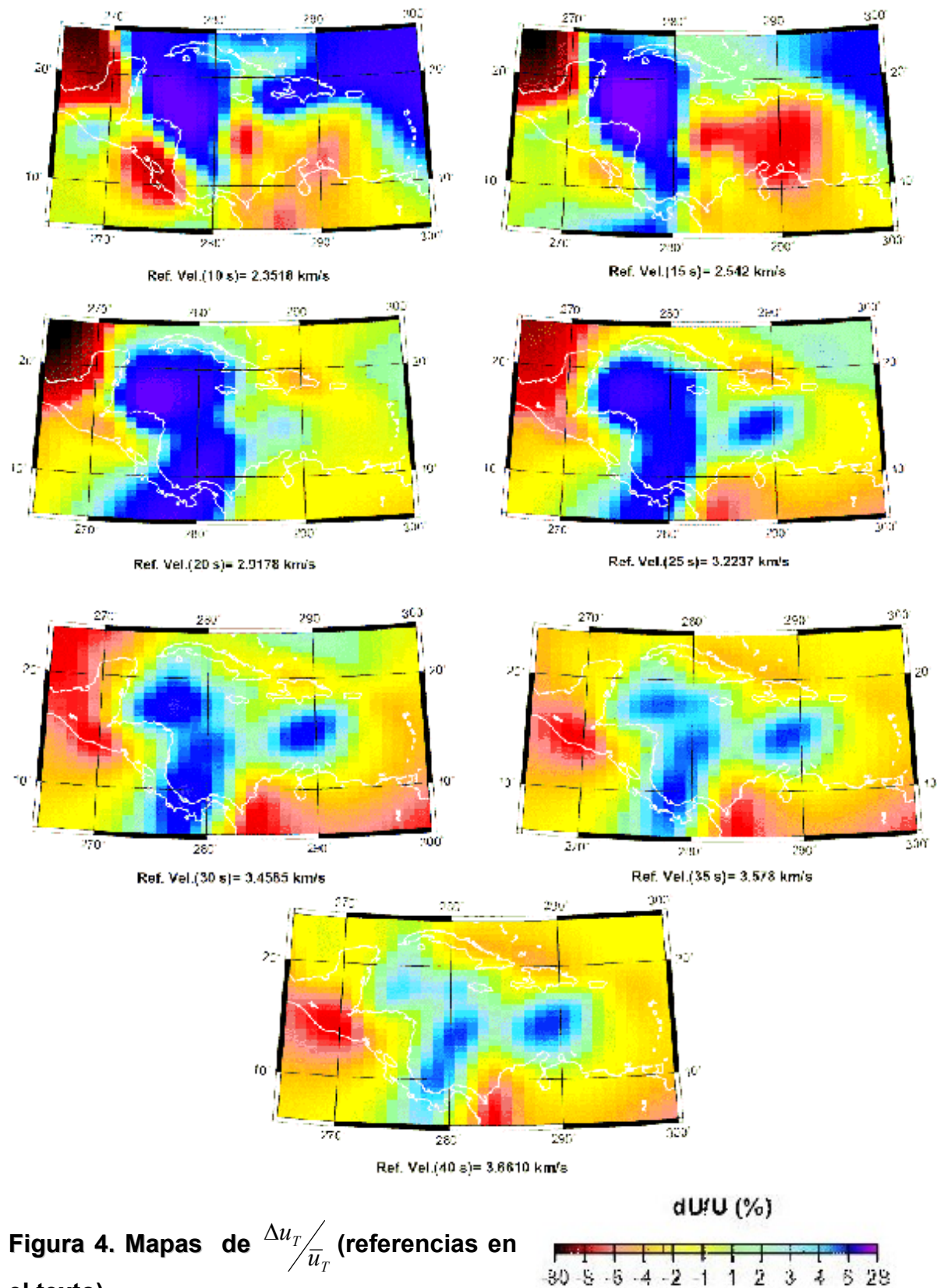


Figura 3. Resoluciones obtenidas durante el procesamiento tomográfico (referencias en el texto)

Los datos de las 205 curvas de dispersión fueron cifrados en el rango de 10 a 40 seg. a intervalos de 5 segundos. Para cada uno de ellos se construyó un mapa tomográfico de la distribución espacial de la velocidad de grupo a ese período $u_T(x,y)$, en celdas de 1° de longitud y 0.5° de latitud. Como es habitual en este tipo de mapa, no se presentan los valores absolutos del parámetro u_T , sino la desviación relativa (en %) con respecto a su valor medio para toda la región ($\Delta u_T / u_T$). En la Fig. 4 se presentan los mapas obtenidos.

Una inspección visual de estos mapas permite evidenciar la presencia de zonas con un comportamiento aproximadamente uniforme de la dispersión de la velocidad de grupo en las celdas que la componen. Para delimitar espacialmente dichas zonas a partir de sus valores u_T se realizó un análisis de "agrupamiento" en los gráficos de velocidad de grupo vs. latitud y velocidad de grupo vs. longitud, el que permitió determinar los intervalos de u_T que determinaban cada zona. En cada región, para

cada intervalo de u_T , se determinó su valor medio y la dispersión estándar. El valor medio fue usado como valor experimental para el proceso de inversión. El error asociado a cada valor medio se tomó igual a su desviación estándar, siempre que ésta fuese menor que el error de medición experimental asociado al período correspondiente. En los casos aislados en que no se cumplía esta condición, se tomó como error asociado para la inversión el error de medición experimental.



c) Estructura de la corteza y el manto superior en la región del Caribe

Para el proceso de inversión se utilizaron como modelos iniciales los obtenidos por González et al (2000). La parametrización de los datos de entrada y la determinación de un paso (Δy_i) para la inversión se realizó tomando en consideración 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 utilizando el programa *DER* (Panza, et. al.1980) que emplea los argumentos teóricos descritos por Rodi, (1975).

El programa de inversión utilizado es del tipo de prueba y error, y organiza el flujo de secciones por el método “hedhehog” (Valyus, 1968). Resulta extremadamente difícil (y conlleva 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 éstas, considerando para algunas capas constante la relación entre las velocidades de las ondas P y S. Además de esto, es este parámetro el que mayor influencia ejerce sobre la curva de dispersión de la velocidad de grupo. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5.

DISCUSIÓN

Los mapas tomográficos obtenidos evidencian la heterogeneidad geotectónica de la región del Caribe, motivada por la compleja evolución geológica de la misma donde están presentes bloques mezclados de diferente composición, génesis y edad (Arango, 1996). En este sentido se debe señalar que la zona mas joven se corresponde con la Cresta de Caimán donde se produce en la actualidad un proceso de formación de corteza oceánica.

Tanto los valores de velocidad de grupo presentes en los mapas tomográficos como las estructuras obtenidas evidencian un predominio de la corteza oceánica en la región estudiada con alguna influencia de corteza acrecionaria en determinadas regiones.

La profundidad del Moho varía en un rango entre 23 y 35 Km. en las regiones 1 y 2, donde está presente un tipo de corteza acrecionaria, mientras que en las regiones 4 y 5 esta profundidad es de alrededor de 25 Km en correspondencia con la presencia de dos tipos de corteza, la oceánica y la acrecionaria (Case y Dengo, 1982).

En particular, la región 3 posee un espesor de 10 Km. en la corteza y presenta un canal de baja velocidad en el manto motivado por la presencia de la joven Cresta de Caimán. Canales de baja velocidad están presentes también en la corteza de las regiones 2 y 5.

Con relación a otros trabajos previos (Vdovin et al., 1999; González et al., 2000) en el presente se logra un mayor nivel de conocimiento de la región estudiada, tanto en lo que respecta a la resolución espacial de las velocidades como a la obtención de modelos de corteza asociados a cada una de las curvas características de las zonas delimitadas.

CONCLUSIONES

1. Se realizó un estudio tomográfico de la velocidad de grupo del modo fundamental de las ondas de Rayleigh en el rango de 10 a 40 segundos en el Caribe centro-occidental que mejora apreciablemente el conocimiento sobre este tema, por el mayor grado de detalle alcanzado.
2. Se identificaron 5 zonas en cuyo interior el comportamiento de la velocidad de grupo es semejante, y para cada una de ellas se determinó, mediante inversión, la estructura de la corteza y el manto superior.

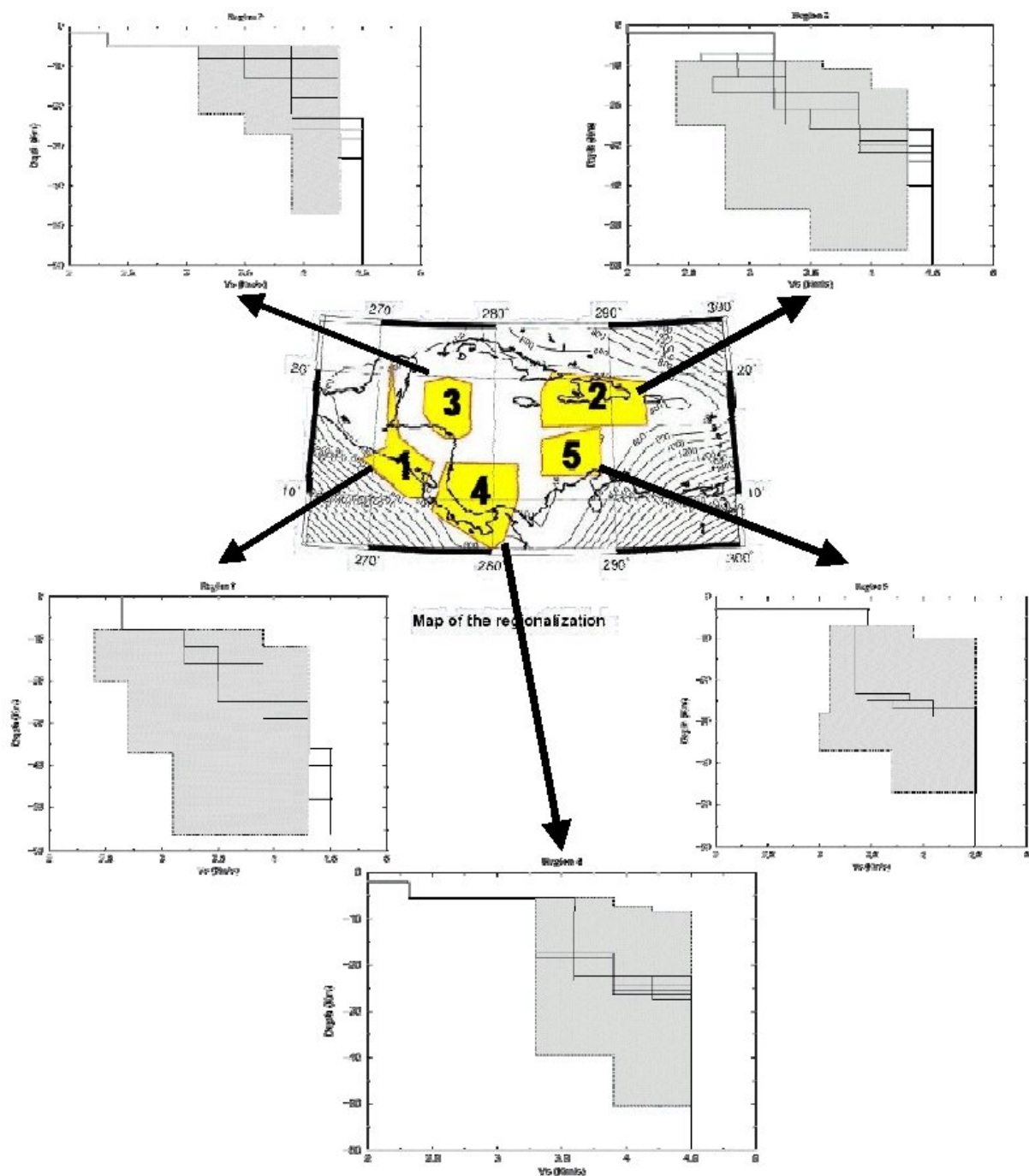


Figura 5. Regionalización en función de la velocidad de grupo y estructuras asociadas a cada zona determinada (referencias en el texto)

3. La profundidad de la discontinuidad de Mohorovicic varía en un rango entre 23 y 35 Km en las regiones 1 y 2, donde está presente un tipo de corteza acrecionaria, mientras que en las regiones 4 y 5 esta profundidad es de alrededor de 25 Km en correspondencia con la presencia de dos tipos de corteza, la oceánica y la acrecionaria (Case y Dengo, 1982).
4. La región 3 presenta un espesor de 10 Km en la corteza y se evidencia un canal de baja velocidad en el manto motivado por la presencia de la joven Cresta de Caimán. Otros rasgos característicos evidenciados son la presencia de canales de baja velocidad en la corteza de las regiones 2 y 5.

BIBLIOGRAFÍA

- ARANGO, E. (1996): Geodinámica de la región de Santiago de Cuba en límite de las Placas de Norteamérica y el Caribe. Tesis en opción al Grado de Master en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. 111pp.
- DENGO, G.; CASE, J.E. (1990) The Geology of North America. Volume H. The Caribbean Region. The Geological Society of America.
- DITMAR, P.G.; YANOVSKAYA, T.B.(1987), A Generalization of the Backus-Gilbert Method for Estimation of Lateral Variations of Surface Wave Velocity, *Izv.Akad. Nauk SSSR, Fizika Zemli* 6, 30-60.
- 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.
- GONZALEZ, O.; ALVAREZ, L., PANZA, G.F.; CHIMERA, G. (2000): Modelos de corteza de la región del Caribe a partir de la dispersión de ondas superficiales. Publicación electrónica "Memorias de Geoinfo", ISSN 1028-8961, 13 pp.
- 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.
- LEVSHIN, A.L., RADNIKOVA, L.I., AND BERGER, J. (1992): Peculiarities of surface wave propagation across Central Eurasia, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 82, 2464-2493
- PANZA, G.F., MUELLER, ST., CALCAGNILE, G. (1980): The 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.
- 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.
- VALYUS, V.P. (1968): Determinación de perfiles sísmicos por un conjunto de observaciones (en ruso). *Vychislitel'naya Seismologiya*, No. 4, pp. 3-14. Traducción en inglés: "Determining seismic profiles from a set of observations", en *Computational Seismology*, ed. V.I. Keylis-Borok, Consultants Bureau, 1972, pp. 114-118.
- VDOVIN, O., RIAL, J.A., LEVSHIN A.L. Y RITZWOLLER, M.H. (1999): Group-velocity tomography of South America and the surrounding oceans.*Geophys.J.Int.* 136, 324-340.
- YANOVSKAYA, T.B. (1997), Resolution Estimation in the Problems of Seismic Ray Tomography, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 33, 9, 762-765.
- YANOVSKAYA, T.B.; DITMAR, P.G. (1990): Smoothness Criteria in Surface Wave Tomography, *Geophys.J.Int.* 102,63-72.