

SISMICIDAD ASOCIADA AL POSIBLE INICIO DEL ARCO SUBDUCTIVO DE LAS ANTILLAS MENORES

SEISMICITY ASSOCIATED TO THE POSSIBLE ONSET OF THE SUBDUCTIVE ARC OF THE LESSER ANTILLES

FRANCISCO BONIVE, AMERICO MONTILLA Y JORGE ROJAS

Universidad de Oriente, Centro de Sismología, Cumaná, Venezuela.

RESUMEN

Se identifica la zona de cambio de régimen sísmico, de subductivo (profunda), a rumbo deslizando (superficial) en la esquina sur oriental de la placa del Caribe. Se utilizaron 1226 sismos registrados por la Red Sismológica Nororiental de Venezuela (**ReSUDO**), administrada por el Centro de Sismología de la Universidad de Oriente (**CSUDO**), en el periodo de 1995 a 2001, ubicados entre las coordenadas 9 y 12 N, y 61 y 64 W. Se dividió esta región en cinco sectores paralelos y tres perpendiculares a la dirección noroeste sureste. Las secciones rectangulares paralelas son aproximadamente de 200 por 60 kilómetros cuadrados, mientras que los perpendiculares son de poco más o menos 350 por 60 kilómetros cuadrados. Obteniéndose por separado los perfiles de sismicidad en ambas direcciones, para así detectar dónde la profundidad sísmica cambia. Se observa en los segmentos paralelos a la dirección NO-SE una sismicidad profunda centrada en 10,2° N y -62,8 W que por su distribución y profundidad parece corresponder a la zona oriental del **Corrimiento de Pedernales** con un buzamiento promedio de 40° al noroeste. Las profundidades se incrementan hacia el Noreste del sistema de fallas de **El Soldado – Los Bajos**, identificados como el límite entre el régimen superficial (rumbo deslizando) y el más profundo (subductivo), teniendo este grupo de fallas una actividad delimitada hasta los cuarenta kilómetros de profundidad. El último de los segmentos paralelos presenta un evento de magnitud 6,5 y profundidad de 40 kilómetros, característico de una zona de subducción, que parece buzarse al noreste con un acimut de 350°. Se usaron dos métodos gráficos para evidenciar la frontera entre los regímenes, en primer lugar un representación en contornos de la profundidad media (análisis espacial) y en segundo lugar, un corte promedio por perfil.

PALABRAS CLAVES: Sismicidad, Subducción, Antillas menores, Sismología, Venezuela.

ABSTRAC

Using the data base of the Venezuelan Northeastern Seismological Network (ReSUDO for its Spanish acronym), which is under the administration of the Seismology Center of the Universidad de Oriente (CSUDO), we were able to identify the zone of seismic regime change, from subduction, or deep seismicity, to dextral, or shallow seismicity in the southeastern corner of the Caribbean plate, an area located between latitudes 9 and 12 N and longitudes 61 and 64 W. The study was carried out from 1995 to 2001 with the data from 1226 seismic tremors registered by the aforementioned network. The area was divided in five parallel and three perpendicular zones to the northwest-southeast direction, the former measuring about 200 by 60 square kilometers and the latter about 350 by 60 square kilometers. Separate seismic profiling in both directions enabled us to identify where the seismicity changes from shallow to deep. A deep seismicity centered at 10.2°N and 62.8 W is observed in the parallel segments, its distribution and depth seemingly corresponding to the eastern zone of the Pedernales Thrust system with a northwestward mean deep of 40°. The depths of the foci increase northeastward from the El Soldado-Los Bajos fault system, which borders on both seismic regimes and whose activity reaches a depth of 40 km. Typical of a subduction area, seemingly thrusting in a northeasterly direction with an azimuth of 350°, the last of the parallel segments shows an event with a 6.5 magnitude at a depth of 40 km. Two graphic methods were used to map the boundary between the regimes, namely, a contour representation of mean depth (spatial analysis), and an average activity profiling breakdown.

Key words: Seismicity, subduction, the Lesser Antilles, Seismology, Venezuela

INTRODUCCIÓN

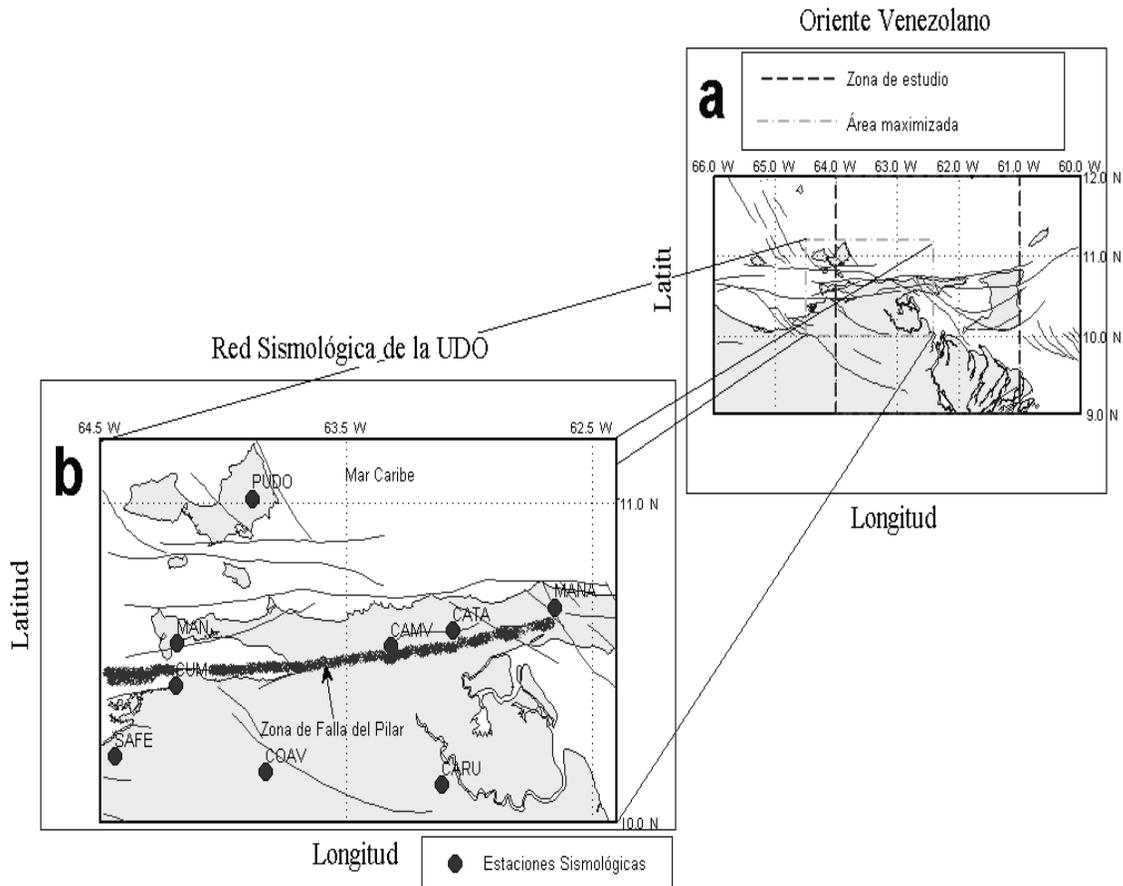
La región sur-oriental de la placa del Caribe está caracterizada por la transición entre dos regímenes tectónicos. La zona más septentrional está caracterizada por un sistema de fallas rumbo deslizantes dextrales, siendo la falla El Pilar el eje del sistema, reconocida como parte de la frontera entre la placa Caribe y la Suramericana (Molnar y Sykes 1969). El régimen oriental, ubicado al inicio del arco de las Antillas Menores, tiene una zona de subducción bastante conocida (Minster y Jordan 1978; Speed *et al.* 1991; Russo y Speed 1992). Las pruebas geológicas evidencian una incrustación de la corteza oceánica atlántica por debajo de la Suramericana en dirección noroeste-este y con la placa del Caribe de este a oeste (Russo *et al.* 1993), moviéndose a una velocidad relativa promedio de 1,5 a 2,0 cm/año (Schubert 1981).

Debido a lo anterior es de esperarse en la región una convergencia de los dos procesos subductivos, más el proceso de deslizamiento de rumbo entre las placa del Caribe y la Suramericana. La región donde convergen

estos sistemas tectónicos está muy discutida debido a lo controversial de las evidencias. La contradicción más importante aparece por la prolongación hacia el este, de la zona rumbo deslizante (demostrada por pruebas geológicas) hasta una región en la que se localizan eventos con profundidades superiores a los cien kilómetros, actividad característica de una zona subductiva. Es evidente que esta confluencia de distintos regímenes tectónicos en el mismo sitio, convierten a la zona en un centro de disparo sísmico tipo nido, como lo evidencian los registros históricos e instrumentales.

La delimitación confiable de ésta zona de transición entre los dos regímenes, es un trabajo en el que numerosos investigadores han orientado sus esfuerzos.

En la presente investigación usaremos la sismicidad local de la región para delimitar la zona subductiva. Zona escogida para evaluar la actividad sísmica se puede observar demarcada en lo siguientes mapas (a), por los trazos discontinuos (--) y también se señalo un área que se maximiza en la figura 0 que se señala como b, en la que se señala le red de estaciones sismológicas.



DATOS Y MÉTODOS

Se utilizaron 1226 sismos registrados por la Red Sismológica Nororiental de Venezuela (**ReSUDO**), administrada por el Centro de Sismología de la Universidad de Oriente (**CSUDO**), durante los años 1995 a 2001, entre las coordenadas 9.5 y 12 N y 61 y 64 W (figura 1), con profundidades hasta 124 km y registrados por un mínimo de cuatro estaciones sismológicas. Cronológicamente los sismos se presentaron de la siguiente manera:

Tabla 1: Número de eventos utilizados en estadística anual de actividad.

AÑO	NUMERO DE EVENTOS
1995	24
1996	65
1997	362
1998	221
1999	125
2000	161
2001	92

Este trabajo se desarrolló en dos etapas, la primera consistió en la obtención y procesamiento primario de la data, lo cual involucró la selección de eventos con profundidades más confiables (relocalización conjunta con el Joint Hypocenter Determinator), este tipo de algoritmo de localización conjunta (Velest, en el Seisan, Havskov y Ottemöller, 1999) prácticamente no depende del modelo de corteza y la precisión de la localización obedece más a los tiempos de arribo de las fases P y S por lo tanto es el más confiable de todos los métodos y la segunda fue el desarrollo de métodos gráficos que permitieran apreciar la evolución espacial de la profundidad de los focos sísmicos.

La zona en estudio se dividió en 5 segmentos paralelos y 3 perpendiculares a la dirección noroeste-sureste, que se considero como la línea de corte entre el régimen superficial, lateral dextral, y la subducción. Esto está claramente demarcado en la figura 1 con la línea aproximada L1-L2, la cual corresponde al límite entre los segmentos CL2 y CL3 (figura 2c). Se realizaron adicionalmente dos perfiles verticales de toda la sismicidad de la región de estudio (figura 2a y 2b) en latitud y longitud, y representaciones gráficas para observar la distribución espacial de la profundidad hipocentral.

Las figuras (3 y 4) corresponden a una representación en curvas de contorno basadas en la profundidad promedio, esta se realizó en áreas 10 kilómetros de largo

y el ancho del segmento, en otras palabras, la ponderación se realiza a lo largo de los sectores, tanto transversales como longitudinales en intervalos de 10 kilómetros.

Las desventajas inherentes a este procedimiento se pueden clasificar en dos grupos, las asociables al método de interpolación matemática usada, principalmente en relación con lo esparcido de la data sísmica que produce huecos en las distribuciones espaciales y las relativas a la confiabilidad propia de la data sísmica, la cual es afectada por problemas de localización que perturban fundamentalmente a la profundidad. Esto puede influir en los resultados de manera diversa, por ejemplo, un evento de cien kilómetros de profundidad promediado con tres superficiales dará aproximadamente 25 kilómetros, que es lo mismo que promediar cuatro con 25 kilómetros de profundidad y es claro cada uno refleja una actividad muy distinta, en otras palabras, un evento con una altísima mal calculada profundidad puede producir un espejismo que desaparecería la actividad superficial en la representación. Para evitar demasiada incertidumbre en las conclusiones de la presente investigación, se le otorgó un peso mayor al análisis clásico del perfil de profundidades, el cual sirvió de patrón para las observaciones basadas en estas representaciones. Además este método, tiende a producir representaciones un poco desplazadas geográficamente de las observaciones evidenciadas por los perfiles ya que el promedio está en el medio del intervalo del segmento y si el cambio de profundidades no es muy marcado parecerá que este se contrae; a pesar de esto, la confiabilidad aumenta cuando los gradientes de la profundidad alcanzan tendencias espaciales bien definidas. En estas “tomografías o representaciones 3D” se construyen con gráficas en las que los matices se oscurecen a medida que la profundidad aumenta. Esta representación en intensidades de gris se dibujó en el plano horizontal de epicentros. Adicionalmente, para evidenciar la tendencia epicentral de la actividad sísmica se promedió los epicentros por segmento y sector (figura 5, A y B). No se colocó la equivalencia entre las escalas de grises y la profundidad porque lo que interesa es la tendencia en el segmento y no la exactitud de las medidas, en especial de la profundidad.

RESULTADOS

Como se puede observar en la figura 1 la profundidad aumenta hacia el noreste de la línea L1-L2. Al evaluar esto con los cortes totales (figura 2a y 2b) notamos que concuerda perfectamente

con la distribución de la actividad caracterizada por profundidades superiores a los 42 kilómetros. También se puede apreciar una zona asísmica entre los 42 y 50 kilómetros de profundidad.

Los rectángulos de la figura 2c y 2d son segmentos de 200x60 kilómetros para los paralelos y de 350x60 kilómetros para los perpendiculares. Se detallarán los cortes paralelos a continuación:

- 1) Corte paralelo 1 (CL1, figura 3): se puede observar que la actividad es mayor en el extremo norte del mismo con una sismicidad netamente superficial vinculable al terremoto de Cariaco de 1997 (replicas), esta actividad parece estar demarcada por una zona de buzamiento hacia el noreste observada también en la representación 3D que visualiza un incremento de la profundidad hacia el sureste.
- 2) En el corte CL2 (figura 3) se evidencia un aumento de la actividad con respecto al perfil anterior, consolidándose los eventos asociados al terremoto de Cariaco y manifestándose la actividad profunda hacia el este, se nota que la zona de mayor profundidad es continua hasta la superficie, la representación 3D es consistente con el aumento de profundidad hacia el sureste y con la distribución bastante homogénea de los epicentros, que tienen una dirección más al sureste que el plano de corte.
- 3) El CL3 (figura 3) muestra una sismicidad netamente profunda (entre 40 y 120 kilómetros). En este perfil se puede observar la tendencia a incrementarse la profundidad desde los extremos hacia el centro del sector. Se consolida aquí la zona asísmica evidenciada en los cortes generales (figura 2a y 2b). En la representación 3D se observa el aumento de profundidad hacia el noroeste evidenciando una tendencia que concuerda perfectamente con el perfil, nótese que esta representación señala un surco de máxima profundidad con rumbo noroeste hacia los 60 kilómetros de la proyección del perfil.
- 4) En este CL4 (figura 3) se observa una disminución de la actividad consolidándose esta entre 20 y 45 kilómetros, pero en la representación gráfica hay evidencia de continuidad de la zona más profunda hacia el este (Línea M1–M2 en esta figura).
- 5) En este último corte longitudinal, (CL5) el cual se observa en la figura 3 la actividad es muy escasa y poco consolidada lo que se evidencia en lo

complejo de la representación 3D.

Con respecto a los cortes perpendiculares se observó lo siguiente:

- 1) El corte transversal 1 (CT1) (figura 4) demarca claramente los límites entre las zonas de actividad profunda y la superficial, ambas zonas convergen buceando hacia el centro (200 kilómetros en este perfil), separadas por una región asísmica que tiende a buzarse con el mismo ángulo de la sismicidad oriental. La representación gráfica espacial reporta una actividad parecida a la evidenciada por el corte.
- 2) El CT2 muestra una sismicidad menos definida que en el perfil anterior como se observa en la figura 4. Toda la actividad se confina entre los 80 y 250 kilómetros, ubicándose entre todo el rango de profundidades (entre 0 y 120 Km). Estos hipocentros son los que delimitan la zona asísmica ubicada entre los 42 y 50 km de profundidad. La representación 3D muestra una zona de alta profundidad que parece crecer en dirección noroeste.
- 3) La actividad mostrada por el CT3 muestra una disminución de la profundidad (la máxima es de 68 kilómetros). La actividad se concentra en el centro, no definiendo ninguna característica asociada a un buzamiento de alguna clase.

DISCUSION

La actividad registrada en la zona permite sugerir la existencia de una región de transición bien delimitada (figura 1, línea L1–L2) y relativamente estrecha, en donde la profundidad cambia con un patrón bien determinado, evidenciado en la figura 4, por el perfil CT1 (entre los kilómetros 150 y 200 de la proyección) de baja a alta profundidad. Los hipocentros nororientales tienen una distribución con buzamiento aparente hacia el centro y parece corresponder, en superficie, a la zona oriental del **Corrimiento de Pedernales**, menos demarcada es la región de “seudobuzamiento”, observada en la actividad sur occidental, presentando ambos buzamientos promedios muy parecidos. Esto es consistente con la sismicidad observada en el corte siguiente (CT2) mostrado en la figura 4, pero ambas zonas están menos diferenciadas aunque persiste la sismicidad superficial hacia el suroeste y la más profunda hacia el noreste. El último de los cortes perpendiculares (CT3) mantiene la distribución central aunque la profundidad de los hipocentros disminuye notablemente con respecto a los cortes anteriores y la diferenciación sísmica no es evidente. Esto parece sugerir

que hay una vinculación entre la actividad indicada por los tres cortes la cual evidencia una sismicidad que parece distribuirse desde el centro de CT3 incrementándose hacia el noroeste, consolidándose hacia el CT2 y separándose finalmente en el CT1.

Con relación a los cortes paralelos (CL), estos son también coherentes con las observaciones extraídas de los perfiles perpendiculares. En estos cortes se puede verificar un cambio significativo de actividad entre el CL2 y CL3 (figura 3), principalmente, se nota una tendencia completamente opuesta de la profundidad y la dirección con respecto a la distribución de la sismicidad de cada corte (figura 5). En el primero de los cortes la profundidad aumenta hacia el sureste mientras que en el segundo deriva hacia el noroeste, evidenciado fácilmente por las expresiones tomográficas de estos perfiles (tendencia hacia el azul, figura 3). Se puede notar que, en estas representaciones, los perfiles CL1 y CL4 presentan las mismas tendencias que el CL2 y CL3 respectivamente, en otras palabras, el CL1 tiene la misma tendencia en la profundidad que el CL2 y el CL4 al CL3, lo que demuestra que la diferenciación entre las actividades parece estar entre los perfiles 2 y 3, además se observa de manera resaltante la tendencia de la actividad profunda (línea M1–M2, figura 3). El CL5 presenta una sismicidad muy escasa para poder emitir algún tipo de juicio sobre el mismo y además, por la distancia se puede dudar de su precisión.

Para los análisis realizados se tomó en cuenta las limitaciones propias del factor profundidad el cual es muy dependiente de la forma en que se realiza la localización hipocentral y del algoritmo utilizado, pero, si nos basamos en la suposición de que los sismos fueran localizados bajo las mismas condiciones, los errores afectarían las determinaciones, en su conjunto, en la misma dirección así que estadísticamente deberían variar muy poco los resultados, manteniéndose las zonas de sismicidades superficiales y profunda en básicamente los mismos sitios.

CONCLUSIONES

Esto permite concluir lo siguiente:

1. Se puede evidenciar una diferenciación de la profundidad de la actividad sísmica entre el corte CL2 y el CL3 (figura 3), corroborado en mayor escala con los cortes totales (figura 2 A y B) y la marcada diferencia de la dirección de la evolución epicentral de la actividad (figura 5).

2. Esta sectorización de la actividad sugiere un límite entre estos dos perfiles, reafirmado por el comportamiento observado en los cortes CL1 y CL4.
3. La actividad parece separarse en dirección noroeste como se puede observar en los perfiles CT3, CT2 y CT1 (figuras 4).
4. Basados en los numerales 1, 2 y 3, se puede sugerir que la zona delimitante esta ubicada entre CL2 y CL3 y geológicamente corresponde al sistema de fallas de Los Bajos y El Soldado (figura 1), hipótesis sugerida en trabajos anteriores (Perez y Aggarwal, 1981). Aunque se les puede agregar, con menos certidumbre, la falla de Bohordal.
5. El incremento tan marcado de la profundidad entre estos dos perfiles (CL2 y CL3) y la sectorización en esa zona de toda la actividad sísmica importante señalan un posible inicio del sistema subductivo, que se consolida hacia el noreste. La dirección de la subducción debe estar hacia el noroeste y ser perpendicular a la línea M1–M2 (figura 3), por lo que su valor debería estar ubicado aproximadamente entre el acimut 330 ° y el 350 °.
6. Las técnicas del punto promedio y de la tomografía de profundidades medias permitieron exhibir ciertos detalles que de otra manera hubiesen sido difíciles de observar en los perfiles. Por esto pudieran convertirse en herramientas prácticas para la observación de este fenómeno.

AGRADECIMIENTOS

Queremos reconocer la contribución del licenciado Rafael Figueroa al asesorarnos en algunos tópicos de programación y al Profesor Luis Daniel Beauperthuy, por sus siempre acertadas recomendaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HAVSKOV, J. and OTTEMÖLLER, L. 1999. Seisan: The earthquake Analysis software for Windows, sunos, Solaris and Linux Version 7.0, University of Bergen, Department of Earth Science.
- MINSTER J. B., JORDAN T. H. 1978. Present day plate motions. *Journal of Geophysical Research*. 83. 5331-5334.

- MOLNAR P., SYKES I. 1969. Tectonics of the Caribbean and middle American region from focal mechanics and seismicity. *Bull. Seism. Soc. Am.* 80. 1639-1684.
- PEREZ, O. J., AGGARWAL Y. P. 1981. Present-day tectonics of southeastern Caribbean and northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research.* 86. 10791-10804.
- RUSSO R. M., SPEED R. C. 1992. Oblique collision and tectonic wedging of the South American continent and Caribbean terranes. *Geology.* 20. 447-450.
- RUSSO R. M., SPEED R. C., OKAL E. A., SHEPARD J. B. 1993. Seismicity and tectonics of southeastern Caribbean: *Journal of Geophysical Research.* 98. 14299-14319.
- SCHUBERT C. 1981. Are the Venezuelan fault systems part of the southern Caribbean plate boundary. *Sonderdruck aus der geologischen Rundschau* band 70.
- SPEED R. C., RUSSO R. M., WEBER J., ROWLEY K., C. 1991. Evolution of southeastern Caribbean plate boundary, vicinity of Trinidad and Tobago: discussion. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin.* 75. 1789-1794.

Figura 1:

Localización epicentral de los eventos ubicados en la zona de estudio el color más oscuro señala los sismos más superficiales y los claros denotan los profundos. Nótese que la separación entre diferentes actividades dada por profundidad se define fácilmente con la línea L1-L2

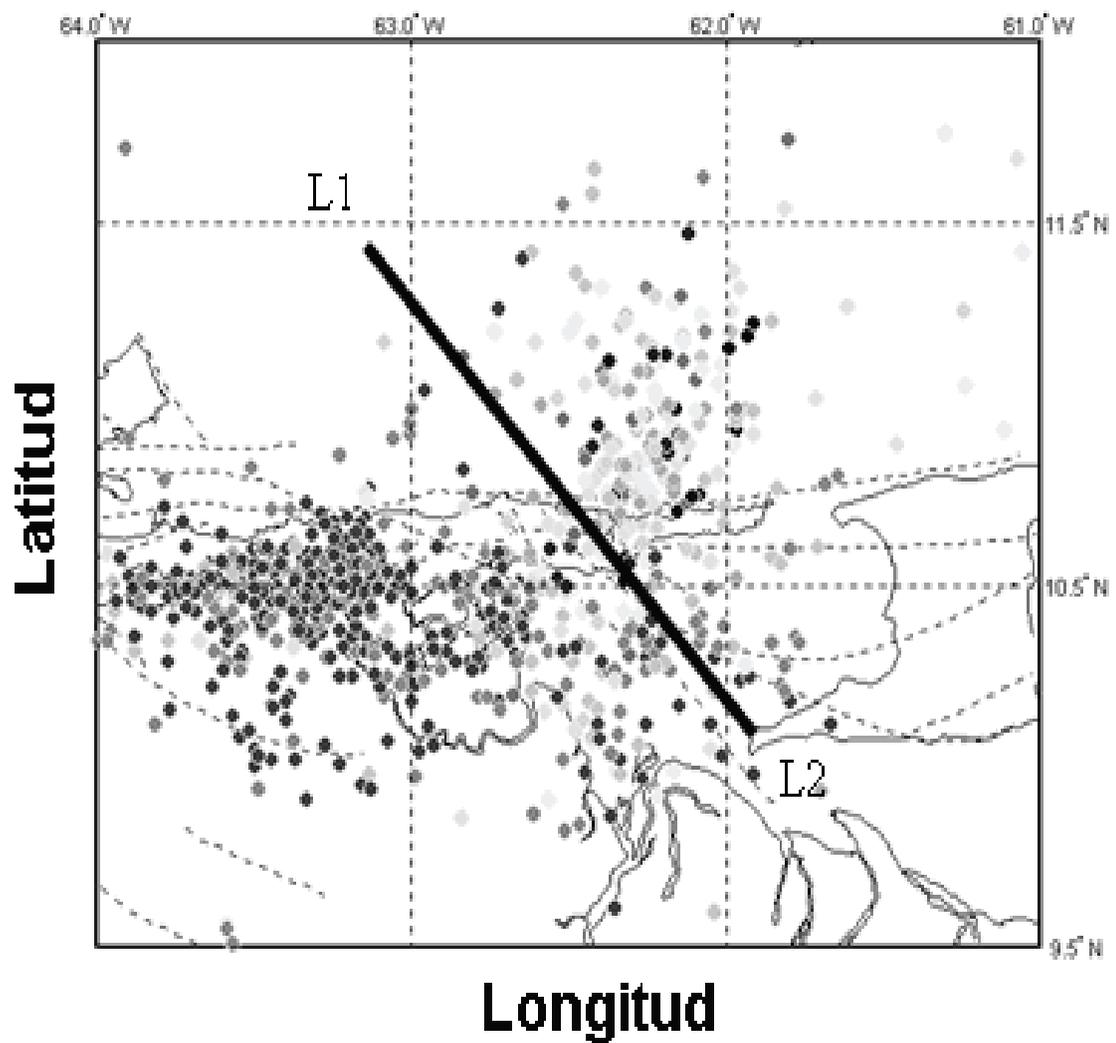


Figura 2:

a y b: Proyecciones verticales de la actividad sísmica cuyos epicentros están graficados en la figura 1, tanto en la dirección norte-sur como este-oeste, se puede observar la sectorización, de la actividad profunda.

c y d: Sectores paralelos CL1, CL2, CL3, CL4 y CL5 (de suroeste a noreste), y transversales CT1, CT2, y CT3 (de noroeste a sureste).

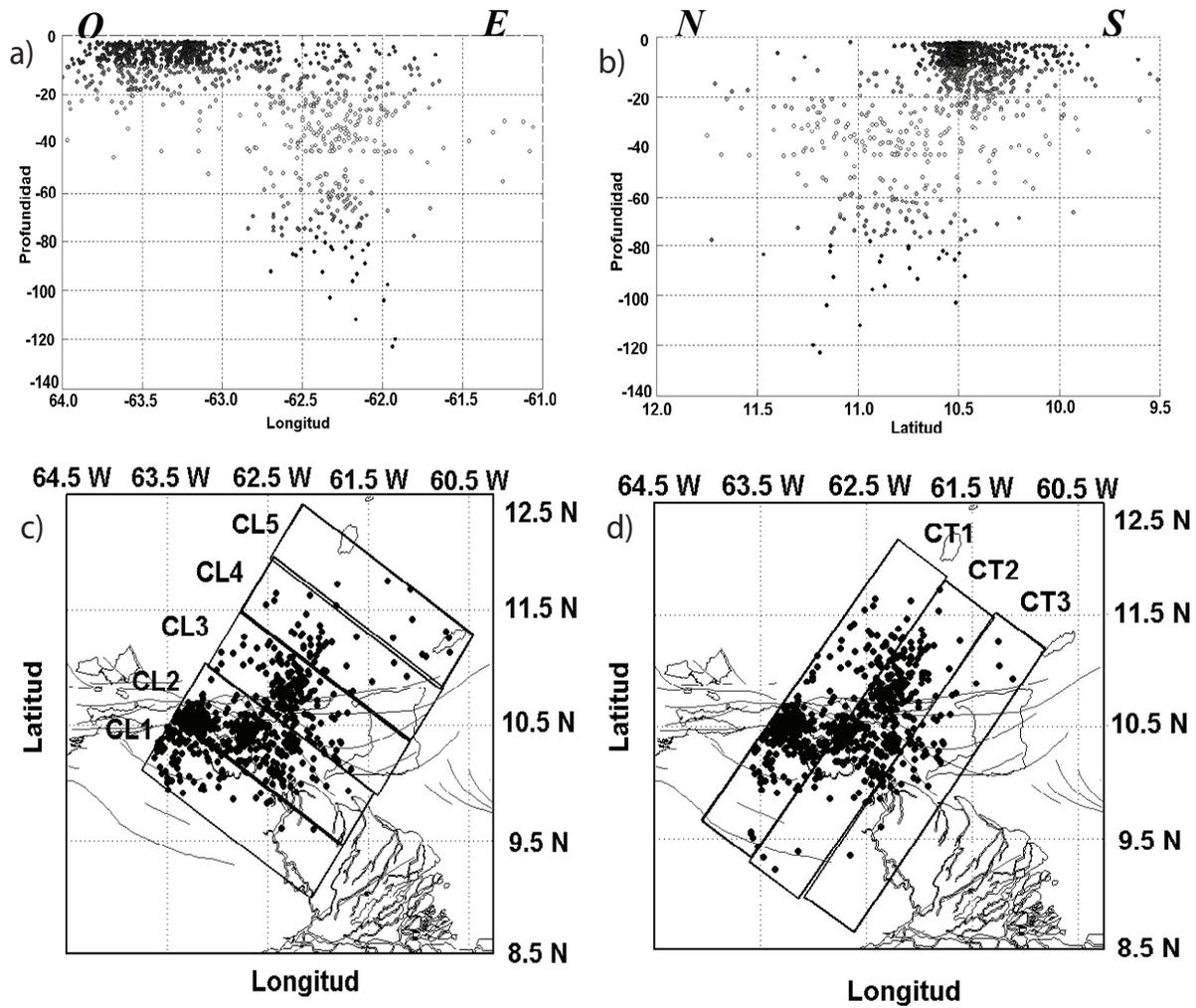


Figura 3:

Representaciones de perfiles y de tomografía 3D de profundidad media encontradas para los cortes paralelos CL1, CL2, CL3, CL4 y CL5 en orden decrecientes para ordenarlos de norte a sur y simplificar su asociación con la actividad real. Nótese la diferencia existente entre el CL2 y el CL3, y la dirección bien demarcada de la zona más oscura (más profundos) hacia la derecha a partir del CL3 (línea M1–M2), las líneas que recorren cada segmento se explican en la figura 5, donde se observan mejor.

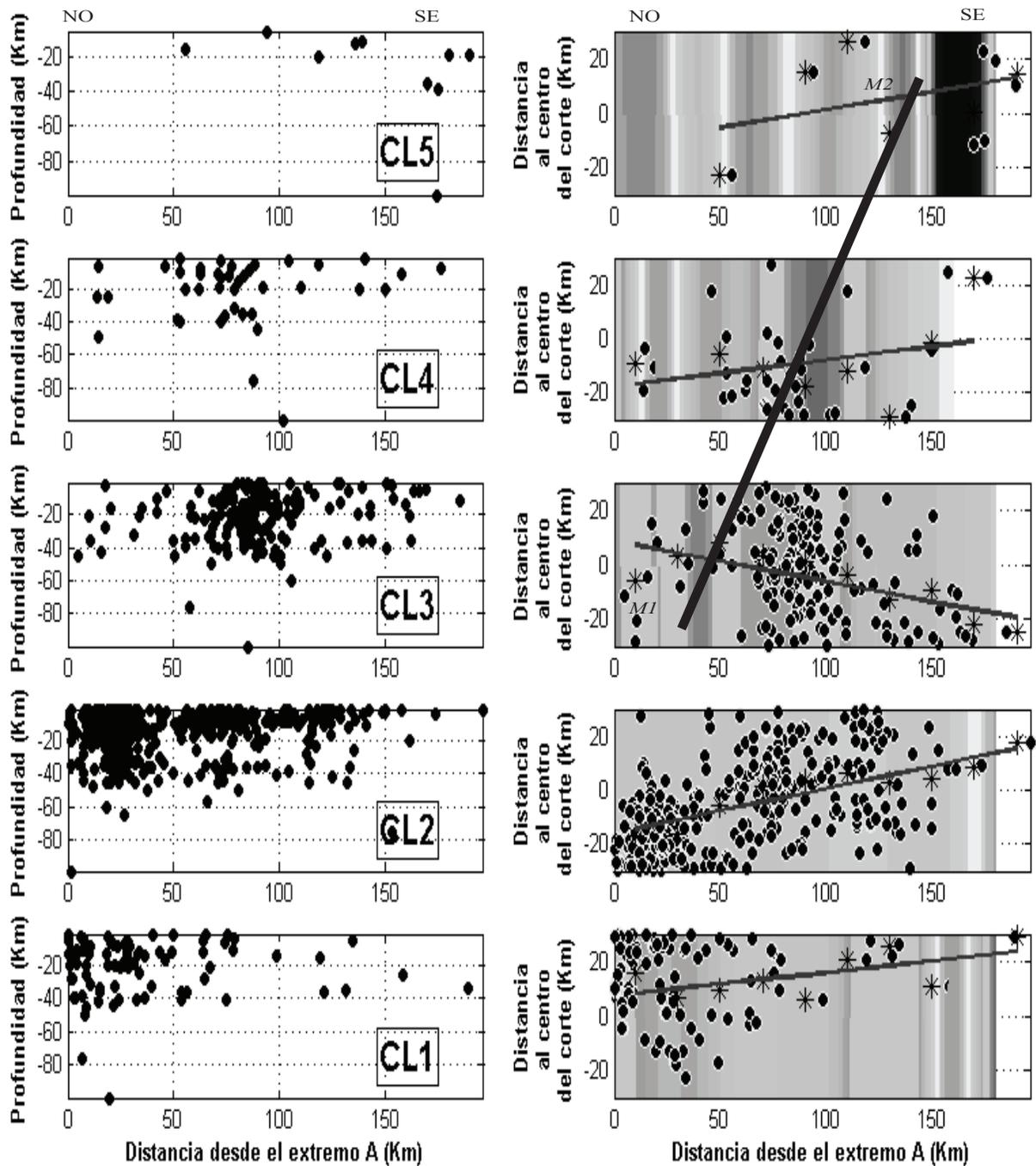


Figura 4:

Representaciones de perfiles y de tomografía 3D de profundidad media para los cortes perpendiculares CT1, CT2 y CT3 en orden creciente para poder ordenarlos de norte a sur y simplificar su asociación con la actividad. Se puede observar como la sismicidad con la profundidad promedio domina al recorrer los cortes desde el sur al norte. En el CT3 se puede observar la actividad profunda muy bien definida, las líneas que recorren cada segmento se explican en la figura 5, donde se observan mejor.

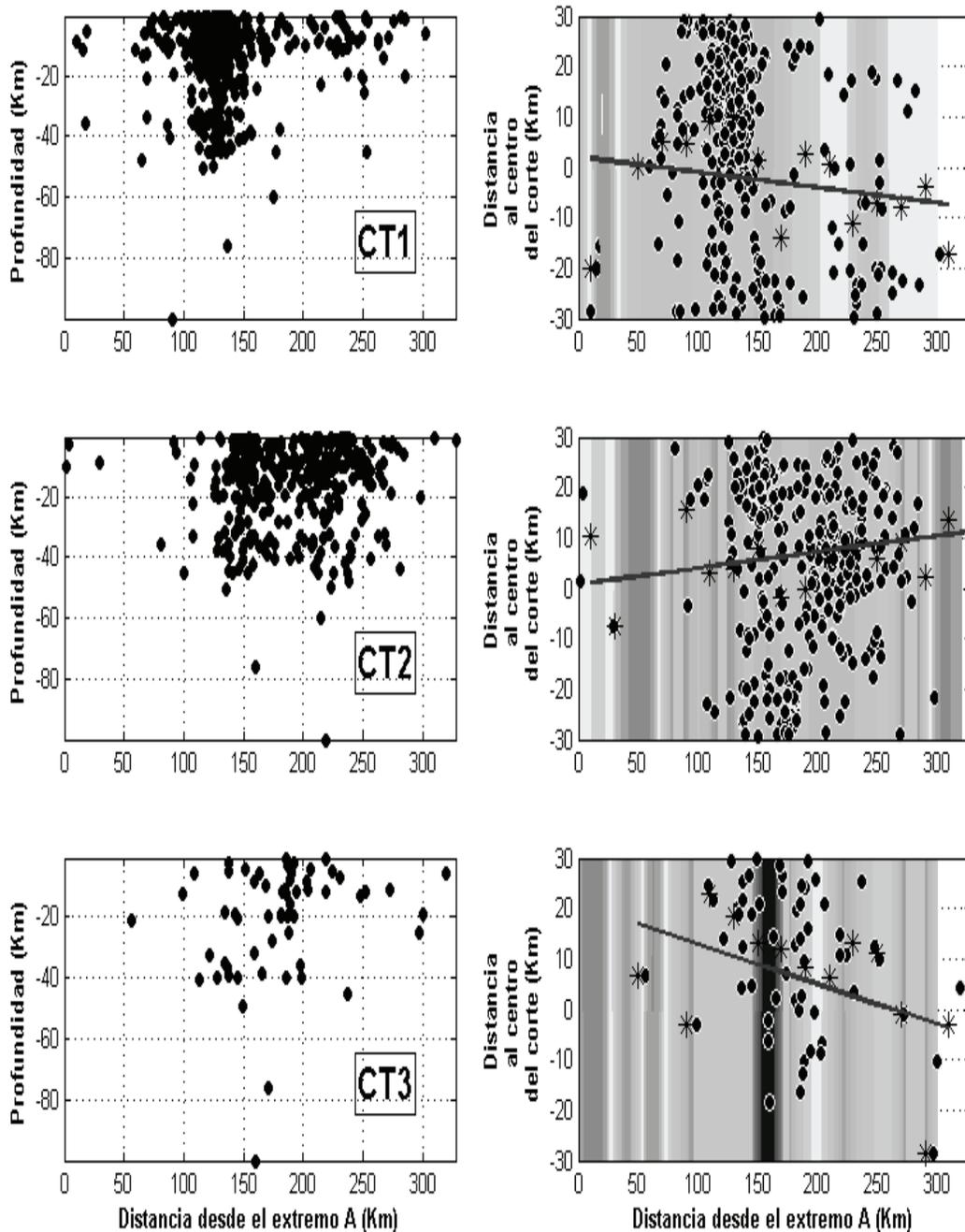


Figura 5:

Epicentro promedio por sector tomado en intervalos a lo largo (A para los cortes paralelos y B para los cortes perpendiculares). Se puede notar el cambio marcado de dirección en el conjunto de los paralelos (CL2 y CL3), mientras que los perpendiculares no hay un cambio apreciable entre los perfiles.

