

LOCALIZACIÓN DE PROBABLES ASPEREZAS EN EL OCCIDENTE VENEZOLANO, MEDIANTE TIEMPOS MÍNIMOS DE RECURRENCIA LOCAL

América Bendito Pedro Rivero William Lobo Quintero

Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

RESUMEN

Se evalúa la variabilidad espacial del estimado probabilístico del tiempo de recurrencia local T_L , a partir de valores locales de a y b de la distribución frecuencia-magnitud, sobre la hipótesis de que valores anormalmente bajos de T_L ayudan a estimar zonas con alta concentración de esfuerzos (asperezas) y que éstos están vinculados con valores bajos de b . Con una malla rectangular espaciada a 0,01 grados y para la sismicidad reciente de la región occidental de Venezuela, entre 1985 y 2000, se calculan los valores de a , b y T_L , con eventos dentro de un radio de 20 km alrededor de cada nodo. Los resultados evidencian la asociación de los terremotos de 1610 y 1812 con zonas de valor bajo de b , y la ubicación de una probable aspereza sobre un sector de la falla de Bocono, en la ciudad de Mérida, que se extiende sobre la falla de Piedemonte occidental. Estos importantes segmentos, no han producido todavía un sismo principal, pero éstos aún pueden ocurrir. La metodología, actualmente en desarrollo, proporciona las más probables localizaciones de sismos fuertes y no contiene información sobre cuando pueden producirse y su fiabilidad depende de su correlación en muchas áreas y casos.

LOCATION OF PROBABLE ASPERITIES IN THE WESTERN REGION OF VENEZUELA, BY MINIMA OF LOCAL RECURRENCE TIME

ABSTRACT

The space variability of local recurrence time T_L , is evaluated from local values of a and b of the frequency-magnitude distribution, on the hypothesis that anomalously low values of T_L help to consider zones with high concentration of stress (asperities) and that these are tied to minima in b -values. With a spaced rectangular grid to 0.01 degrees and the modern earthquake catalog covering the western region of Venezuela, from 1985 to 2000, the a -, b - and T_L -values are calculate at every node, with events within a radius of 20 km around each node. The results suggest the association of earthquakes of 1610 and 1812 with zones of low b -value, and the location of a probable asperities on a sector of the fault of Bocono, in the city of Mérida, that extends on the fault of western Piedemonte. These important segments, have still not produced a earthquake, but these still can happen. The methodology, at the moment developing, provides the most probable locations of earthquakes and it does not contain information on when they can take place and its reliability depends on its correlation in many areas and cases.

1. INTRODUCCIÓN

A la ocurrencia de un terremoto, la propagación del frente de ruptura sobre el plano de falla, es heterogénea, difícil de describir y depende principalmente del estado de esfuerzos a la que se encuentra sometida la zona a fallar. Dos modelos han sido desarrollados para explicar la complejidad de los procesos de ruptura: el modelo de Barreras y el modelo de Asperezas. Estos dos términos asignan diferentes roles a las partes fuertes en un proceso de ruptura durante un terremoto. La Figura 1 presenta los diferentes modelos de ruptura: la izquierda muestra la condición de una falla justo antes de un sismo

mientras la de la derecha muestra su condición después del sismo. La parte superior de la figura se basa en el modelo de barreras, mientras la inferior se basa sobre el modelo de asperezas. La sección gris representa la porción esforzada de la falla mientras la otra es la porción no esforzada.

De acuerdo al modelo de barreras, la falla se encuentra en un estado uniforme de esfuerzo antes del terremoto, el cual tiene lugar por el fracturamiento en zonas débiles o zonas de baja fricción, incapaces de soportar el nivel de esfuerzo. Durante el terremoto, la ruptura se propaga dejando parches fuertes sin romperse (barreras) que constituyen la zona de localización de las posteriores réplicas. En el modelo de asperezas, justo antes del sismo principal la falla no se encuentra en un estado uniforme de esfuerzos, sino que existe una extensa liberación de esfuerzos sobre algunas partes de las fallas a través de sismos premonitorios (foreshock) dejando atrás parches fuertes (asperezas). Durante el sismo principal estas asperezas se rompen resultando en un desplazamiento de la falla.

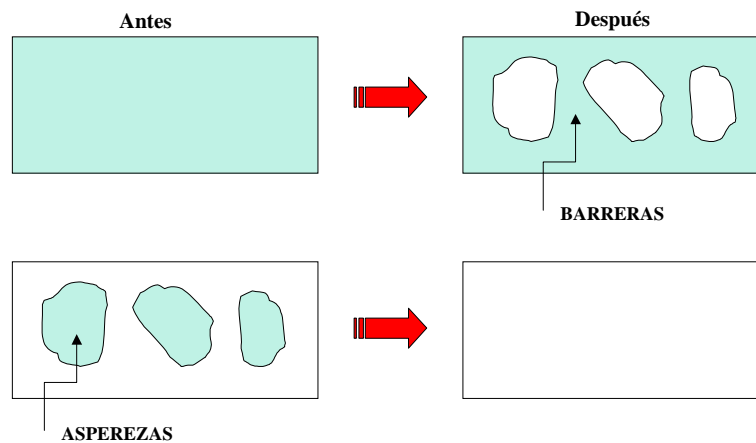


Figura 1. Modelos de ruptura de fallas: barreras (superior) y asperezas (inferior), (Reiter L., 1990)

En el modelo de aspereza el terremoto se inicia en una zona donde no se ha producido eventos por un tiempo, lo que describe la presencia de un gap sísmico o de una zona con gran acumulación de energía. Esto es de suma importancia en la estimación de amenaza y riesgo sísmico porque la mayoría de estos estudios asumen que las fallas poseen propiedades uniformes. Esto hace necesario un análisis que conduzca a estimar la localización geográfica de las zonas donde podría estarse gestando un proceso de acumulación de energía.

Se ha propuesto que las asperezas pueden ser caracterizadas por valores anormalmente bajos de b de la distribución frecuencia-magnitud, contrastando con valores altos de b en los segmentos blandos de las fallas. La determinación espacial de tiempos de recurrencia anormalmente bajos estimados a partir de valores locales de a y b , ayudan a ubicar geográficamente las zonas que pueden considerarse como asperezas (Wiemer y Wyss, 1997). El tiempo de recurrencia local T_L se estima a partir de los sismos contenidos dentro de un volumen definido por un radio constante r , a partir de la ecuación:

$$\text{Log } N = a - b M \quad (1)$$

donde N es el número de sismos con una magnitud igual o mayor que M sobre un período de observación ΔT , dado por:

$$T_L(M) = \frac{\Delta T}{10^{(a-bM)}} \quad (2)$$

Como la tasa de sismicidad, a , varía en función del espacio lo que es evidente en cualquier mapa de sismicidad y, recientemente se ha hecho evidente que también b varía fuertemente sobre distancias de pocos kilómetros (aunque en grandes volúmenes el valor promedio tiende a mostrarse alrededor de 1); entonces $T_L(M)$ también es una función del espacio. La probabilidad local P_L anual por km^2 para un sismo con una magnitud dada (M), se evalúa como la inversa de T_L normalizada por el área a partir de la cual se calcula T_L , a través de la ecuación (3). Entonces, los mapas de T_L y P_L son equivalentes.

$$P_L(M) = \frac{(1/T_L)}{A} \quad (3)$$

La estimación de tiempos de recurrencia para los métodos probabilísticos a partir de valores globales de a y b de la ecuación de Gutenberg-Richter puede llegar a ser incorrecta, cuando se derivan para un segmento completo de una falla, parte de la cual podría romperse durante un sismo principal, ya que el proceso tectónico que tiene lugar dentro de una aspereza ejerce el control del tiempo de ocurrencia para un sismo principal y la amplitud de su deslizamiento. En consecuencia, el tiempo de recurrencia debe ser estimado a partir de valores locales de a y b dentro de la aspereza, si esto es posible.

Estas hipótesis han sido exitosamente probadas dentro de la zona de fallas de San Jacinto-Elsinore, al sur de California. Wyss *et al.* (2000), correlacionaron cinco de seis terremotos ocurridos durante el período de 1899-1968 determinando espacialmente el valor de los tiempos de recurrencia local utilizando la información contenida en un catálogo sísmico moderno entre 1981-2000. La microsismicidad de la región del Mar de Marmara, Turquía, durante el periodo comprendido entre 1983 y 1999, permitió inferir cuatro (4) zonas anómalas con T_L anormalmente bajos, uno de los cuales correlaciona con la localización epicentral del terremoto de Izmit de 1999 con magnitud $M_w=7,4$ (Öncel y Wyss, 2000). También se han estimado tiempos de recurrencia local dentro de asperezas definidas espacialmente, que correlacionan con los tiempos de recurrencia observados en varias regiones a lo largo de la costa del pacífico mexicano (Zúñiga y Wyss, 1999).

Dado que las hipótesis de trabajo asumen que el $T_L(M)$ dentro de las asperezas es el parámetro crítico, el mapa de $T_L(M)$ o, alternativamente, el mapa de $P_L(M)$, debe hacerse con una malla densa en volúmenes con radio igual a las dimensiones de las asperezas. Sin embargo, dentro del Occidente de Venezuela no se conoce el tamaño de las asperezas y hasta pueden variar de tamaño a lo largo y ancho de la región, por lo que es probable que la selección de r no fuese igual a las dimensiones de las asperezas existentes. Si r fuese más pequeño, el procedimiento trazaría fielmente la magnitud de las anomalías, si es que éstas existen. Si r es más grande que las asperezas existentes (probablemente este caso), entonces las muestras contendrán eventos ubicados dentro y fuera de éstas, afectando la amplitud de los valores anómalos de b y T_L . Bajo este escenario, los resultados posiblemente no serán ajustados, pero no por ello inútiles, ya que no influirían en la posición de las asperezas o su existencia, sólo tendría influencia en el tiempo calculado de recurrencia en años, siendo el aspecto más importante en la distribución espacial de T_L , el contraste entre el área que muestra tiempos anormalmente cortos con respecto al resto del área circundante.

2. BASE DE DATOS DE SISMICIDAD

La Figura 2 muestra el mapa con las fallas tectónicas más importantes en el Occidente de Venezuela, donde destaca la Falla de Boconó, como el principal accidente tectónico de la región. Esta falla de tipo transcurrente dextral, que representa uno de los rasgos geotectónicos más importantes del noroccidente de América del Sur, se caracteriza por valles y depresiones lineales, orientados aproximadamente en dirección $N45^\circ E$. Se extiende por más de 500 km y ha dado origen a los más grandes terremotos en la región, el último de ellos el 26/03/1894, con magnitud 7,1 Ms, que destruyó a la ciudad de Mérida y otras poblaciones del Estado.

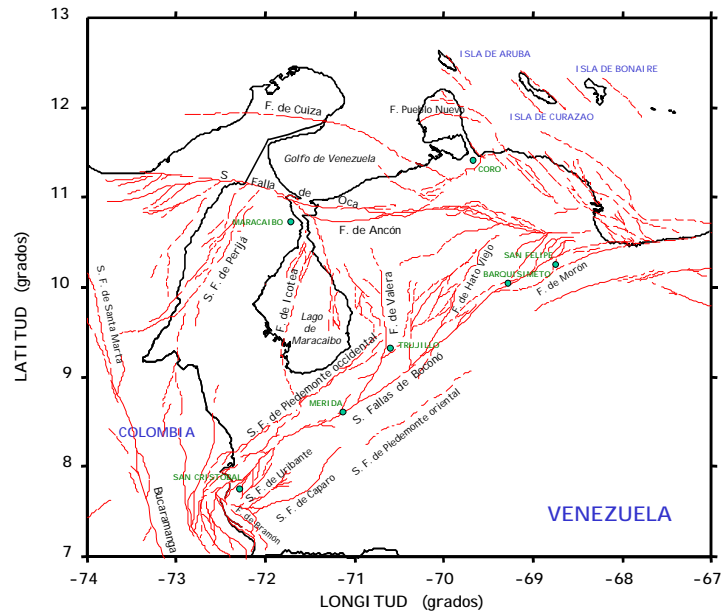


Figura 2. Mapa neotectónico del Occidente venezolano con las fallas con actividad cuaternaria

La base de datos que sirve para compilar un catálogo sísmico entre 1985 y 2000, parte de los registros de la Red Sismológica de los Andes Venezolanos (RedSAV), de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y de la National Earthquake Information Center (NEIC) para la región comprendida entre las coordenadas: latitud 7° N a 13° N y longitud 74° W a 67° W. El catálogo resultante contiene 3351 eventos sísmicos entre 1,5 y 6,4 de magnitud mb. La distribución espacial de la sismicidad en la región para el período comprendido entre 1985 y 2000, se muestra en la Figura 3(a), donde se evidencia como la mayor parte de la actividad sísmica es producto de la actividad generada por el sistema de fallas de Boconó.

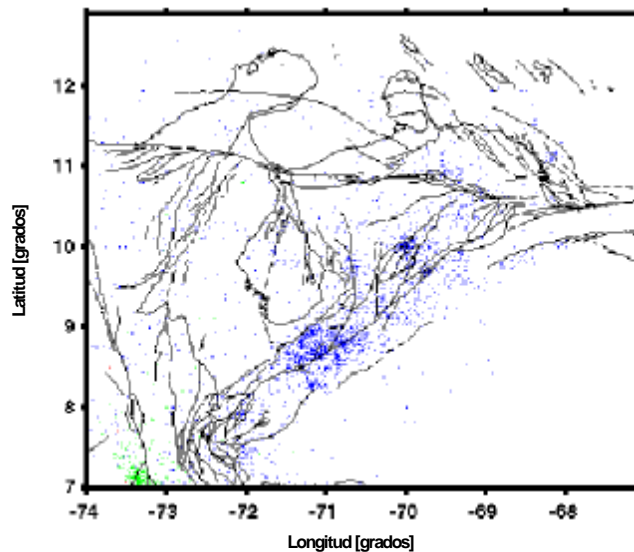


Figura 3. (a) Mapa de sismicidad de la región con $mb \geq 2,0$ entre 1985 y 2000

El catálogo se depura para eliminar eventos dependientes, usando el algoritmo de Reasenberg (1985) codificado en el programa ZMAP (Wiemer, 1996), considerando un error en la determinación del epicentro de 5 km y un error en la determinación de la profundidad de 10 km, con el resto de los parámetros sugeridos en el trabajo original. El número de eventos independientes acumulados y reportados para la región para el período 1985-2000, mostrado en la Figura 3(b), muestra una pendiente relativamente constante con el tiempo, lo cual indica que puede asumirse un reporte homogéneo a partir de 1985, en toda la región considerada.

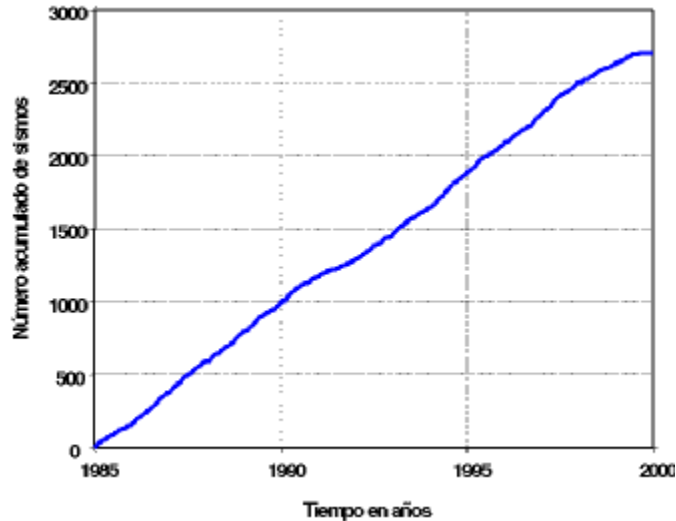


Figura 3. (b) Número acumulado de sismos como función del tiempo durante el periodo 1985-2000, para el catálogo depurado

3. METODOLOGIA

Se construye una malla rectangular con nodos espaciados a cada 0,02 grados para determinar el radio de resolución r , necesario para incluir 100 eventos alrededor de cada nodo de la malla, durante el período comprendido entre 1985 y 2000. El valor de r es una función del espacio e inversamente proporcional a la densidad local de eventos: áreas con alta densidad de sismos resultan en un cilindro más pequeño que áreas con baja sismicidad.

Los resultados presentados en la Figura 4, muestran la existencia de dos círculos sobre la traza principal de la falla de Boconó: uno sobre el Estado Mérida, con centro en las coordenadas: 71,15° W, 8,60° N, y otro de menor extensión sobre el Estado Lara con centro en las coordenadas: 70° W, 10° N. En estos círculos se alcanza radios de resolución entre 20 km y de 40 km. El resto de la zona de influencia del sistema de falla de Boconó tiene radios de resolución superiores a 50 km para alcanzar los 100 eventos alrededor de cada nodo de la malla, con la información sísmica reciente desde 1985.

En el estudio sobre el sistema de fallas San Jacinto-Elsinore (Wyss *et.al.*, 2000) se estimó que, en promedio, la magnitud equivalente derivada en una aspereza es aproximadamente 0,4 unidades menor que la magnitud del sismo principal y que para un terremoto de magnitud $M=6,4$ se tiene una magnitud de 6,0 en la aspereza. Para este valor, la aspereza puede tener dimensiones de alrededor $r=3$ km. En áreas donde los sismos más fuertes son de $M=7,5 \pm 0,5$, con longitudes de rupturas de alrededor de 100 a 200 km, las asperezas pueden tener un radio de aproximadamente 25 ± 15 km (Zúñiga y Wyss, 1999).

Las magnitudes más grandes que han ocurrido a lo largo de la falla de Boconó en el pasado son de $6,0 \pm 0,5$ mb. La resolución del catálogo impide efectuar análisis con radios tan pequeños como 3 km para

ubicar espacialmente asperezas que puedan generar sismos de magnitud 6,0 ya que el número de eventos sería insuficiente para estimar los parámetros de a y b , con lo cual estamos forzados a utilizar un radio mayor. El área que presenta mejor resolución es el Estado Mérida (Figura 4) el cual tiene en algunas zonas suficiente resolución para utilizar radios de hasta 20 km. Sin embargo, este no es el caso general.

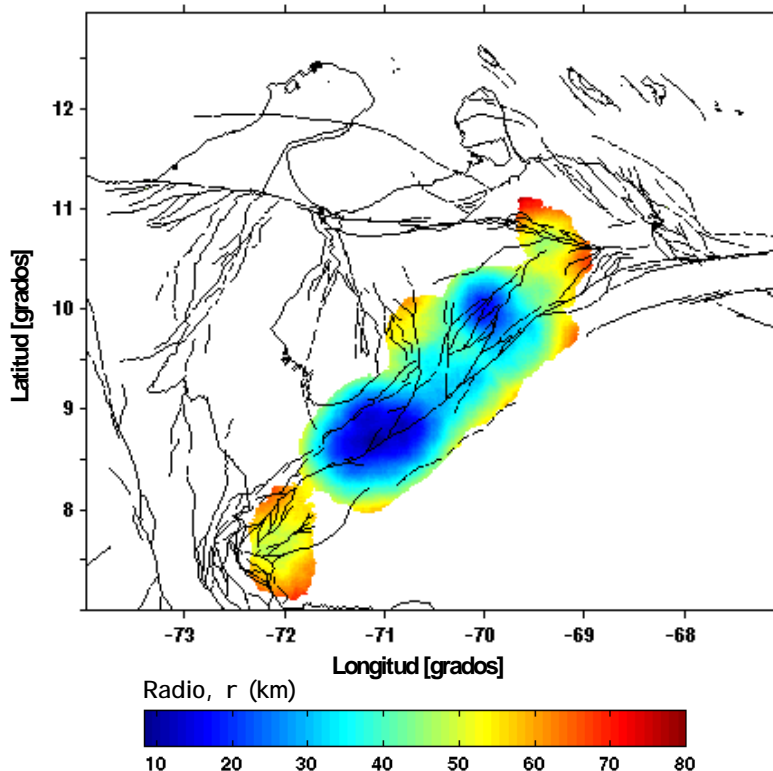


Figura 4. Mapa de resolución para el catálogo depurado entre 1985-2000. Los colores están relacionados con el radio que contiene 100 eventos alrededor de cada nodo de la malla

Para determinar espacialmente la ubicación de probables asperezas dentro de la región en estudio, se usa el valor más pequeño de r que contenga suficientes eventos para permitir una adecuada evaluación estadística de a y b . Se establece un mallado con alta resolución para determinar la variación espacial de los parámetros a , b y $T_L(M)$ mediante la técnica de mallas codificada en el programa ZMAP (Wiemer, 1996). Los nodos de la malla son separados a cada 0,01 grados, usando los eventos más cercanos dentro de un radio constante de 40 km alrededor de cada nodo. También se usaron radios de 30 y 50 km para verificar que los resultados no dependieran sobre el tamaño del radio seleccionado.

El análisis se limitó a eventos con profundidades menores a 30 km ya que la mayoría de los eventos a lo largo de la traza principal de la falla de Boconó tienen profundidades menores a ésta. Se incluye la información contenida a partir del año 1985 donde se tiene un reporte más completo y homogéneo de eventos, ya que la resolución del análisis depende tanto de la magnitud mínima de completitud como del número de eventos registrados. Para no alterar los valores locales de b por la presencia de sismos precursoros y réplicas, se utiliza el catálogo depurado con el algoritmo de Reasenber (1985). Adicionalmente, se remueven todos los sismos principales por encima de 5,0 mb, con lo cual el evento de mayor magnitud que permanece dentro del período analizado es de 5,0 mb. La magnitud de completitud para la región durante este período es de 3,4 mb. Sin embargo, el uso de magnitudes menores no afecta los resultados ya que ZMAP estima el valor de M_c separadamente para cada volumen.

4. RESULTADOS

Los resultados de aplicar el procedimiento para un sector del sistema de fallas de Boconó se muestran en la Figura 5 con la distribución espacial de los valores de b . Puede verse como, en general, se tiene un valor promedio de b aproximadamente igual a 1,2 en la zona (Figura 6), pero localmente los valores varían entre 0,60 y 2,0; existiendo una alta heterogeneidad de valores de b a lo largo de la traza principal de la falla de Boconó, pudiéndose encontrar valores de 0,80 y 1,80 separados por solo 20 kilómetros de distancia.

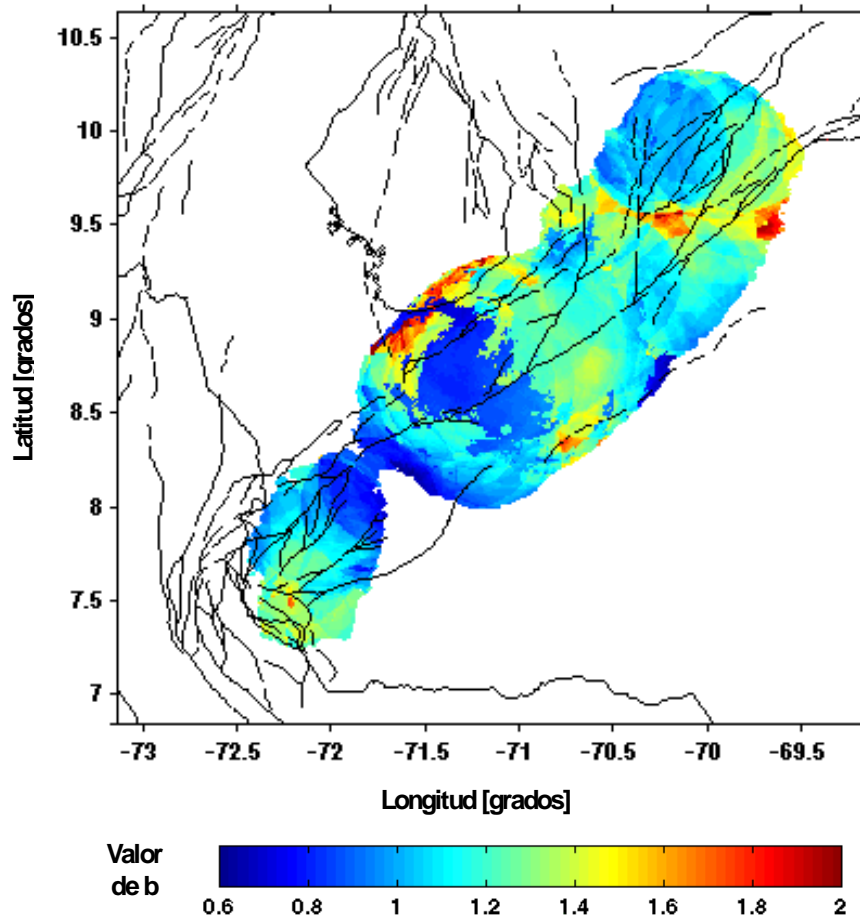


Figura 5. Mapa de valores de b a lo largo de la falla de Boconó. El espaciamiento de nodos es de 0,01 grados y un radio constante de 40 km alrededor de cada nodo

El mapa de valores de a muestra un patrón similar al de b , pero afina los contrastes. Los valores más bajos de b , indicados en la Figura 5 por los tonos grises más profundos, se observan dentro del Estado Mérida, sobre un área que abarca un tramo de la Falla de Boconó en la ciudad de Mérida y se extiende hacia el norte hasta alcanzar un tramo de la Falla de Piedemonte occidental que representa el límite noroccidental de la cordillera andina y es una falla inversa, de ángulo bajo, que permite al volumen montañoso avanzar por encima de la planicie de la zona sur del Lago de Maracaibo. También puede verse una zona de bajo valor de b en los límites de los Estados Táchira y Mérida. La falta de continuidad en el contorno de los colores se debe a la falta de información sobre los correspondientes nodos de la malla.

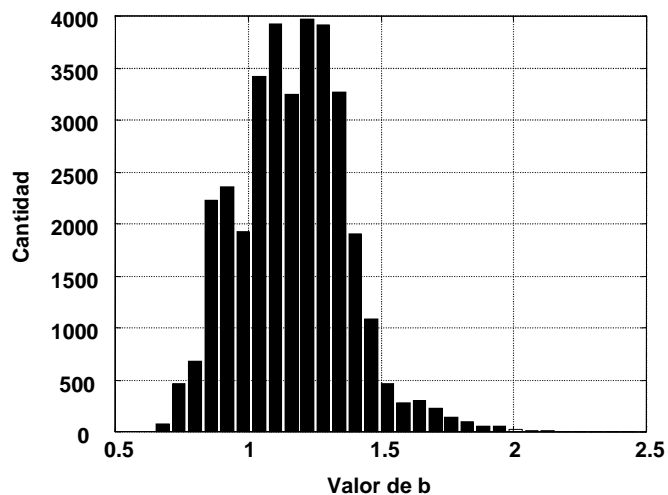


Figura 6. Histograma de valores de b observados en cada nodo de la malla del mapa de la figura 4

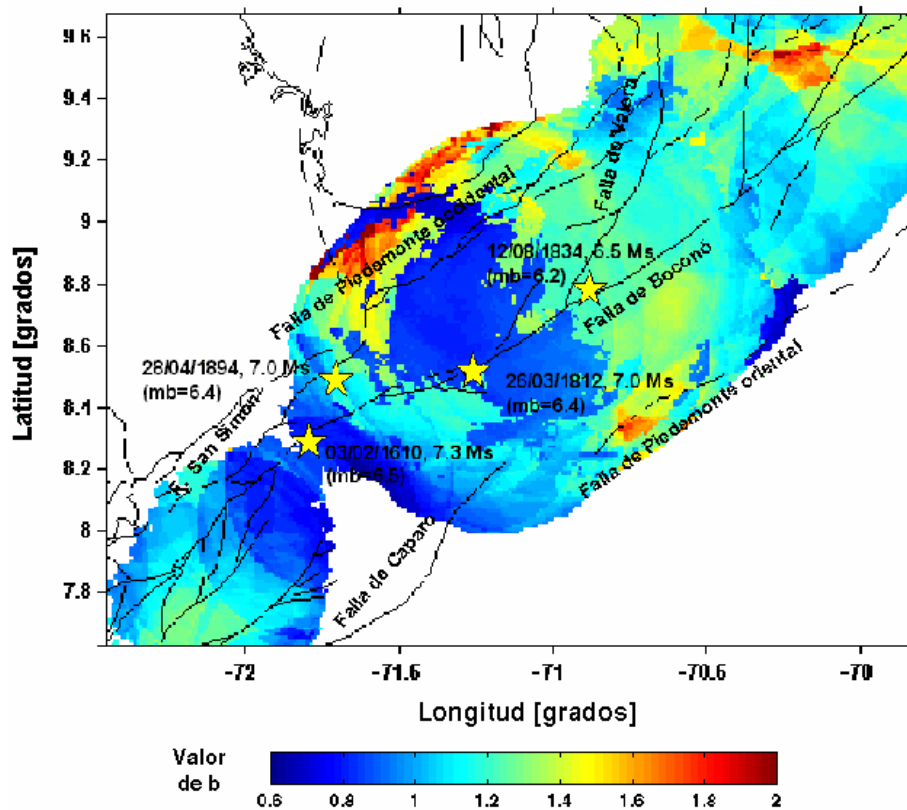


Figura 7. Sismos históricos más importantes en la zona correlacionados con valores bajos de b . La conversión de la escala de magnitud mb a Ms provienen de GSHAP, 1998

Dentro de las zonas delineadas por valores bajos de b han ocurrido grandes sismos en tiempos históricos tal como puede verse en la Figura 7. La asociación del sismo de 1610 (6,5 mb) y del sismo de 1812 (6,4 mb) con los volúmenes anómalos puede soportar la hipótesis de que los sismos principales tienen mayores probabilidades de ocurrir en los volúmenes con bajos valores de b . Por otra parte, el epicentro del sismo de 1894 (6,4 mb) se encuentra próximo al volumen anómalo del Estado Mérida y, difícilmente pueda asociarse el sismo de 1834 con alguna anomalía con bajo valor de b . Con todo, a pesar de la poca resolución del catálogo, de 4 eventos, los dos más importantes, están asociados con valores bajos de b . Existe una zona comprendida entre los límites del Estado Táchira y del Estado Mérida, que aparentemente, puede estar en régimen de altos esfuerzos. Sin embargo, por la escasez de datos, no pudo ser confirmado. Es necesario brindar mejor cobertura a esta zona que permita monitorear eventos de bajas magnitudes.

La poca resolución del catálogo impide desarrollar el análisis para toda la región. El radio mínimo que puede utilizarse para cubrir parte del sistema de fallas de Boconó es de 40 km por la densidad de los registros. Esta dimensión es aproximadamente igual a la de una aspereza para un terremoto de $M=8$ (Zúñiga y Wyss, 1999). Para estos eventos el mapa con $r=40$ km tiene una adecuada resolución. No obstante, el conjunto de datos para el Estado Mérida permite mejorar la resolución a un radio de 20 km con un mallado de 0,01 grados. En este Estado solo se han producido cuatro sismos entre 4,9 y 5,3 mb desde 1960, y no se han registrado sismos de 5,0 mb o más grande desde 1982, por lo que el catálogo entre 1985 y 2000, no contiene sismos mayores a 5,0 mb; sin embargo, se sabe que ha sido afectado desde 1610 por, al menos, cuatro (4) terremotos importantes. El resultado de aplicar el procedimiento de análisis se muestra en la Figura 8.

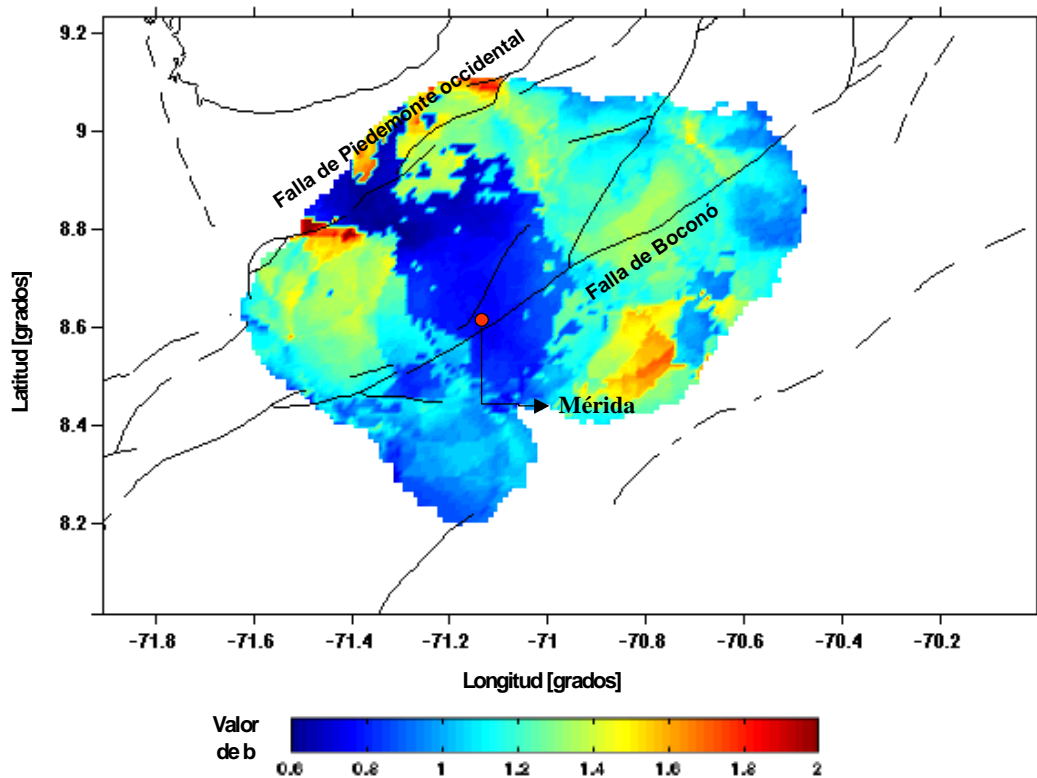


Figura 8. Mapa de valores de b en el Estado Mérida. El espaciamiento de nodos es de 0,01 grados y un radio constante de 20 km alrededor de cada nodo

Puede evidenciarse una mejor definición de la zona anómala ubicada sobre la traza de la falla de Piedemonte occidental, entre las poblaciones de Tucaní y Santa Elena de Arenales del Estado Mérida, que alcanza el menor valor de b igual a 0,68 y como la misma zona anómala está rodeada de otra con un valor alto de b de 1,72 (la localización de valores de b anormalmente altos se considera como segmentos de fallas que no son capaces de generar eventos muy grandes). La zona de menor valor de b está localizada sobre las coordenadas: longitud 71,38° W y latitud 8,83° N. Otra zona con un valor de b relativamente bajo incluye parte de la traza principal de la falla de Boconó que pasa en las cercanías de la ciudad de Mérida. El área incluye la parte norte del Municipio Libertador y se extiende hacia los Municipios Caracciolo Parra Olmedo y Obispo Ramos de Lora, del Estado Mérida. Estos importantes segmentos, en los dos volúmenes anómalos del Estado Mérida, no han producido todavía un sismo principal. Sin embargo, esto no puede considerarse como una violación de las hipótesis puesto que estos eventos aún pudieran ocurrir.

La consideración más importante sobre la Figura 8 surge sobre la anomalía existente en la falla de Piedemonte occidental. Una de las hipótesis de esta metodología establece que las futuras rupturas se iniciarán preferiblemente en zonas de valores bajos de b (altos niveles de esfuerzos) y se detendrán en zonas de valores altos de b (bajos niveles de esfuerzos). La magnitud del sismo principal sería proporcional al área cubierta por la zona de valores bajos de b (Wyss y Wiemer, 1999). Si estas hipótesis son correctas estamos en presencia de una zona a la cual se debe prestar mayor atención en el futuro.

Para la resolución empleada en el Estado Mérida ($r=20$ km) se estima que el tamaño del sismo que puede generar una aspereza de este tamaño, si se rompe en su totalidad, se acerca a $M=7,0$ (Wyss y Matsumura, 2000). Entonces, los tiempos de recurrencia locales se estiman, utilizando la ecuación 2, con el uso de eventos ubicados dentro de un radio de 20 km alrededor de los nodos de una malla espaciada a cada 0,01 grados, con profundidades menores a 30 km; para un sismo de magnitud 6,4 mb (equivalente a 7,0 Ms). Los resultados se presentan en la Figura 9, la cual muestra fuertes contrastes que permiten definir dos zonas con valores anómalos de tiempo de recurrencia local respecto al área adyacente.

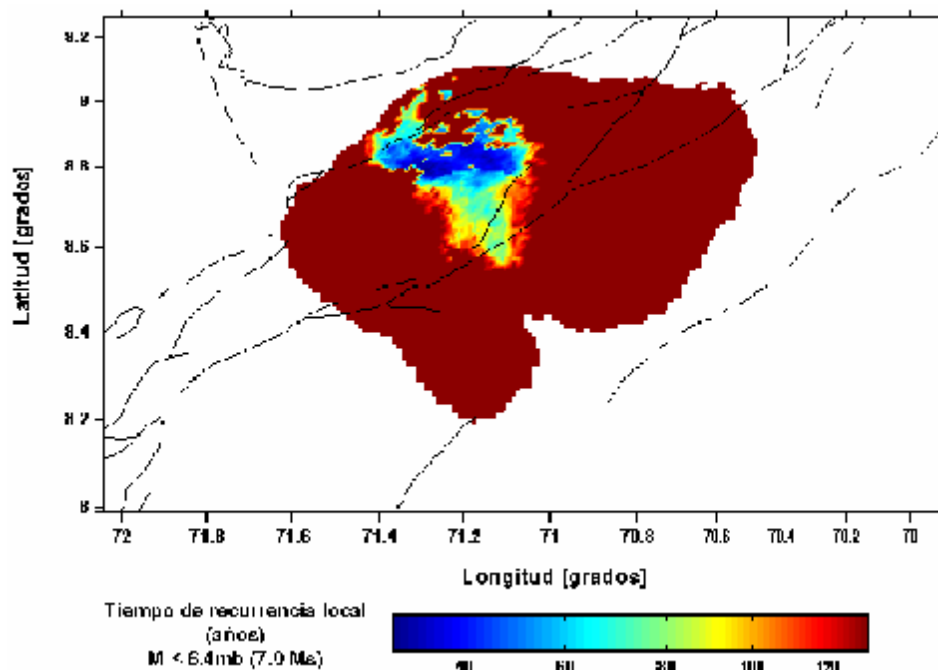


Figura 9. Mapa de tiempo de recurrencia local estimado para un sismo con magnitud 6.4mb (7.0 Ms)

Los tiempos de recurrencia local más cortos son estimados entre 40 y 70 años en un cuadrante delimitado por las coordenadas: longitud 71.4° W a 71.1° W y latitud 8.75° N a 8.87° N, y entre 70 y 120 años para la zona vecina al mismo cuadrante, en un sector comprendido entre la falla de Piedemonte occidental y la falla de Boconó sobre la ciudad de Mérida. Las zonas indicadas por tonos grises oscuros indican tiempos de recurrencia local superiores a 1000 años. Un mapa similar para una magnitud de 6.0 mb (6.0 Ms) muestra tiempos de recurrencia anormalmente cortos para las mismas zonas. Esto puede interpretarse como un volumen bajo un régimen de altos esfuerzos, por lo que podría catalogarse como una probable aspeza y constituiría la fuente más probable de sismos fuertes en la región de los Andes venezolanos.

Un mapa de la distribución espacial de la probabilidad anual por km^2 para un terremoto de magnitud 6.4mb (7.0 Ms) muestra los mismos contrastes del mapa de la Figura 9 y se presenta en la Figura 10. Las áreas de mayor probabilidad definen las zonas que, según las hipótesis de trabajo, representan las ubicaciones más probables de sismos fuertes en la región del Occidente venezolano y específicamente dentro del Estado Mérida, sobre la base de la densidad registrada de eventos sísmicos en la región.

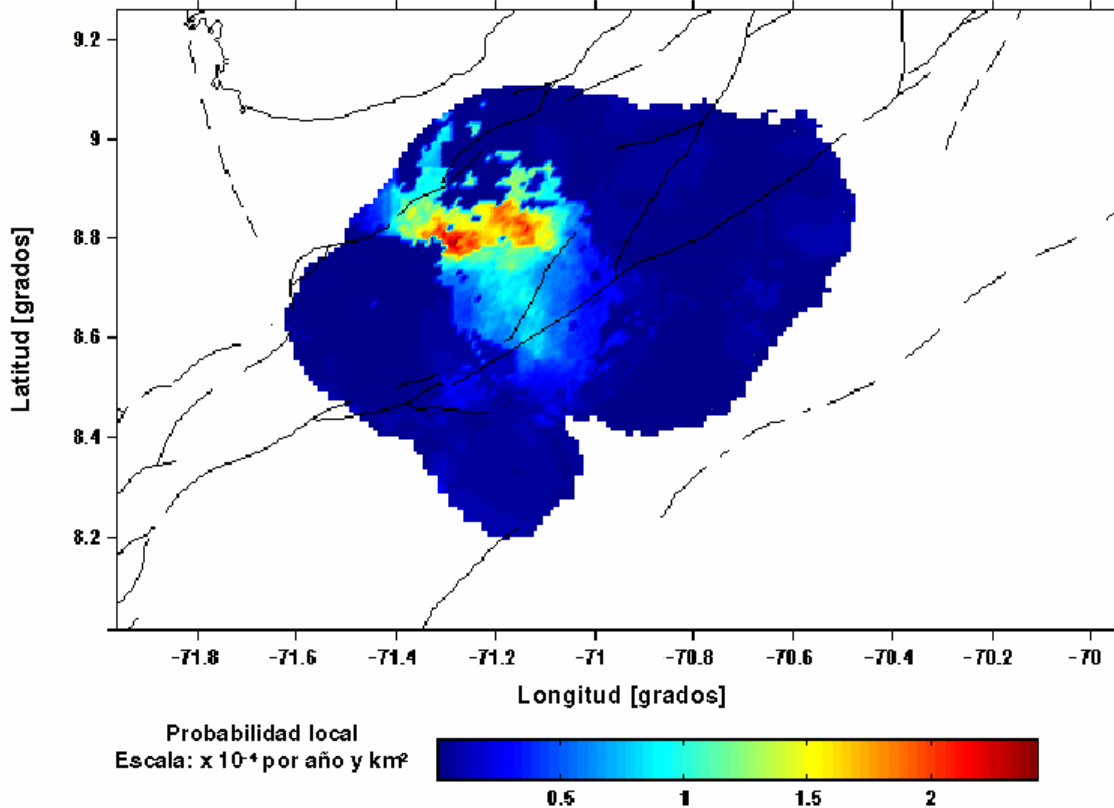


Figura 10. Mapa de probabilidad anual para un sismo con magnitud 6.4mb (7.0 Ms)

Los análisis efectuados en torno al uso de la base de datos con sismos en escalas de magnitud mb ó Ms no mostraron diferencias en la ubicación de las zonas de altos y bajos niveles de b . Los resultados en términos del mapa de T_L muestran diferencias en los tiempos de recurrencia, puesto que los valores de b dependen de la escala de magnitud que se emplee. Sin embargo, la posición de las zonas con los valores más bajos de T_L son las mismas.

Dada las características de la información sísmica contenida en el catálogo, no es conveniente calcular valores de recurrencia a partir de valores de a y b obtenidos localmente en alguna otra ubicación. Las áreas sismogénicas que definan un estudio de amenaza sísmica deben considerar la realización de estudios que conlleven a ubicar probables zonas de concentración de esfuerzos que permitan inferir la ubicación de probables asperezas, ya que los tiempos de recurrencia de fuertes sismos están controlados por la presencia de estas zonas.

Basados en estos resultados y en los trabajos previos desarrollados sobre el tema, se torna evidente la importancia de monitorear y registrar eventos de bajas magnitudes por cuanto contribuyen con una valiosa información (que no puede ser obtenida de otra manera), a comprender la distribución de esfuerzos en la corteza y a la mitigación de la amenaza sísmica. Si las hipótesis planteadas al inicio son correctas, entonces la sismicidad de fondo puede contener información sobre futuros grandes eventos y deben ser monitoreados en una forma homogénea y completa, tanto como sea posible.

Finalmente, es de hacer notar que este procedimiento no contiene información de cuando podría ocurrir un terremoto y que los valores absolutos de los tiempos de recurrencia están llenos de incertidumbre, lo que implica necesariamente, un manejo juicioso de los resultados y su correlación espacio-temporal con los sistemas de fallas y sismos históricos. Sin embargo, logra especificar las más probables localizaciones de fuertes sismos. Dado lo reciente de esta metodología, deberá ser probada en muchos casos y áreas antes de que su fiabilidad pueda ser garantizada y la misma será más confiable en la medida que se disponga de una información sísmica instrumental de alta calidad.

5. CONCLUSIONES

- Los resultados permiten inferir la presencia de una probable aspereza ubicada al norte de la ciudad de Mérida, sobre la falla de Boconó y que se extiende hasta la falla de Piedemonte occidental. Esta zona podría constituir la fuente más probable de sismos fuertes en la región de los Andes venezolanos.
- Es probable la existencia de una zona bajo régimen de altos esfuerzos entre los límites del Estado Táchira y del Estado Mérida, alrededor del epicentro del terremoto de Bailadores de 1610. Debido a la escasez de suficientes datos, no pudo ser confirmado.
- Es necesario brindar mejor cobertura a varias zonas de la región occidental de Venezuela que permita monitorear eventos de bajas magnitudes y posibilite la aplicación de técnicas basadas en datos de microsismicidad. Esto puede ayudar a revelar importante información acerca de la amenaza sísmica local.

6. REFERENCIAS

1. GSHAP, (1998). "Global Seismic Hazard Assessment Program, North Andean Region Final Report: Seismic Hazard Assessment for the North Andean Region".
2. <http://seismo.ethz.ch/gshap/piloto/report.html>.
3. Öncel, A. O. y M. Wyss (2000). "The major asperities of the 1999 $M_w=7.4$ Izmit earthquake defined by the microseismicity of the two decades before it". Geophys. J. Int., 143, 501-506.
4. Reasenber, P. A. (1985). "Second-order moment of central California seismicity 1969-1982", Journal of Geophysical Research, 90, 5479-5495.
5. Reiter, L. (1990). "Earthquake hazard analysis: issues and insights", Columbia University Press, New York, 254 pp.
6. Wiemer, S. (1996). "Analysis of Seismicity: New techniques and case studies", Dissertation thesis, University of Alaska, Fairbanks, Alaska.
7. Wiemer, S. y M. Wyss (1997). "Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities; An improved technique to calculate recurrence times?", Journal Geophysical Research, 102, 15115-15128.

8. Wyss, M., Schorlemmer D. y S. Wiemer (2000). “*Mapping asperities by minima of local recurrence time: The San Jacinto-Elsinore fault zones*”, Journal of Geophysical Research, 105, 7829-7844.
9. Wyss, M. y S. Matsumura (2000). “*Most likely locations of large earthquakes in the Kanto and Tokai areas, Japan, estimated based on local recurrence times*”. april, 2000 (ftp://giseis.alaska.edu/pub/wyss/outgoing)
10. Zúñiga, R. y Wyss, M. (1999). “*Most and least likely locations of large to great earthquakes along the pacific coast of México, estimated from local recurrence times based on b-values*”. Geophysical Journal International (submitted).

7. AGRADECIMIENTO

Este trabajo es parte del proyecto NURR-C-262-99 financiado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.