

ASPECTOS DE LA SISMOTECTÓNICA DE NICARAGUA Y SU ALREDEDOR

José Frez y Ena Gámez

División de Ciencias de la Tierra, CICESE

jofrez@cicese.mx

RESUMEN

Utilizamos información electrónica de acceso público (líneas de costa, así como catálogos de hipocentros y de mecanismos focales) para caracterizar aspectos de la sismotectónica de Nicaragua y sus alrededores. Nos concentramos en tres temas. En cuanto a valores del parámetro b de la relación de Gutenberg-Richter, no encontramos diferencias significativas en su distribución espacial. El sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001 ($M_w = 7.7$) disparó una importante actividad hacia el SE, en una región aladaña a la zona de réplicas frente a la costa de Nicaragua, la cual no se ha reportado hasta ahora. El estudio de la distribución de los ejes P y T de los mecanismos focales de la región proporciona detalles del régimen extensivo de la placa en subducción. En particular, comparamos los valores de la inclinación (medida con respecto a la vertical) de esta placa que resultan de a) la proyección vertical de los hipocentros y perpendicular a la costa ($\sim 13^\circ$) y b) de las de los ejes T a 200 km de profundidad ($\sim 20^\circ$). La inclinación de los ejes T muestra una disminución sistemática, gradual y con poca variabilidad desde un valor de 50° a una profundidad de ~ 70 km.

INTRODUCCIÓN

La sismicidad de Nicaragua y, más en general, del sistema de arco-trinchera de América Central ha recibido gran atención, por ejemplo, en Molnar y Sykes (1969), Dewey y Algermissen (1974), Burbach et al. (1984), White (1991), Dewey y Suárez (1991), Protti et al. (1994), Protti et al. (1995), Ambraseys y Adams (2001), La Femina et al. (2002), entre otros. La instalación de redes de estaciones sismológicas en Nicaragua y países vecinos ha completado la información de catálogos globales de sismicidad y mecanismos focales (Protti et al., 1994; Protti et al., 1995, entre otros); al mismo tiempo, ha proveído de datos para estudios de la estructura sísmica correspondiente (por ejemplo, Husen et al., 2003, Matumoto et al., 1977). Hay que agregar el estudio de sismos destructivos (Algermissen et al., 1974; Brown et al., 1974; Quintero y Kissling, 2001; artículos incluidos en Rose et al., 2004), de sismicidad histórica, así como los que tratan la formación y comparación de catálogos sísmicos (White y Harlow, 1993; Ambraseys y Adams,

2001; Fernández et al., 2004; Montero y Peraldo, 2004; Randall et al., 2004). Aunque el centro de nuestra atención es la región de Nicaragua, tomamos como región de estudio al cuadrante entre los meridianos $84^\circ W$ y $90^\circ W$ y latitudes $10^\circ N$ y $15^\circ N$ (Figura 1). En este artículo, exploramos el uso de catálogos electrónicos de acceso público para determinar algunas características sismotectónicas. En particular y para la región de estudio, estimamos valores del parámetro b de la relación de Gutenberg-Richter a tres profundidades, determinamos la dependencia en profundidad de los ejes P y T de mecanismos focales sísmicos y reevaluamos la región en que la transferencia de los esfuerzos producidos por el sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001 ($M_w = 7.7$) dispara sismicidad. Otro propósito de este artículo es pedagógico: comprobamos que hay información en sitios electrónicos para que los estudiantes de postgrado realicen proyectos de clases, dados los conocimientos computacionales adecuados (MATLAB, en nuestro caso).

MARCO TECTÓNICO

Un esquema del marco tectónico de América Central se presenta en la Figura 1. Nicaragua forma parte de la placa del Caribe; en la costa del Pacífico, la placa Cocos subduce hasta los ~200 km, que es la profundidad máxima de los sismos. La mayor parte de la actividad sísmica en la región ocurre bajo el océano, a profundidades someras y es resultado de la interacción entre las dos placas; esta actividad incluye los sismos de mayor magnitud ($M \geq 7.0$). En el continente, se distinguen dos franjas tectónicas, paralelas y cercanas a la costa, que poseen fallas de rumbo y con sismicidad superficial; una es la Cadena Volcánica y, la otra, la Depresión de Nicaragua. Los sismos asociados a la tectónica continental tienen magnitudes menores que 7.0 pero producen gran destrucción debido a que están más cerca de ciudades o poblados. Debido a que los sismos que ocurren en las cercanías de la trinchera y en la placa de subducción tienen mecanismos focales inversos y normales y los que ocurren próximos al eje central de la cadena volcánica son de rumbo, se ha sugerido que el movimiento relativo entre ambas placas es ligeramente oblicuo (Harlow y White, 1985) con una componente horizontal en dirección paralela

al arco de 8 mm/año (Guzmán-Speziale, 2001). La complicación de que las trazas de las fallas con dirección NE-SW son más comunes que las que tienen dirección paralela a la trinchera ha sido tratada por Burbach et al. (1984) y La Femina et al. (2002). Los primeros proponen una segmentación de la subducción de América Central con independencia en la subducción de cada segmento; los segundos, una acomodamiento del movimiento por una rotación de bloques con un eje vertical.

DATOS

Los datos fueron obtenidos en distintos sitios electrónicos de dominio público. Las líneas de costas y otros límites provienen de National Geophysical Data Center (NOAA/NGDC): <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/shorelines.html>. El catálogo mundial de hipocentros (1973-2007) es el del National Earthquake Information Center-(NEIC/USGS): <http://neic.usgs.gov/neis/epic/> mientras que el catálogo regional de hipocentros (1995-2006) proviene del sitio de la Red Sísmica de Nicaragua: www.ineter.gob.ni/geofisica/sis/red/nic_survey.htm; hemos utilizado este catálogo entre los

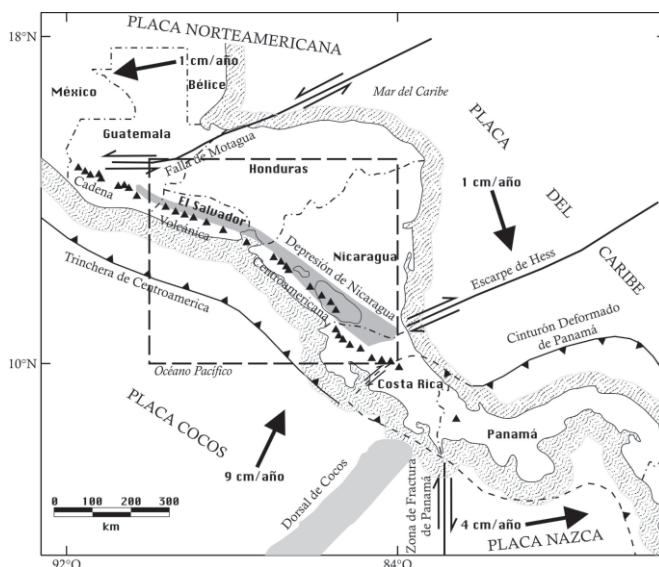


Figura 1. Marco tectónico de América Central, basado en De Mets (2001), Harlow y White (1985) y Guzmán-Speziale (2001). El área de estudio es la enmarcada.

años 1995 y 2006. Finalmente, los parámetros de los mecanismos focales (1976-2007) pertenecen al catálogo CMT (Harvard): www.globalcmt.org/CMTsearch.html.

SISMICIDAD; CATÁLOGOS DE HIPOCENTROS.

Catálogo Mundial NGSC

La Figura 2 muestra los epicentros en la región de estudio según el catálogo NGSC entre 1973 y 2006. Los epicentros con $M > 7.0$ están localizados en la región en que interactúan ambas placas, o sea, en el mar y en las cercanías de la trinchera mientras que la sismicidad $6.0 \geq M \geq 5.0$ se distribuye en forma relativamente homogénea.

Catálogo Regional

Un mapa de sismicidad más detallado que el anterior (Figura 3) contiene las determinaciones (1995-2006) que provienen de la red regional de estaciones sismológicas que mantiene el INETER (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales). El sismo de mayor magnitud, de El Salvador del 13 de enero de 2001, $M_w = 7.7$, es objeto de atención especial en una sección posterior. La alineación de epicentros de sismos asociados a la cadena volcánica se destaca con claridad.

La costa tiene un cambio de orientación en la longitud $87.6^\circ W$, es decir, en el golfo de Fonseca, el cual marca el límite entre El Salvador, Honduras y Nicaragua. El ángulo con respecto a la dirección W-E es -15° y -43° , respectivamente para los segmentos NW (costa de El Salvador, mayormente) y SE (costa de Nicaragua, mayormente).

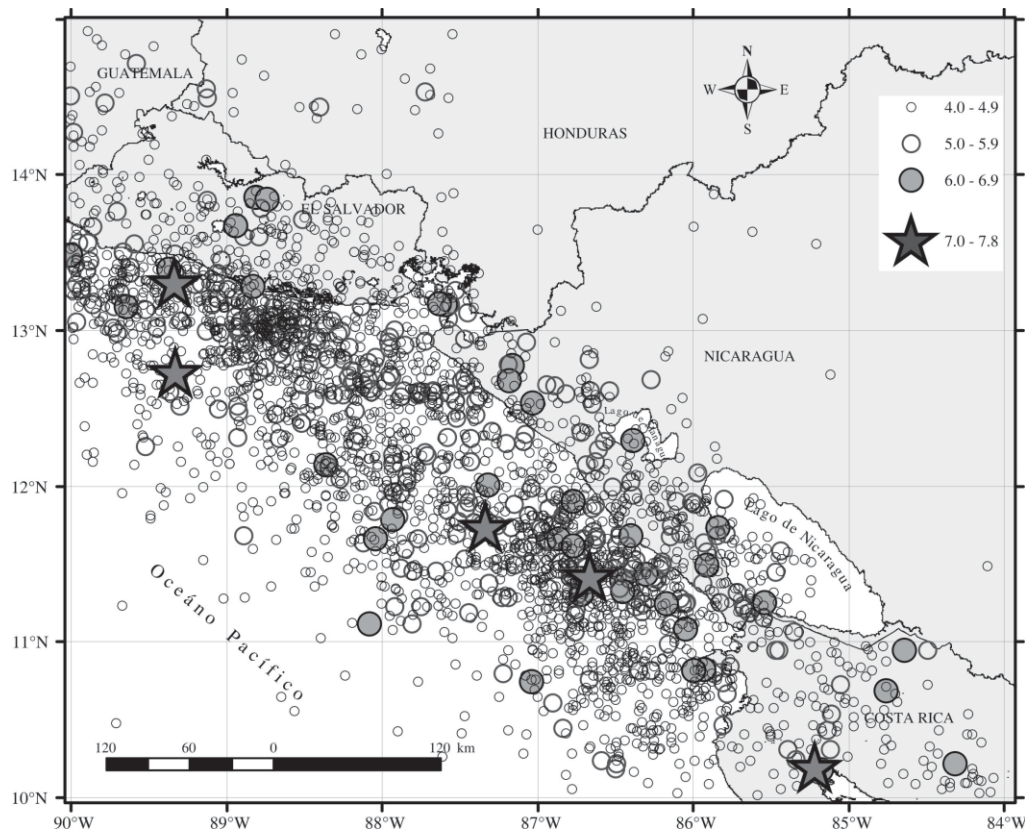


Figura 2. Mapa epicentral (1973-2006); catálogo NGSC. Epicentro del sismo de El Salvador, 13/01/2001, $M_w = 7.7$, Lat = 12.74, Lon = 89.33, según INETER.

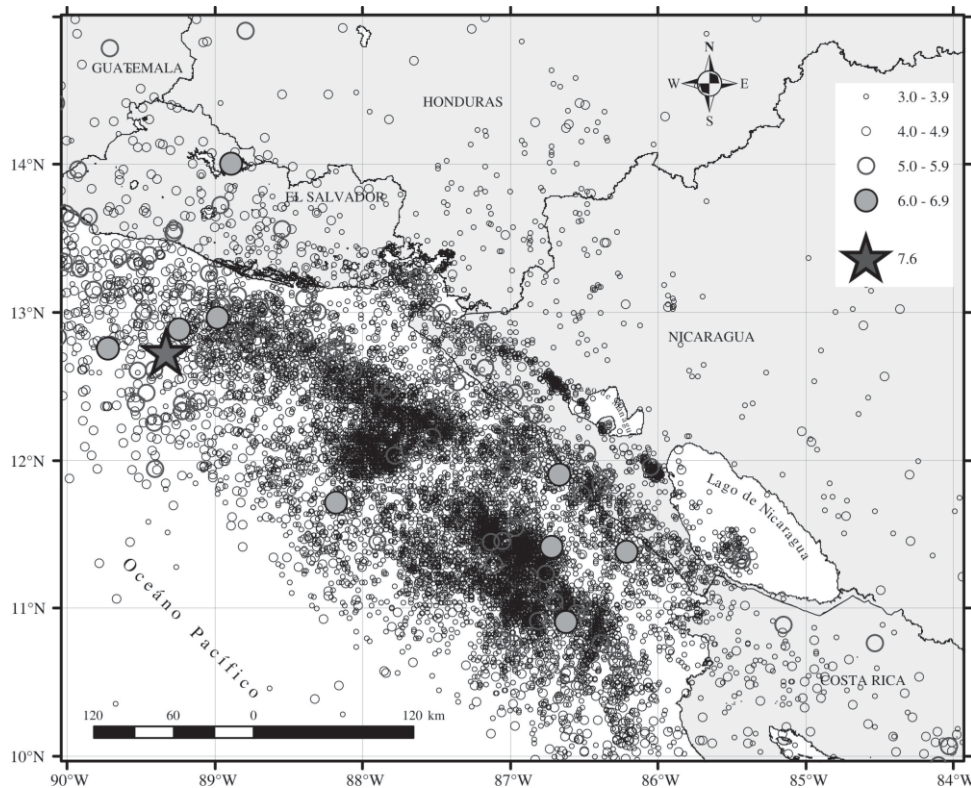


Figura 3. Mapa epicentral (1995-2006); catálogo INETER. Epicentro del sismo de El Salvador del 13/01/2001, MW = 7.7, Lat = 12.74, Lon = 89.33, según INETER.

Este cambio de dirección aparece más suavizado en la traza de la trinchera (Figura 1). La Figura 4 muestra dos perfiles verticales con hipocentros, ambos son perpendiculares a los segmentos de costa NW y SE; los orígenes de ambos perfiles están, respectivamente, en los puntos {11.0N; 89.5W} y {10.5N; 88.5W}. El perfil SE tiene un cambio en la inclinación de la placa de subducción a 80-100 km de profundidad; el ángulo pasa de 36° a 13°, ambos, con un error de $\pm 5^\circ$, aproximadamente. (En este trabajo, las inclinaciones se miden con respecto al eje vertical). La densidad de sismos es mucho menor en el perfil NW, lo que no es sorprendente porque el catálogo proviene de la red de estaciones ubicadas en Nicaragua. Así, la placa en subducción en el perfil NW no se resuelve con claridad aunque hay sugerencia de una conducta distinta sobre y debajo los 100 km.

El lector puede encontrar perfiles semejantes en Burbach et al. (1984) y Protti et al. (1995), los que coinciden esencialmente con los aquí presentados.

LA SECUENCIA SÍSMICA INICIADA POR EL SISMO DEL 13 DE ENERO DE 2001

Según el catálogo CMT un sismo de magnitud $M_w = 7.7$ ($m_b = 6.4, M_s = 7.8$) ocurrió el 13 de enero de 2001, a las 17:33 GMT y frente a la costa del El Salvador (12.97°N; 89.13°W). (Por simplicidad, este sismo puede ser referido de aquí en adelante sólo por la fecha de ocurrencia). El mecanismo focal, según el mismo catálogo es normal; con los ejes T aproximadamente horizontales y perpendiculares a la dirección de la costa; esta característica se mantiene para las réplicas (Martínez-Días et al., 2004).

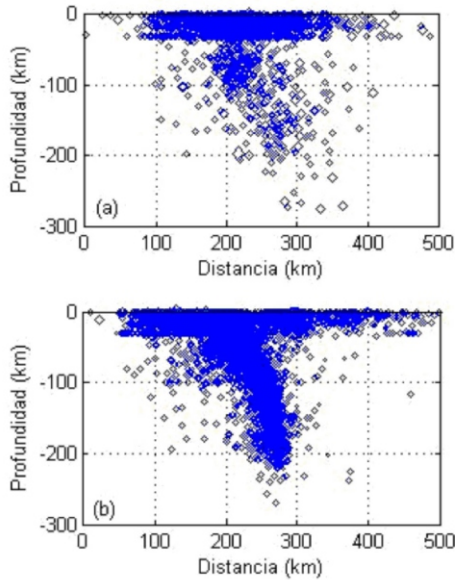


Figura 4. Corte vertical con hipocentros tomados del catálogo regional INETER; el corte es aproximadamente perpendicular a la línea de costa en los segmentos a) NE, mayormente de El Salvador; b) SE, mayormente de Nicaragua. El acimut de la costa que corresponde a cada perfil es N15°E y N43°E, respectivamente.

Este sismo inicia una secuencia interesante que ha sido estudiada por Parsons (2002), Benito et al. (2004) y Martínez-Días et al. (2004); nuestro propósito es completar la descripción de la secuencia. Ellos ponen énfasis en que, por transferencia de esfuerzos, este sismo dispara el sismo superficial que ocurre el 13 de febrero ($M_w = 6.6$), o sea un mes después; este sismo, con sus réplicas, se asocia con la cadena volcánica. En lo que sigue, utilizamos el catálogo de INETER. La Figura 5 muestra un acotamiento poligonal que rodea las réplicas, así como la actividad adicional que se correlaciona con la ocurrencia de este sismo durante el año 2001. Dicha figura está hecha con el criterio de circunscribir los epicentros que ocurrieron después del sismo principal de tal modo que estén rodeados por una actividad sísmica de densidad claramente menor. La región circunscrita puede subdividirse en tres: la primera, de mayor densidad, contiene las réplicas propiamente tales que se sitúan entre las longitudes 88.5W y 89.5W; la segunda corresponde a la ya mencionada alineación,

paralela a la costa, de epicentros y asociada a la cadena volcánica (Parsons, 2002; Benito et al., 2004, y Martínez-Días et al., 2004); la tercera contiene una actividad no reportada hasta ahora, que es menos densa en sismos y localizada, en el océano, frente a la costa de Nicaragua. La Figura 6 muestra la actividad ($M \geq 3.5$, a partir del 01/01/1995) en el tiempo, tanto en magnitud como en longitud e incluye las réplicas y la actividad disparada, pero no incluye la que ocurre en el continente. Por último, la Figura 7 es similar a la Figura 6, pero para $M \geq 5.0$. Las conclusiones son inmediatas.

La tercera subregión estuvo relativamente quieta para sismos $M \geq 5.0$ (por lo menos, desde 1995) hasta la ocurrencia del terremoto de enero de 2001. Enseguida, toda la tercera sub-región entra en una actividad caracterizada por enjambres de sismos principales con $M \geq 5.0$ que continúa hasta el final del catálogo (diciembre del 2006), seis años después de la ocurrencia del sismo principal.

La interpretación más directa es que la región poligonal delimita aproximadamente un bloque tectónico cuyo estado de esfuerzos se acomoda a la energía liberada por el sismo $M_w = 7.7$. Los 6 años en que la sismicidad ha ocurrido hasta fines de 2006 tiende hacia la estimación de 7-11 años que entrega Parsons (2002) para sismos disparados por uno principal con $M \geq 7.0$. No tenemos antecedentes de otro sismo destructivo que haya disparados sismicidad en dos subregiones claramente separadas en el espacio.

CONSTANTE b DE LA RELACIÓN DE GUTENBERG-RICHTER

El cálculo de la constante b de la relación Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1954) es estándar para encontrar diferencias en el régimen tectónico, tanto en el espacio como en el tiempo; en este último caso, por ejemplo, para tratar de encontrar diferencias antes y después

de la ocurrencia de un sismo destructivo. En nuestro trabajo, reducimos la ley a la distribución (de probabilidad) exponencial negativa, utilizamos el método de máxima verosimilitud (Utsu, 1965) para la estimación del parámetro b y, en la visualización de resultados, usamos histogramas de densidad y escala lineal porque ilustran mejor la calidad de los datos. El método de máxima verosimilitud ajusta la serie de tiempo y no el histograma, como lo hace el método de cuadrados mínimos. El error (nivel de significación del 95%, en este trabajo) sigue una distribución χ^2 de donde resulta natural utilizar la distribución de Fisher para probar la significación de la diferencia entre dos valores de b (Aki, 1965; Utsu, 1965; Utsu, 1966) aunque es elemental comparar la diferencia entre dos valores de b tomando en cuenta los errores de estimación. Sin embargo, es importante acotar que el mencionado error de la estimación toma en

cuenta sólo el carácter aleatorio de la distribución (la exponencial negativa); esto quiere decir que factores como errores en el valor de las magnitudes, en el carácter posiblemente incompleto del catálogo y por el carácter inapropiado de la relación de Gutenberg-Richter, no están tomados en cuenta. Por ello, el análisis debe hacerse con cautela.

Las magnitudes son m_b para el catálogo global (NGSC). El catálogo regional (INETER) combina el uso de la magnitud local y la de coda; como es usual, ambas estimaciones coinciden generalmente dentro de un par de décimas de unidad de magnitud. Dada la geometría de la red, hay una posible dependencia de la estimación de la magnitud con respecto al acimut del hipocentro, particularmente para sismos que ocurren en el océano y en la placa en subducción; este efecto no ha sido estudiado.

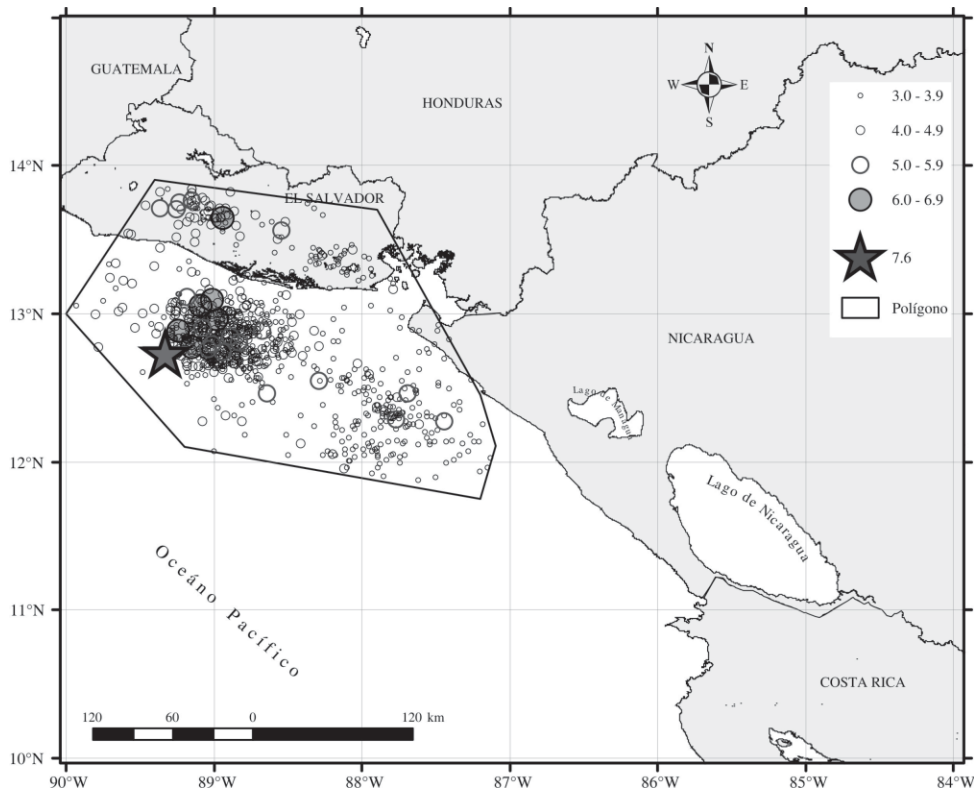


Figura 5. Zona de réplicas y de sismicidad disparada durante 2001 por el sismo de El Salvador del 13/01/2001, $M_w = 7.7$. Note las tres secuencias que se separan fácilmente: a) una alta densidad de réplicas que rodea al epicentro del sismo principal (estrella); b) actividad en el continente compuesta por un sismo principal y réplicas y que se correlaciona con la cadena volcánica, y c) actividad que se ubica frente a la costa NW de Nicaragua.

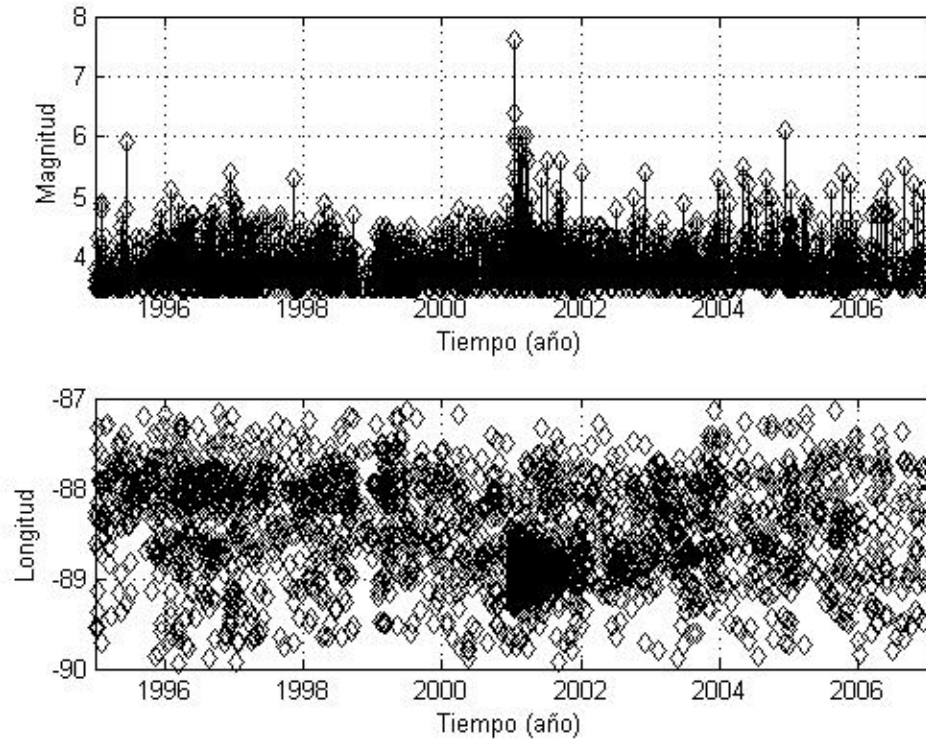


Figura 6. Sismicidad en tiempo (1995-2001) para $M \geq 3.5$ que ocurre en la placa oceánica y que aparece en la Figura 5. Catálogo: INETER. Figura superior: Magnitud vs. Tiempo. Figura inferior: Posición en Longitud vs. Tiempo. Nótese el aumento de sismicidad a partir de la ocurrencia del sismo de El Salvador del 13/01/2001, $M_w = 7.7$, y la delimitación de las réplicas al menos por 1 año, entre las longitudes $89.5^\circ W$ y $88.5^\circ W$.

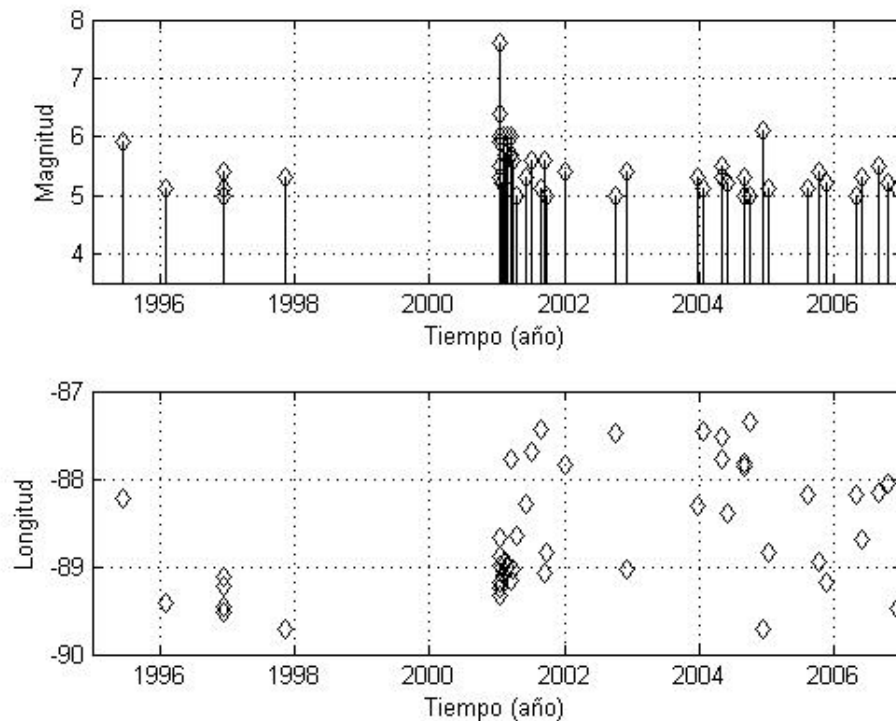


Figura 7. Igual que en figura 6, pero para $M \geq 5.0$. Nótese la ausencia de sismicidad por los tres años previos a la ocurrencia del sismo de El Salvador del 13/01/2001, $M_w = 7.7$, y el aumento posterior de actividad sísmica.

Utilizamos las dos regiones (NE y SW) que definimos en la sección anterior; con ello, delimitamos para el catálogo INETER un subcatálogo más confiable (frente a la costa de Nicaragua) de la parte que lo es menos (frente a la costa de El Salvador); junto a esto, dividimos el rango de la profundidad (h) en tres segmentos ($h \leq 45$ km; $45 \text{ km} < h \leq 100$ km; $h \geq 100$ km). Estos límites de profundidades resultan de la conducta observada en el perfil de profundidades de la Figura 4.

Las figuras 8 a la 13 muestran histogramas con los datos y las curvas de ajuste para el catálogo mundial (NGSC) y el regional (INETER) los cuales se han subdividido en las dos regiones NW (El Salvador) y SE (Nicaragua) y en los tres rangos de profundidades que describimos anteriormente. Los resultados numéricos se muestran en las tablas 1 a la 6.

Los resultados en la estimación de los valores de b pueden resumirse en que todos son compatibles con un valor entre 1.00-1.15 si tomamos en cuenta los límites de significación y el número reducido de sismos de algunos casos; esto último es común para las profundidades más grandes. El catálogo mundial sugiere un valor más alto de b para la región frente a la costa de El Salvador (1.20-1.25), que el resultado para el catálogo regional. Algo semejante (b entre 1.15 y 1.33) se observa para el catálogo regional en la región SE (frente a la costa de Nicaragua) y a profundidades entre 45 y 100 km. Es difícil evaluar la significación de este último resultado.

Muchos de los histogramas tienen oscilaciones alrededor de la línea que marca la tendencia central del ajuste. Por ejemplo, el ajuste en a) y b) de la Figura 12 es bueno desde la magnitud 3.4; sin embargo,

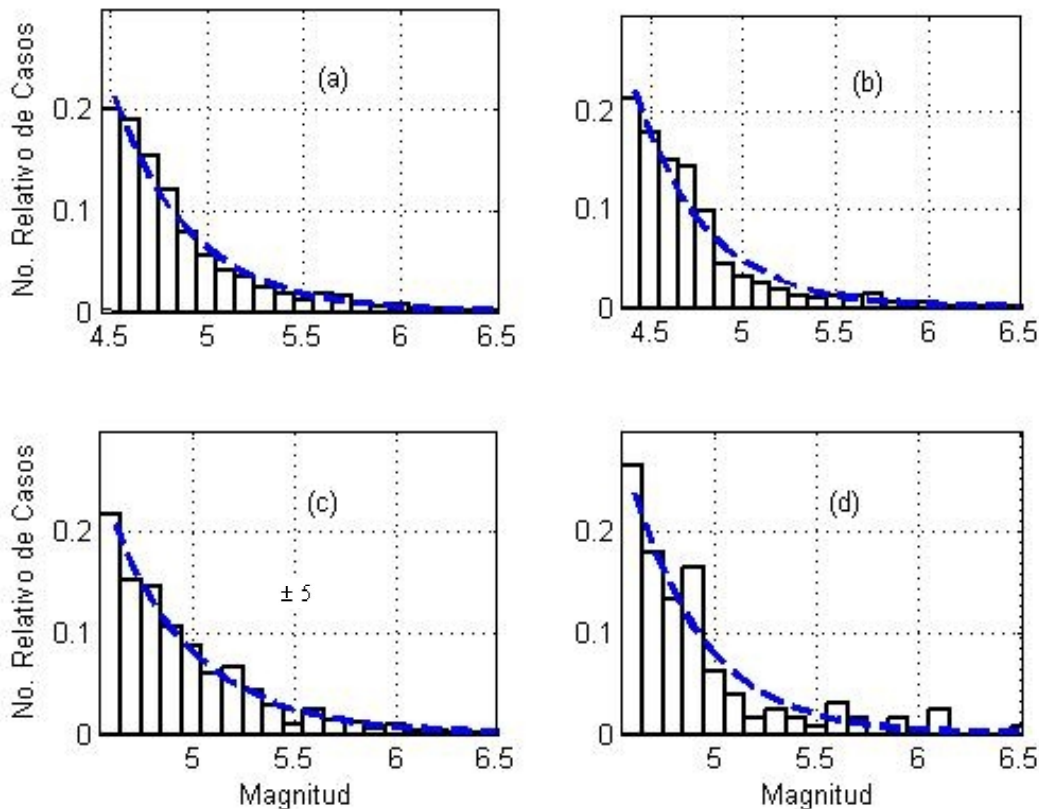


Figura 8. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: NOAA/NGDC (mundial) 1973-2006 para las dos regiones. Profundidades: a) todas; b) $h \leq 45$ km; c) $45 \text{ km} \leq h < 100$ km; d) $h \geq 100$ km.

Tabla 1. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 8. Prof.: Profundidades; NC: Número de Casos; b : Valor central estimado; Rango- b : Rango calculado con un nivel de confianza del 95%; M_{inf} : Magnitud de corte inferior; M_{sup} : Magnitud de corte superior.

Prof.	NC	b	Rango- b	M_{inf}	M_{sup}
Todas	1503	1.09	1.14-1.03	4.5	8.0
$h \leq 45$	929	1.14	1.22-1.07	4.4	7.0
$45 < h \leq 100$	518	1.06	1.15-0.97	4.6	8.0
$h > 100$	128	1.23	1.45-1.01	4.6	8.0

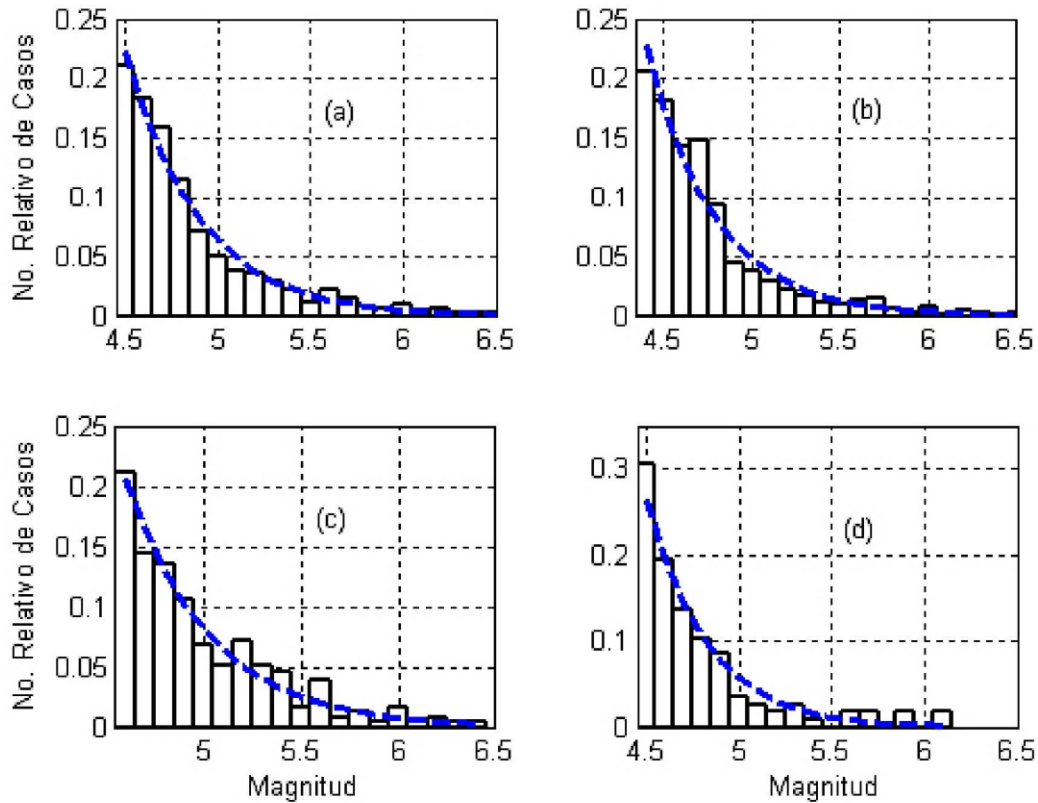


Figura 9. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: NOAA/NGDC (mundial) 1973-2006 para la región SE (frente a la costa de Nicaragua). Profundidades: a) todas; b) $h \leq 45$ km; c) $45 \text{ km} < h < 100$ km; d) $h \geq 100$ km.

Tabla 2. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 9. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	b	Rango- b	M_{inf}	M_{sup}
Todas	881	1.10	1.17-1.03	4.5	6.5
$h \leq 45$	619	1.13	1.22-1.04	4.4	6.5
$45 < h \leq 100$	237	1.00	1.15-0.89	4.6	6.5
$h > 100$	118	1.35	1.63-1.13	4.5	6.5

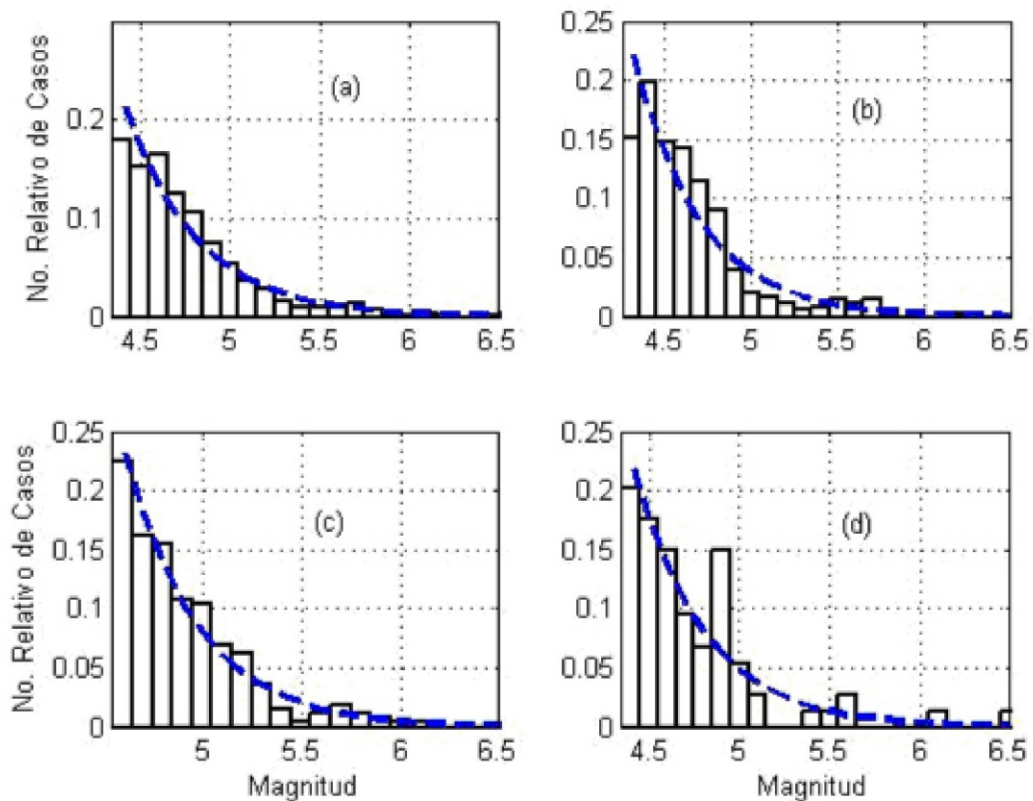


Figura 10. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: NOAA/NGDC (mundial) 1973-2006 para la región NW (frente a la costa de El Salvador). Profundidades: a) todas; b) $h \leq 45$ km; c) $45 \text{ km} \leq h < 100 \text{ km}$; d) $h \geq 100 \text{ km}$.

Tabla 3. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 10. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	b	Rango- b	M_{inf}	M_{sup}
Todas	743	1.08	1.17-1.01	4.4	8.0
$h \leq 45$	357	1.12	1.25-1.02	4.3	7.0
$45 < h \leq 100$	277	1.18	1.34-1.06	4.6	8.0
$h > 100$	74	1.11	1.42-0.90	4.4	8.0

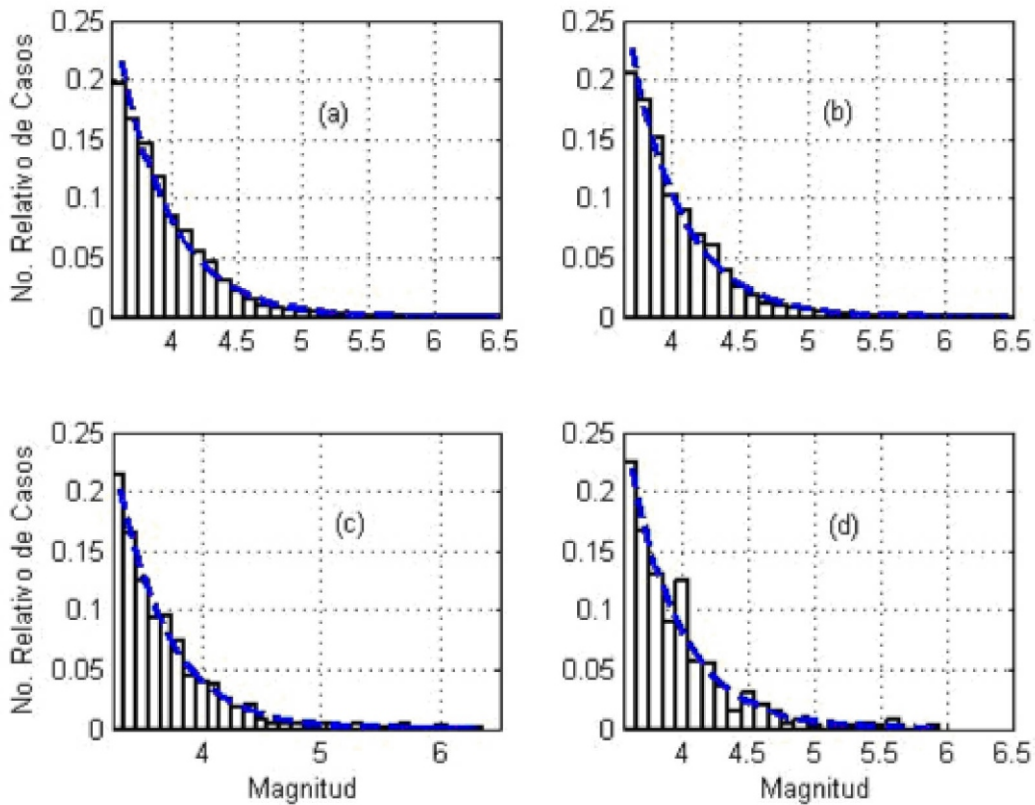


Figura 11. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para las dos regiones. Profundidades: a) todas; b) $h \leq 45$ km; c) $45 \text{ km} < h < 100$ km; d) $h \geq 100$ km

Tabla 4. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 11. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	b	Rango- b	M_{inf}	M_{sup}
Todas	5598	1.10	1.13-1.07	3.6	8.0
$h \leq 45$	3387	1.15	1.19-1.12	3.7	8.0
$45 < h \leq 100$	777	1.02	1.10-0.96	3.3	8.0
$h > 100$	400	1.12	1.23-1.01	3.6	8.0

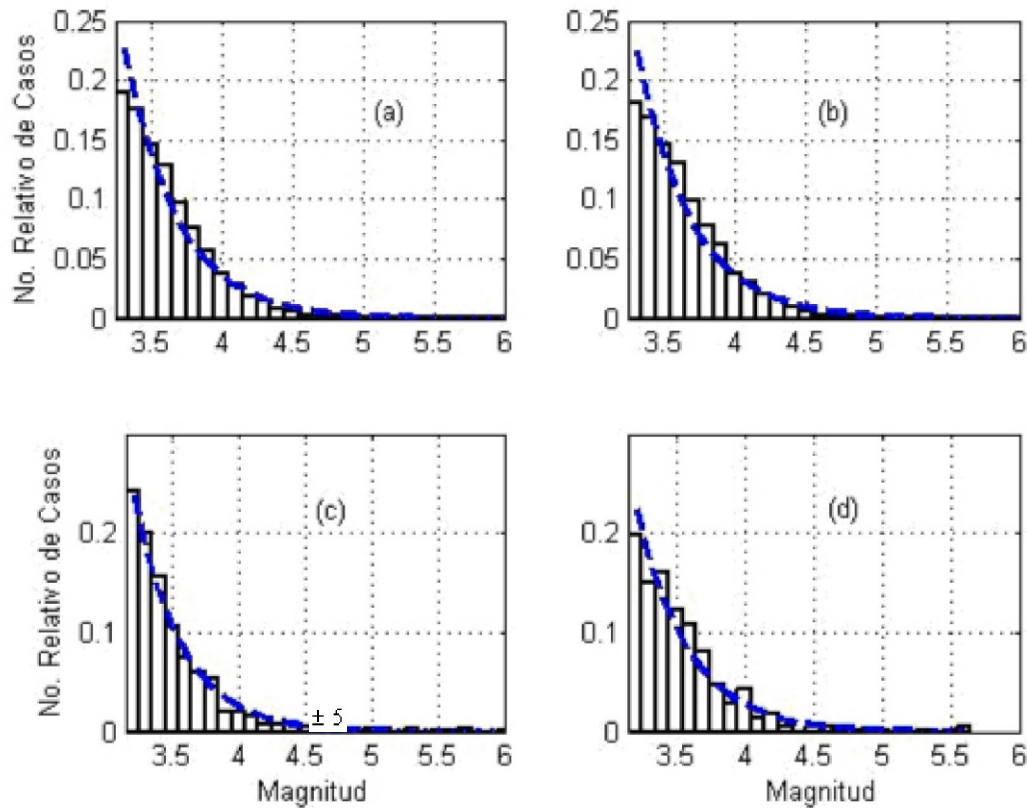


Figura 12. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para la región SE (frente a la costa de Nicaragua). Profundidades: a) todas; b) $h \leq 45$ km; c) $45 \leq h < 100$ km; d) $h \geq 100$ km.

Tabla 3. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 10. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	b	Rango- b	M_{inf}	M_{sup}
Todas	743	1.08	1.17-1.01	4.4	8.0
$h \leq 45$	357	1.12	1.25-1.02	4.3	7.0
$45 < h \leq 100$	277	1.18	1.34-1.06	4.6	8.0
$h > 100$	74	1.11	1.42-0.90	4.4	8.0

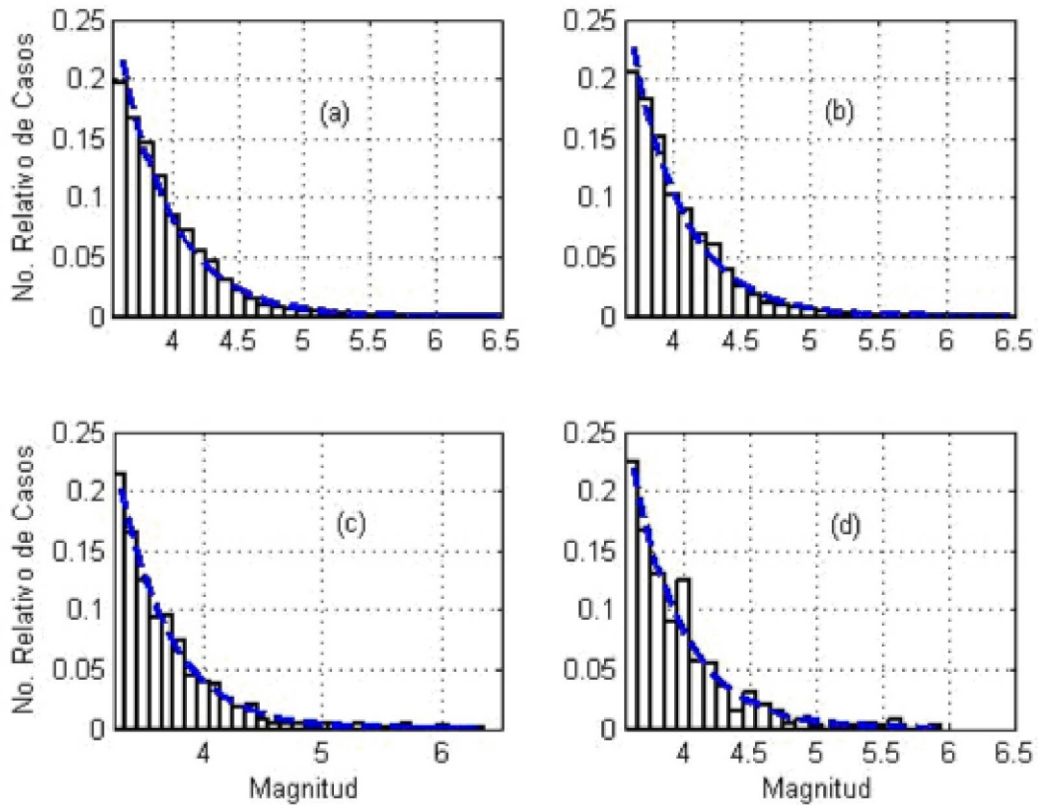


Figura 11. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para las dos regiones. Profundidades: a) todas; b) $h \leq 45$ km; c) $45 \text{ km} < h < 100$ km; d) $h \geq 100$ km

Tabla 4. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 11. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	b	Rango- b	M_{inf}	M_{sup}
Todas	5598	1.10	1.13-1.07	3.6	8.0
$h \leq 45$	3387	1.15	1.19-1.12	3.7	8.0
$45 < h \leq 100$	777	1.02	1.10-0.96	3.3	8.0
$h > 100$	400	1.12	1.23-1.01	3.6	8.0

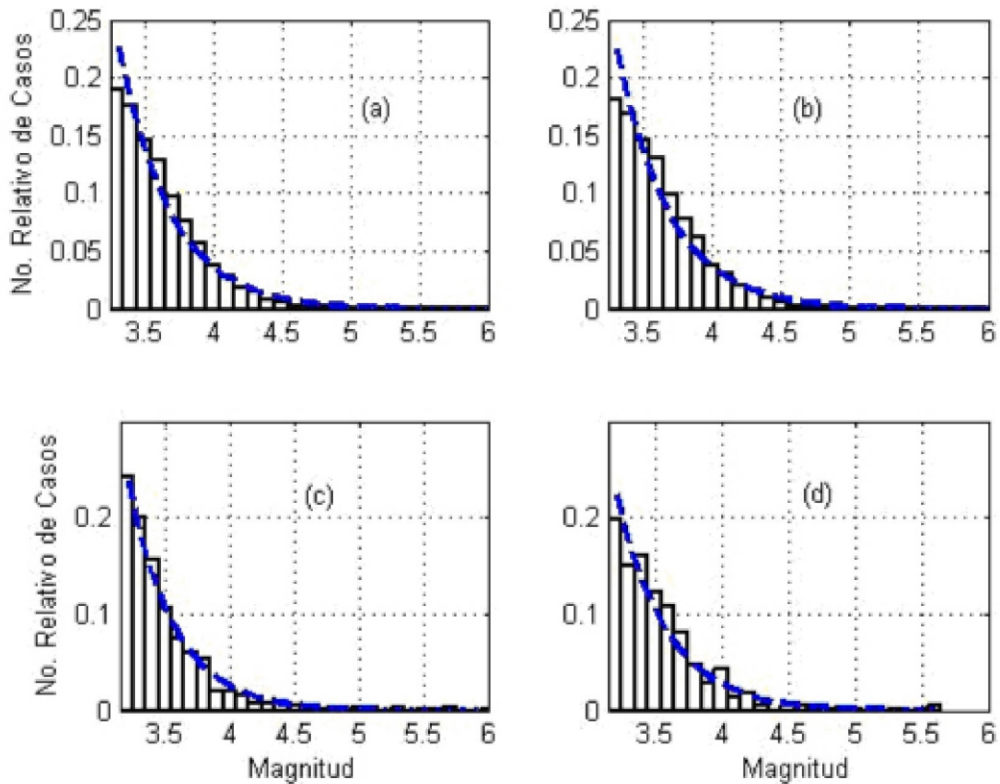


Figura 12. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para la región SE (frente a la costa de Nicaragua). Profundidades: a) todas; b) $h \leq 45$ km; c) $45 \text{ km} < h < 100$ km; d) $h \geq 100$ km.

Tabla 5. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 12. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	b	Rango- b	M_{inf}	M_{sup}
Todas	6344	1.16	1.19-1.13	3.3	8.0
$h \leq 45$	5235	1.14	1.18-1.11	3.3	8.0
$45 < h \leq 100$	770	1.24	1.33-1.15	3.2	8.0
$h > 100$	689	1.15	1.25-1.07	3.2	8.0

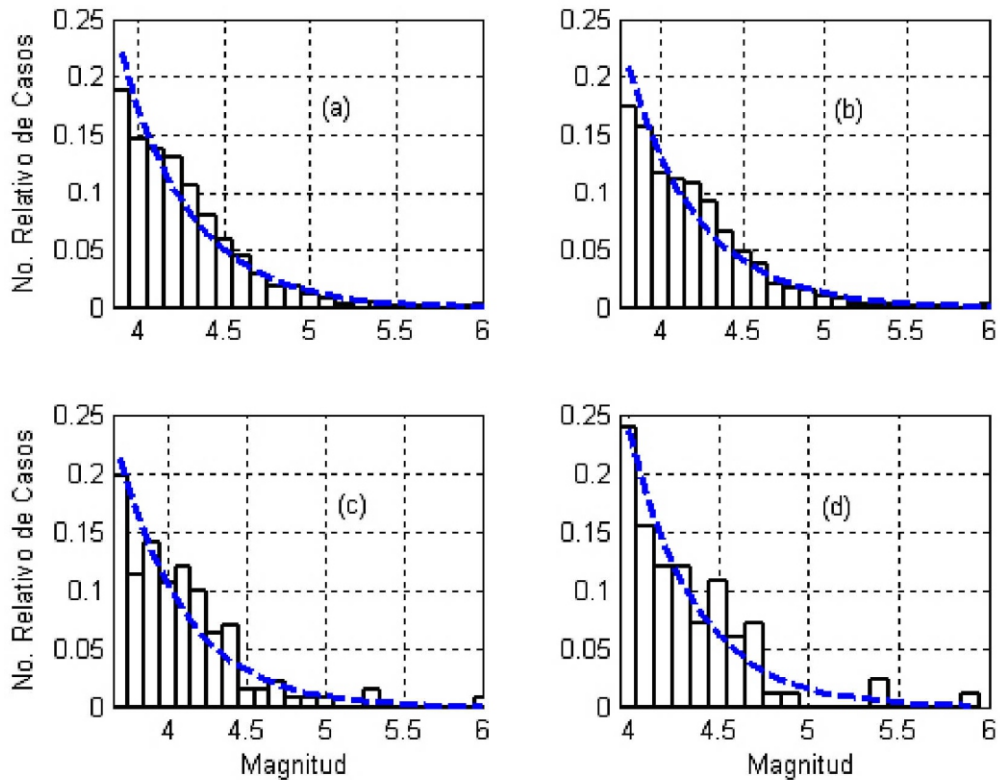


Figura 13. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para la región NW (frente a la costa de El Salvador). Profundidades: a) todas; b) $h \leq 45$ km; c) $45 \text{ km} \leq h < 100$ km; d) $h \geq 100$ km.

Tabla 6. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la figura 13. Los encabezados son los mismos que en la tabla 1.

Prof.	NC	<i>b</i>	Rango- <i>b</i>	M_{inf}	M_{sup}
Todas	1318	1.09	1.15-1.03	3.9	8.0
$h \leq 45$	1359	1.02	1.08-0.97	3.8	8.0
$45 < h \leq 100$	142	1.05	1.24-0.89	3.7	8.0
$h > 100$	84	1.18	1.48-0.96	4.0	8.0

el histograma tiene una "corcova" (con respecto a la tendencia central marcada por la línea de ajuste) entre las magnitudes entre 3.5 y 4.0. Si la magnitud de corte se aumenta a 3.6, los valores de *b* aumentan a 1.38 y 1.40, respectivamente, y la perturbación al ajuste desaparece. Por otro lado, si se aumenta la magnitud de corte en el análisis de catálogo regional en las tres variantes (completo y para las regiones SW y NE) nos queda un resultado contradictorio: los valores no regionalizados resultan ser "normales", entre 1.00 y 1.15, mientras que los regionalizados producen valores entre 1.20 y 1.35 (SW) y entre 1.30 y 1.40 (NE). Sólo si tomamos en cuenta la "corcova" en el cálculo, resultan valores compatibles para todo el catálogo y para la regionalización NW/SE. Semejante situación ocurre en varios otros casos que el lector puede revisar en las figuras; por ejemplo, hay casos con una oscilación entre las magnitudes 5.5 y 6.0. La Figura 8 es un ejemplo en este respecto; si dejamos afuera del ajuste a las magnitudes entre 5.5 y 6.0 resultan nuevamente valores muy altos de *b* que producen incompatibilidades en la regionalización y semejantes a las ya descritas. Hay reportes de oscilaciones en los histogramas de densidad alrededor de la tendencia central; un ejemplo es la Figura 3 de Utsu (1999). La presencia de estas convexidades y concavidades ha sido estudiada por Lasocki y Papadimitriou (2006), quienes proponen métodos estadísticos para evaluar la significación de ellas; de ser significativas, proponen un método no paramétrico (básicamente, suavización) para formar un modelo más complejo que la ley de Gutenberg-Richter.

En nuestro caso, observamos la presencia de oscilaciones (con respecto a una línea de ajuste a la ley de Gutenberg-Richter) tanto en datos que provienen del catálogo mundial como del regional, pero en distintos rangos de magnitudes; por ello, concluimos que estas perturbaciones con respecto a dicha ley no provienen de la realidad geofísica sino, probablemente, de peculiaridades de cada base de datos.

En este punto, vale la pena recapitular y señalar dos cosas: a) es común que se reporte (v. gr., Utsu, 1999; Pisarenko y Sornette, 2003; Lasocki y Papadimitriou, 2006) que la distribución de magnitudes presenta oscilaciones con respecto a una tendencia central (casi siempre, resultado del ajuste a la ley de Gutenberg-Richter) y b) dadas las dificultades para evaluar el efecto de la exactitud de los valores de magnitudes y del carácter completo de los catálogos en la determinación de la constante *b*, es costumbre aceptada evaluar el catálogo por los resultados de la estimación de la constante *b*.

Dejamos al estudio detallado de esta situación para otro trabajo y, provisionalmente, concluimos que, si suavizamos el efecto de estas oscilaciones, los valores de *b* resultan casi siempre "normales", en nuestro caso, entre 1.0 y 1.15.

Monterroso y Kulhánek (2003) utilizaron el catálogo regional MIDAS (30 años, 2345 sismos, magnitud umbral mínima de 4.2) para tratar de obtener la variación espacial del parámetro *b* en Centroamérica; para ello, utilizan, en profundidad, ventanas corridas con un número fijo de sismos. La región B (503 sismos; ventanas de 75 sismos) corresponde a la SE (Nicaragua) de nuestro trabajo. Obtienen 0.99 ± 0.04 como resultado de todo el catálogo; además, un valor de 1.440 ± 0.13 a una profundidad centrada en 124 km y en un rango de 40 km. Es difícil hacer una comparación de estos resultados con los nuestros.

El valor 1.44 a profundidades más grandes que 100 km se compara con también valores grandes que obtuvimos hasta que tomamos en cuenta la existencia de oscilaciones en los histogramas para definir la magnitud de corte inferior. Por otro lado, nos parece que el número de sismos que estos autores utilizan por ventana (75) y globalmente (386) es demasiado pequeño; en nuestro caso, los números son un orden de magnitud más altos (tabla 5). Si tomamos dos desviaciones estándares (0.26; 95% de confianza bajo la hipótesis gaussiana), la significación de la variación en profundidad del valor de b que estos autores encuentran no parece significativa. Por último, resulta imposible comparar resultados sin tener las figuras con el ajuste de los datos, cosa que Monterroso y Kulháněk (2003) no presentan.

La detección de cambios en el parámetro b antes y después de la ocurrencia del sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001 no entrega resultados claros; los datos no son suficientes como para llegar a conclusiones significativas.

MECANISMOS FOCALES

En el período 1976 a 2007, el catálogo CMT contiene 243 determinaciones de mecanismos focales en la región de estudio. El lector puede encontrar un despliegue de mecanismos focales ("beach-balls") obtenidos de esta y otras fuentes de información y para América Central en La Femina et al. (2002), Lindholm et al. (2004) y Fernández et al. (2004). Además de los mecanismos focales del CMT, hay determinaciones obtenidas de datos de redes regionales de América Central, así como de fuentes más antiguas como, por ejemplo, Molnar y Sykes (1969), Isacks y Molnar (1971) y Dean y Drake (1978). En esta sección, estudiamos la distribución de los mecanismos focales sólo del catálogo CMT ya que a) son muchos, b) son el resultado de un procedimiento único, c) creemos que el nivel de validez de las determinaciones es

homogéneo y d) el rango de fechas (30 años) del catálogo es adecuado. Preferimos analizar gráficamente los ejes P y T ya que es una forma más compacta de visualizar la base de datos y nos permite discutir, en forma más simple, su significación tectónica. Aunque la dirección de estos ejes no refleja necesariamente la distribución de los esfuerzos para sismos superficiales, ya que ellos pueden ocurrir en zonas de debilidad preestablecidas (fallas antiguas), esta situación no es tan cierta para sismos no superficiales.

Así, nos concentramos, primero, en encontrar regularidades en la distribución de los ejes P y T en la zona de subducción. Para formar las figuras siguientes, hemos utilizado ecuaciones como las entregadas por Gasperini y Vannucci (2003), comprobadas con las de Jarosh y Aboodi (1970). Con ellas, obtenemos la representación de los ejes P y T que visualizamos en la semiesfera superior y en proyección vertical y horizontal.

La Figura 14 muestra la distribución de los ejes P y T para sismos con profundidad mayor a 80 km y proyectados horizontalmente en el ecuador de una esfera focal común para todos los sismos. Se puede observar un fuerte agrupamiento de los ejes T en acimut e inclinación, con una inclinación (medida, a lo largo de todo este artículo, desde el eje vertical) promedio de 36.5° y una desviación estándar de 8.4° . Este valor señala la dirección de la subducción.

Además, resulta que los esfuerzos extensivos son los que se transmiten por la placa en subducción. Isacks y Molnar (1969) encuentran que esto sucede en la mayoría de las zonas de Benioff y, en particular aunque con muy pocos ejemplos, en Centro América.

La Figura 15 muestra los ejes P y T proyectados en una sección vertical y perpendicular a la costa. Hemos tomado todos los sismos con profundidad mayor a 80 km que están en el

catálogo y que aparecen en la figura anterior mientras que, para los sismos con profundidad menor a 80 km (dado el número muy alto de sismos), hemos seleccionado aquéllos con magnitud mayor o igual a 6.0. La Figura 16 es una ampliación, para profundidades menores a 80 km, de la figura anterior mientras que la Figura 17 muestra cuantitativamente la distribución de la inclinación (con respecto a la vertical) de los ejes P y T con la profundidad.

Observamos que las direcciones de los ejes T de sismos no superficiales ($h \geq 80$ km) tienen aproximadamente la dirección de subducción (Figura 4) y muestran un régimen extensivo en su interior. No se aprecia a estas profundidades mecanismos inversos asociados al movimiento relativo entre ambas placas.

Los sismos más superficiales (figuras 15 y 16) tienen: a) mecanismos de rumbo (ejes P y T casi horizontales) dentro del continente y asociados a la cadena volcánica; b) mecanismos normales (ejes P casi verticales; los T, casi horizontales) en el océano que señalan la flexión de la placa y c) mecanismos inversos (ejes T casi verticales; los P, casi horizontales), en el centro de la figura 16 y que se asocian al movimiento relativo de la placa. Estos resultados para sismos superficiales han sido reportados en la literatura (Dean y Drake, 1978; Burbach et al., 1984; White, 1991; La Femina et al., 2002).

La Figura 17 muestra cuantitativamente la distribución de la inclinación (medida con respecto a la vertical) de los ejes P y T con la profundidad. Para los primeros 55 km, hay una gran variedad en estos ángulos. A profundidades mayores, la inclinación de los ejes T muestran una disminución sistemática y con poca variabilidad hasta alcanzar un valor de $\sim 20^\circ$ a 200 km de profundidad. Este valor se acerca al de 13° que hemos estimado para la zona de Benioff a esa profundidad según el perfil vertical de sismicidad (Figura 4). Sin embargo, la inclinación del mecanismo focal del sismo más profundo

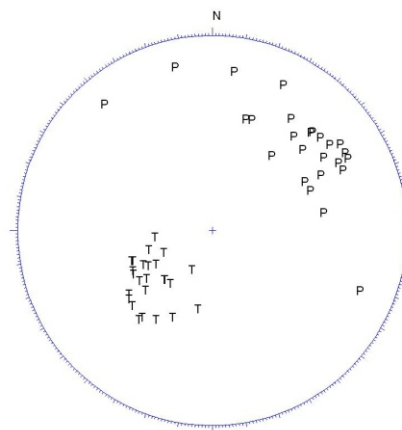


Figura 14. Ejes P y T (proyección equiareal, semiesfera superior de la esfera focal) de los sismos con profundidad mayor o igual a 80 km, para todas las magnitudes. El catálogo es el CMT entre 1976 y 2007.

rompe esta tendencia; es un caso aislado y con una profundidad que no es típica para esta región. El cambio de la dirección de la placa a los 100 km que se advierte en la dependencia de la profundidad de los hipocentros (Figura 4) está asociado al paso desde una gran variabilidad de las direcciones de los ejes P y T, para profundidades menores a los 100 km, al dominio de una muy simple tendencia sistemática a profundidades más grandes.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Nos hemos concentrado en tres temas específicos con resultados no reportados, a nuestro conocimiento, en la literatura.

Primero, en la determinación de la constante b de la relación de Gutenberg-Richter, no encontramos diferencias significativas en su distribución espacial; los valores estimados son compatibles con un rango entre 1.0 y 1.15. Los histogramas contienen oscilaciones alrededor de la tendencia central que es necesario tomar en cuenta en el ajuste; en caso contrario, pueden resultar valores incompatibles entre sí. No es posible comparar nuestros resultados con los de Monterroso y Kuhánek (2003) para la región de Nicaragua (común en ambos trabajos) debido a

que el número de datos que utilizan estos autores parece ser insuficiente para alcanzar una variabilidad pequeña a un nivel de significación del 95%; además, estos autores no publican las curvas de ajuste.

El hecho de que las oscilaciones de los histogramas observados alrededor de la curva de ajuste no coinciden en los dos catálogos utilizados indica que estas oscilaciones no provienen de una complejidad más alta que la del modelo dado por la distribución de Gutenberg-Richter. En este punto, es necesario acotar que la mayor parte de las modificaciones paramétricas de la relación de Gutenberg-Richter se refieren a magnitudes grandes, mayores a 7.0, lo que no es el caso para los catálogos utilizados en nuestro trabajo.

El sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001, = $M_w=7.7$, disparó sismicidad que cubre una

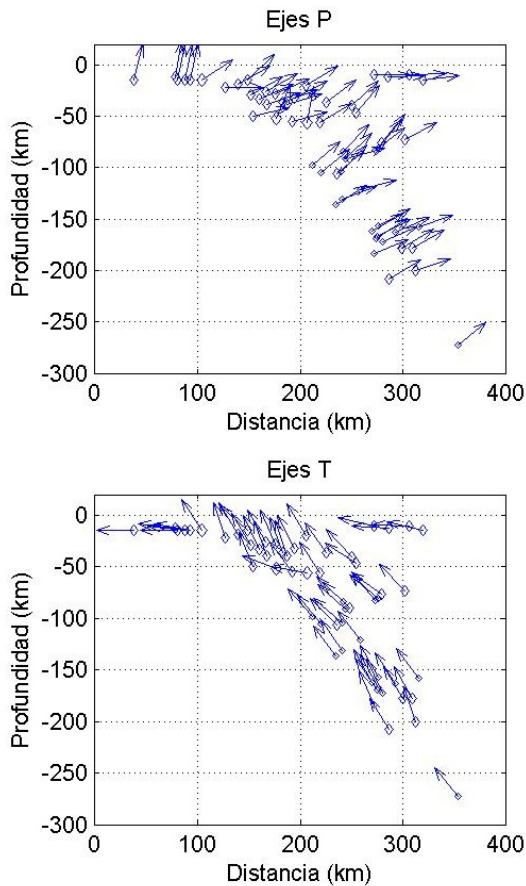


Figura 15. Visualización de la dirección de los ejes P y T con la profundidad y en dirección perpendicular a la costa.

región adicional a la hasta ahora reportada (v. gr., Parsons, 2002; Benito et al., 2004 y Martínez-Días et al., 2004).

Así, nos concentramos, primero, en encontrar regularidades en la distribución de los ejes P y T en la zona de subducción. Para formar las figuras siguientes, hemos utilizado ecuaciones como las Mostramos que una región de tamaño comparable al de réplicas y ubicado al SE de ella entró en actividad al ocurrir el sismo principal y lo ha estado haciendo por los últimos 6 años; la actividad se destaca claramente, específicamente en el rango de magnitud entre 5 y 5.5. Parsons (2002) ha estudiado globalmente la ocurrencia de sismicidad que ocurre afuera de la zona "clásica" de réplicas, es decir, en las inmediaciones del sismo principal y en el mismo plano de fractura. Este autor concluye que el sismo principal propaga esfuerzos de corte en subsecuentes y vecinos planos de ruptura; dicha actividad obedece a una forma generalizada de la ley de Omori, cuyo rango de acción llega hasta unos 240 km y por aproximadamente 7-11 años. La actividad que señalamos cumple con estos requerimientos, en distancia y tiempo.

Finalmente, el estudio de la distribución espacial de los ejes P y T de los mecanismos focales de la región proporciona más detalles que los reportados hasta ahora para esta región. Específicamente, los valores de la inclinación de la subducción a 200 km de profundidad y determinada por la sismicidad y los ejes T son $\sim 20^\circ$ y $\sim 13^\circ$, respectivamente. Además, la inclinación medida por la dirección de los ejes T muestra una disminución sistemática y con poca variabilidad desde un valor de 50° a una profundidad de unos 70 km. Pensamos que la visualización de los ejes P y T entrega en forma más rápida y compacta el significado sismotectónico de un conjunto de mecanismos focales, en comparación con las populares figuras con "beach balls". Este tipo más simplificado de visualización proviene de los clásicos trabajos de Isacks y Molnar (1969, 1971).

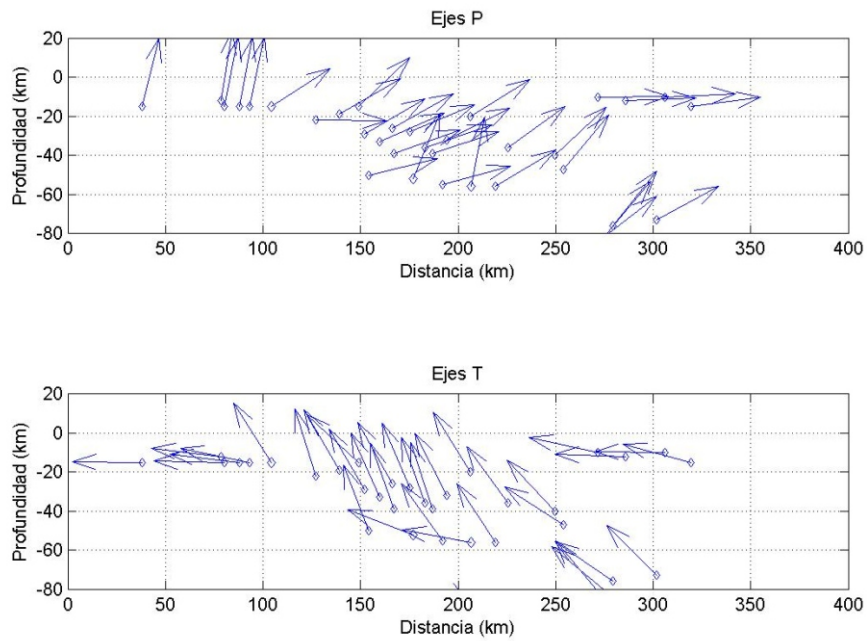


Figura 16. Ampliación de la Figura 15 para profundidades menores a los 80 km.

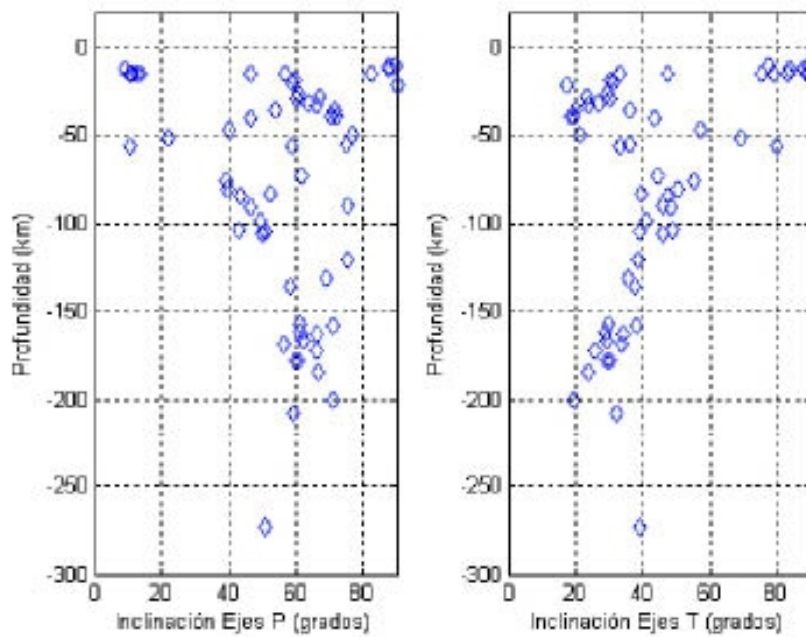


Figura 17. Variación de la inclinación (medida con respecto al eje vertical) de los ejes P y T con la profundidad. Los datos son los mismos que se utilizan en la Figura 15.

Los dos ejemplos del uso de las direcciones de los ejes P y T que hemos encontrado, aunque para las placas en subducción en el Pacífico Noroeste, son Houston y Zhang (1992) y Zhou (1990).

Este trabajo, además, muestra que es posible utilizar datos electrónicos de acceso público para propósitos de proyectos de clases en el posgrado de Ciencias de la Tierra con el objeto de aplicar conocimientos e iniciativas así como habilidades computacionales. Los resultados, como en nuestro caso, pueden ser significativos en cuanto a investigación..

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a las instituciones de las cuales obtuvimos nuestra información, especialmente al personal del INETER (Nicaragua) que gentilmente complementó la información obtenida de su sitio electrónico. Agradecemos también la dedicación y pulcritud de los dos árbitros. J. Carlos ayudó a formatear el catálogo regional de sismos de Nicaragua para dejarlo en una versión de uso simple en nuestros programas de cómputo mientras que V. Frías, con gran paciencia, diagramó la figura 1 de acuerdo a nuestros requerimientos. Este artículo surgió de una extensión de un proyecto de clase en el curso de posgrado sobre Sismotectónica que entrega el primer autor en el CICESE.

REFERENCIAS

- Aki, K. (1965) Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits, Bulletin Earthquake Research Institute, vol. 43, pp. 232-239.
- Algermissen, S.T., J.W. Dewey, W.H. Dillinger and C.J. Langer (1974) The Managua earthquake of December 13, 1972: Location, focal mechanism, and intensity distribution, BSSA, vol. 64, pp. 993-1003.
- Ambraseys, N.N. and R.D. Adams (2001) The Seismicity of Central America: A Descriptive Catalogue: 1898-1995, World Scientific Science, 308 pp.
- Benito, B., J.M. Cepeda and J.J. Martínez (2004) Analysis of the spatial and temporal distribution of the 2001 earthquakes in El Salvador, en: Rose, W.I., J.J. Bommer, D. López, M.J. Car, and J.J. Major (eds.), *Natural Hazards in El Salvador*, Special Paper 375, Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp. 339-356.
- Brown, R.D., P. L. Ward and G. Plafker (1974) Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua, earthquakes of December 23, 1972, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 64, pp. 1031-
- Burbach, G. V., C. Frohlich, W. D. Pennington and T. Matumoto (1984) Seismicity and tectonics of the subducted Cocos plate, Journal of Geophysical Research, vol. 89, pp. 7719-7735.
- Dean, B.W. and C.L. Drake (1978) Focal mechanism solutions and tectonics of Central America, Journal of Geology, vol. 86, pp. 111-128.
- Dewey, J.W. and S.T. Algermissen (1974) Seismicity of Middle America arc-trench system near Managua, Nicaragua, BSSA, vol. 64, pp. 1033-1048.
- Dewey, J.W. and G. Suárez (1991) Seismotectonics of Middle America, en: Slemmons, D.B., E.R. Engdahl, M.D. Zoback and D.D. Blackwell (eds.), *Neotectonics of North America*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Decade Map Volume I, pp. 309-321.
- Fernández, M., C.D. Escobar and C.A. Redondo (2004) Seismographs networks and seismic observations in El Salvador and Central America, en: Rose, W.I., J.J. Bommer, D. López, M.J. Car, and J.J. Major (eds.), *Natural Hazards in El Salvador*, Special Paper 375, Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp. 257-268.

- Gasperini, P. and G. Vannucci (2003) FPSPACK: a package of FORTRAN subroutines to manage earthquake focal mechanism data, *Computers and Geosciences*, vol. 29, pp. 893-901.
- Gutenberg and Richter (1954) *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Princeton University Press, 273 pp.
- Guzmán-Speziale, M. (2001) Active seismic deformation in the grabens of northern Central America and its relationship to the relative motion of the North-America_Caribbean plate boundary, *Tectonophysics*, vol. 337, pp. 39-51.
- Harlow, D.H. and R.A. White (1985) Shallow earthquakes along the volcanic chain of Central America: Evidence for oblique subduction, [abs.], *Earthquake Notes*, v. 56, pp. 28.
- Houston, H. and J. Zhang (1992) A global survey of the state of stress in subducting slabs: the role of phase transitions, en: D. Christensen, M. Wyss, R.E. Haberman, and J. Davies (eds.), *Proc. Wadati Conf. Subduction Earthquakes*, pp. 37-38, Fairbanks: Geophys. Inst. Univ Alaska. (NER)
- Husen, S., R. W. Quintero, E. Kissling and B. Hacker (2003) Subduction-zone, structure and magmatic processes beneath Costa Rica constrained by local earthquake tomography and petrological modeling, *Geophys. J. Int.*, vol. 155, pp. 11-32.
- Isacks, B. and P. Molnar (1969) Mantle earthquake mechanisms and the sinking of the lithosphere, *Nature*, vol. 223, pp. 1121-1124.
- Isacks, B. and P. Molnar (1971) Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal-mechanism solutions of mantle earthquakes. *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 9, pp. 103-174.
- Jarosh, H. and E. A. Aboodi (1970) Towards a unified notation of source parameters, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, vol. 21, pp. 513-529.
- La Femina, P. C., T. H. Dixon and W. Strauch (2002) Bookshelf faulting in Nicaragua, *Geology*, vol. 30, pp. 751-754.
- Lasocki, S. and E. Papadimitriou (2006) Magnitude distribution complexity in seismicity from Greece, *Journal of Geophysics Research*, vol. 111, B11309, doi:10.1029/2005JB003794.
- Lindholm, C.D., C.A. Redondo and H. Bungum (2004) Two earthquake databases for Central America; en: W.I. Rose, J.J. Bommer, D. López, M.J. Car y J.J. Major (eds.), *Natural Hazards in El Salvador*, Special paper 375, Geological Society of America, Boulder Colorado, pp. 357-362.
- Martínez-Días, J. J., J. A. Álvarez-Gómez, B. Benito and D. Hernández (2004) Triggering of destructive earthquakes in El Salvador, *Geology*, vol. 32, pp. 65-68.
- Matumoto, T.M., M. Ohtake, G. Latham and J. Umana (1977) Crustal structure in Southern Central America, *BSSA*, vol. 67, pp. 121-133.
- Molnar, P. and L.R. Sykes (1969) Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity, *Geol. Soc. Am. Bulletin*, vol. 80, pp. 1639-1684.
- Monterroso, D. A. and O. Kulhánek (2003) Spatial variations of b-values in the subduction zone of Central America, *Geofísica Internacional*, vol. 42, pp. 575-587.
- Montero, W. and G. Peraldo (2004) Current knowledge of the Central America historical seismicity: an analysis of recent catalogues, vol. 47, pp. 477-485.
- Parsons, T. (2002) Global Omori-law decay of triggered earthquakes: Large aftershocks outside the classical aftershock zone, *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, 2199, DOI 10.1029/2001JB000646.
- Pisarenko, V.F. and D. Sornette (2003) Characterization of the frequency of extreme earthquake events by the generalized Pareto distribution, *Pure and Applied Distribution*, vol. 60, pp. 2343-2364.
- Protti, M., F. Gundel and K. McNally (1994) The geometry of the Wadati-Benioff zone under southern America and its tectonic significance: results from high-resolution local seismographic network, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 84, pp. 271-287.
- Protti, M., F. Gundel and K. McNally (1995) Correlation between the age of the subducting Cocos Plate and the geometry of the Wadati-Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica, en: Mann, P. (ed.), *Geological and Tectonics Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 295, pp. 309-326.
- Quintero, R. and E. Kissling (2001) An improved P-wave velocity reference model for Costa Rica, *Geofísica Internacional*, vol. 40, pp. 3-19.

- Randall, A.W., J.P. Logorría, and I.L. Cifuentes (2004) Seismic history of the Middle America subduction zone along El Salvador, Guatemala and Chiapas, México: 1526-2000; en: Rose, W.I., J.J. Bommer, D. López, M.J. Car, and J.J. Major (eds.), *Natural Hazards in El Salvador*, Special Paper 375, Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp.378-3396.
- Rose, W.I., J.J. Bommer, D. López, M.J. Car, and J.J. Major (eds.) (2004) Natural hazards in El Salvador, Special paper 375, Geological Society of America, Boulder Colorado.
- Utsu, T. (1965) A method for determining the value of b in the formula $\log N = a - bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes, *Geophysical Bulletin Hokkaido University*, vol.13, pp.99-103.
- Utsu, T. (1966) A statistical significance test of the difference in b -value between two earthquake groups, *Journal of the Physics of the Earth*, vol.14, pp.37-40.
- Utsu, T. (1999) Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches, *Pure and Applied Geophysics*, vol.155, pp.509-535.
- White, R. A. (1991) Tectonics implications of upper-crustal seismicity in Central America; en: Slemmons, D.B., E.R. Engdahl, M.D. Zoback and D.D. Blackwell (eds.), *Neotectonics of North America*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Decade Map Volume I, pp.323-3338.
- White, R. A. and D. H. Harlow (1993) Destructive upper-crustal earthquakes of Central America since 1900, *BSSA*, vol.83, pp.115-1142.
- Zhou, H.W. (1990) Observations on earthquake stress axes and seismic morphology of deep slab, *Geophys. J. Int.*, vol.103, pp.377-401.

Manuscrito recibido: 7 de noviembre de 2007

Manuscrito aceptado: 5 de mayo de 2008