

MACROSÍSMICA DE CUBA: SU APLICACIÓN EN LOS ESTIMADOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA

Macroseismic of Cuba: its application in seismic hazard assessment

Tomás J. Chuy Rodríguez

E-mail: chuy@cenais.ciges.inf.cu

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

RESUMEN

Se presenta una síntesis del catálogo de sismos perceptibles (1528 - 1990), obtenido y preparado al mismo tiempo como base de datos para PC. Este catálogo está suficientemente documentado y permite extender los períodos de tiempo que se analizan, limitados normalmente por la información instrumental. Complementan este resultado ejemplos del Atlas de Isosistas de Terremotos perceptibles con epicentro en el archipiélago cubano y cuya utilización para caracterizar la atenuación sísmica en el territorio nacional, en cuanto a intensidad, es prácticamente imprescindible para la realización de estimados de Peligrosidad Sísmica. En este sentido, la interpretación espacio - temporal de los sismos perceptibles considerados, contribuye a precisar las evaluaciones sismotectónicas de las Zonas Sismogénicas relacionadas con ellos.

Se muestra también, el análisis teórico - experimental de la Ley de Atenuación de la Intensidad Sísmica de las Antillas Mayores y sus principales parámetros asociados a las Zonas Sismogénicas del país, los cuales se modelaron a partir de los mapas de isosistas de terremotos perceptibles y fuertes.

Todos estos resultados se utilizan en los estimados de Peligrosidad Sísmica determinísticos y probabilísticos, realizados para diferentes regiones del país y que en este trabajo se unifican. Esto permitió que, a partir del Mapa de Peligrosidad Sísmica obtenido, en términos de la aceleración horizontal máxima, pudiera proponerse el Mapa de Zonación Sísmica con fines de Ingeniería utilizado actualmente en la Nueva Norma Sísmica Cubana.

Como contribución a la caracterización de nuestra sismicidad, se presenta el análisis espacio - temporal - energético de las réplicas perceptibles de los terremotos más documentados ocurridos en Cuba, y se relacionan

con las Zonas Sismogénicas que les dieron origen. En consecuencia, se obtuvo una relación empírica entre la Longitud de Ruptura y el valor de Magnitud estimada por Datos Macrosísmicos.

PALABRAS CLAVE: Macrosísmica, Cuba, terremotos.

ABSTRACT

The synthesis of the Catalogue of Perceptible Earthquakes from 1528 to 1990, which have been obtained and elaborated to be used at the same time as a Data Base in a PC, is presented. Although usually, the periods of time which are used in seismic analysis are limited due to the lack of instrumental information, this Catalogue contain the enough amount of information to allow the extension of that periods of time. As a complement of the Catalogue, examples from the Atlas of Isoseismal Maps of Perceptible Earthquakes which epicenter located in Cuba, was also finished. The last one is fundamental for the characterization of Seismic Attenuation in Cuba in terms of intensity, for Seismic Hazard assessment. The temporal-spatial analysis of the perceptible earthquakes permit us to evaluate the Seismogenic Zones from the Seismotectonic point of view.

Furthermore a theoretic-experimental analysis of the Attenuation's Law of Seismic Intensity from Greater Antilles, and the main parameters associated to Seismogenic Zones of Cuba, is showed. These ones were obtained from Isoseismal Maps of perceptible and large earthquakes.

The results obtained from the probabilistic and deterministic Seismic Hazard Assessment, for different regions all over the country, have been unified in this paper. From the Seismic Hazard Map resulting, the Seismic Zonation Map with Engineering Purposes was

also obtained; the last one was proposed for the New Seismic Cuban Design Code.

As a contribution to the characterization of Cuban Seismicity an spatial – temporary – energetic analysis of the perceptible aftershocks was made, including their relation with our Seismogenic Zones, obtaining an empirical relationship between the Length of Rupture and the Magnitude values, estimated by Macroseismic Data.

KEY WORDS: Macroseismic, Cuba, earthquakes.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del peligro sísmico potencial, sobre todo de las áreas con mayor riesgo, da la posibilidad de establecer políticas adecuadas de planificación urbana y de prevención de desastres. Es por esto que el objetivo de este trabajo es dar a conocer la distribución de terremotos perceptibles y fuertes ocurridos en Cuba y las áreas mayormente afectadas por los terremotos significativos. Para ello se han empleado los datos macrosísmicos (terremotos perceptibles y fuertes reportados en Cuba y zonas aledañas).

El autor considera que a pesar de la subjetividad implícita de los datos macrosísmicos y los problemas inherentes a su utilización, como lo es emplear un parámetro mayormente cualitativo, en el caso de las estimaciones de peligrosidad sísmica del archipiélago cubano, es un elemento insustituible. Por otra parte, el registro instrumental de terremotos en Cuba se limita sobre todo a su región oriental, con un máximo de treinta y tres años para una sola estación. A esto se suma el hecho de que prácticamente no existe información instrumental de las regiones central y occidental, pues la mayor parte del tiempo sólo funcionó en la zona occidental (San Cristóbal – Candelaria) una estación de períodos medios para el registro de terremotos lejanos.

CATÁLOGO DE DATOS MACROSÍSMICOS Y ATLAS DE ISOSISTAS

Para la confección del catálogo de sismos perceptibles y el atlas de isosistas de terremotos ocurridos en Cuba, se revisó la información contenida en catálogos, reportes, crónicas, prensa escrita, y de todo documento que hiciera mención a sismos perceptibles. Otros documentos consultados fueron las actas capitulares y legajos de documentos oficiales del gobierno local o de personalidades del período colonial.

Se revisaron, además, datos de terremotos históricos de las vecinas islas de Jamaica y La Española (Haití y República Dominicana), ya que varios de los

sismos de mayor fuerza reportados en estas islas, así como en la región sudoriental cubana, han sido perceptibles en más de un país simultáneamente (Chuy, 1987; Chuy y Álvarez, 1988; Taber, 1920, 1922a, 1922b; Tomblin y Robson, 1977).

Vale destacar la utilización de encuestas retrospectivas para la reconstrucción de terremotos perceptibles en el pasado reciente. Esto facilitó la obtención de datos macrosísmicos de terremotos ocurridos en el siglo pasado, sobre la base del acceso a documentos localizados en museos y comisiones locales de Historia y a partir de entrevistas a informantes de estas instituciones en 86 municipios del país.

Para obtener los parámetros de los terremotos mediante la evaluación de los datos macrosísmicos se utilizaron dos criterios. El primero consiste en obtener, a partir del mapa de isosistas del terremoto analizado y mediante un Modelo de Isosistas Elípticas (Álvarez y Chuy, 1985), el valor de la magnitud y profundidad del terremoto, en correspondencia con los parámetros de atenuación obtenidos por Chuy (1996) para cada zona sismogénica a la que se asocia el terremoto, utilizando el programa MACRO (Pico y Chuy, 1990).

El segundo criterio corresponde al caso en que los datos macrosísmicos no permitieron trazar el mapa de isosistas. A éste pertenece el mayor número de los terremotos analizados. Los parámetros fueron estimados de la forma siguiente:

Intensidad:

Determinada mediante la escala de intensidades MSK, considerando las correspondientes soluciones para los casos de mayor o menor cantidad de información. Se tuvo en cuenta, además, la fuente, la fecha, la calidad de la información, el tipo y la cantidad de reportes por localidades, así como el grado de detallamiento de las descripciones.

Coordenadas del epicentro:

Determinadas en primer lugar tomando las coordenadas del punto donde se reporta la mayor intensidad y, en segundo lugar, en caso de haber varias localidades con el valor más alto de intensidad señalado, se tomó la coordenada del centro geométrico promediado entre ellas.

Profundidad:

Se prefijaron valores en correspondencia con las características sismotectónicas de las zonas sismogénicas conocidas, en las que, en principio, por su cercanía, se produjo el terremoto.

Magnitud:

Determinada a partir de la relación $I_o = f(M_s)$ planteada en el Modelo de Isosistas Elípticas de Álvarez y Chuy (1985). Se consideró, al mismo tiempo, que en dependencia de la precisión de los datos macrosísmicos obtenidos, con los que se determinó la intensidad sísmica, se tomarían valores mayores o menores de este parámetro.

Los intervalos de M_s correspondientes a cada valor de I_o , se pueden determinar directamente por la fórmula de Fedotov y Shumilina (1971) propuesta en el Modelo de Isosistas señalado:

$$I = 1,5 M - 2,63 \log r - 0,0087 r + 2,5$$

donde r es la distancia hipocentral, I la intensidad y M la magnitud M_s del terremoto.

Una síntesis de los resultados sobre los sismos perceptibles del archipiélago cubano, clasificados y evaluados en el Catálogo, se presenta en la Tabla 1 y figura 1. Finalmente, en relación con la calidad de los parámetros determinados de los terremotos perceptibles se incluyeron dos coeficientes cualitativos, relativos al área pleistósística y al volumen de información.

El atlas de isosistas permitió completar las evaluaciones de sismicidad de nuestro territorio y analizar las características de la atenuación sísmica, al menos en términos de intensidad, con fines de precisión en los estimados de peligrosidad sísmica (Figs. 2 y 3).

Para la confección de los 196 mapas de isosistas de terremotos de Cuba, incluidos en el Atlas (Chuy, 1996), se adoptaron los criterios siguientes:

- Representar los mapas en sólo dos escalas: 1:1 000 000 y 1: 2 000 000. En todos los casos, para ubicar la zona donde ocurrió el sismo, se situó un recuadro en el que se significa la incidencia regional del terremoto.
- Incluir todas las localidades de las que se ha dispuesto de información.
- Incluir el valor de intensidad de cada isosista dentro del área que representa y no en la línea que la delimita. Esto facilitó su posterior modelación para atenuación sísmica.
- Para facilitar la comprensión y uniformidad del modelado de las isosistas, se suavizaron los trazos tratando de definir en primera opción una forma elíptica en ellas.

El mapa de intensidades máximas reportadas en Cuba (Fig. 4) complementa este trabajo. Se procuró cartografiar el máximo de intensidad obtenido en cada localidad, incluyendo la ubicación espacial de las áreas pleistósísticas de los principales terremotos por regiones.

Un análisis estadístico riguroso de los datos macrosísmicos recopilados y evaluados resulta muy difícil. Asimismo, los criterios valorados con respecto al atlas de isosistas, no permiten obtener resultados confiables mediante técnicas de interpolación automatizada, pues los puntos que pudieran analizarse espacialmente no tendrían siempre el mismo peso en lo que respecta al valor de su intensidad, a tiempo que la no homogeneidad de su distribución introduce una complicación adicional y sólo permite en la

TABLA 1. COMPORTAMIENTO DE LA SISMICIDAD EN CUBA DESDE 1521 HASTA 1990

Fecha	INTENSIDAD MSK							
	? - 3,5	3,6 - 4,5	4,6 - 5,5	5,6 - 6,5	6,6 - 7,5	7,6 - 8,5	8,6 - 9,5	Total
1521-1550				1				1
1551-1600					1	2		3
1601-1650					1			1
1651-1700	2				2	1		5
1701-1750								
1751-1800	5	2	2	2	2	1	1	15
1801-1850	22	12	7	3	2			46
1851-1900	52	61	31	4	1	2	1	152
1901-1950	107	116	45	17	8	1		294
1951-1990	223	165	42	13		1		444
TOTAL	411	356	127	40	17	8	2	961

mayoría de los casos una modelación general como la que se realiza con el Programa MACRO (Pico y Chuy, 1990). Un aspecto importante en los resultados obtenidos es que todos los datos tienen aplicado un único criterio de procesamiento.

PELIGROSIDAD SÍSMICA DE CUBA POR DATOS MACROSÍSMICOS

Para la definición de los estimados de peligrosidad sísmica se tomaron en cuenta tres aspectos fundamentales: el modelo estadístico de la ocurrencia de terremotos y sus efectos, la definición de las Zonas Sismogénicas (ZS) con sus correspondientes parámetros del régimen sísmico, y la ley de atenuación del parámetro por utilizar, para cuantificar los efectos de los terremotos.

Sin embargo, la consideración de que el período de recurrencia de las sacudidas (TI) es la esperanza matemática de la distribución de los intervalos temporales entre eventos sucesivos de intensidad mayor o igual que I (Riznichenko, 1979), permite —a partir del concepto de sacudibilidad sísmica introducido por él (1965) en la práctica sismológica como la frecuencia promedio BI de ocurrencia de sacudidas sísmicas en un punto dado de intensidades mayores e iguales que I— calcular la probabilidad de que en un tiempo de espera t (tiempo de vida útil) no ocurra ni una sacudida de ese valor de amenaza.

Un aspecto importante en la realización de estimados probabilísticos es el modelo estadístico del proceso de generación de los terremotos. El modelo más simple de flujo de sucesos es el Poissoniano, que es el más frecuentemente utilizado en Sismología y cuyo cumplimiento para los terremotos perceptibles fue demostrado por Chuy (1999) en su tesis de doctorado. En correspondencia con este modelo, la probabilidad de que ocurra un evento con intensidad mayor o igual que I en el tiempo t será:

$$P(I, t) = 1 - \exp(-t / TI)$$

Se consideró la existencia en nuestra región de otros procesos de generación de terremotos, cuyas características energético - temporales difieren de las concepciones clásicas. En específico, para algunas ZS se consideró la validez del modelo del terremoto característico (Schwartz y Coppersmith, 1984).

En la versión más reciente del programa SACUDIDA (Álvarez, 1995), con la que se realizaron los cálculos de peligrosidad sísmica de este trabajo, están incluidas diversas variantes de relación de parámetros dinámicos con la intensidad, aunque la utilizada para

estimar la componente horizontal de la aceleración (Ah) fue la propuesta por Trifunac y Brady (1975).

$$\log Ah = 0,30 I + 0,014$$

donde Ah se da en cm/seg². La conversión se realiza reduciendo a este parámetro la intensidad I, lo cual permite el tratamiento de la aceleración con el modelo de isosistas de la región.

Como datos para este análisis fueron utilizados el Catálogo de las Agencias Internacionales (Red Internacional, 1904-1987) en el sector de Cuba, el Catálogo de la Red de Estaciones del Servicio Sismológico Nacional SSN (1979 - 1989) y el Catálogo de Terremotos Perceptibles de Cuba (1528 - 1990) propuesto por Chuy (1999).

En la figura 5 se presenta el mapa de isoaceleraciones horizontales máximas de Cuba para perfiles de suelo S2, tiempos de vida útil t de 50 años y una probabilidad de ocurrencia del 15 % del parámetro de amenaza. De forma complementaria, la figura 6 expone su conversión a zonas sísmicas con fines de ingeniería, para lo cual se hizo la reducción a valores efectivos de la aceleración horizontal, considerando perfiles de suelo S1.

UTILIZACIÓN DE DATOS MACROSÍSMICOS EN INVESTIGACIONES REGIONALES DE PELIGROSIDAD SÍSMICA

Sobre la base de los resultados obtenidos de la modelación de isosistas de terremotos estudiados para las Zonas Sismogénicas de Cuba (Orbera y otros, 1990; Chuy y otros, 1992; Chuy *et al.*, 1994), se validaron los parámetros de atenuación sísmica en términos de intensidad (Chuy, 1998; 1999), utilizando el Modelo de Isosistas Elípticas.

Gardner y Knopoff (1974) estudiaron ventanas espacio-temporales de aparición de réplicas de terremotos con diferente orden de magnitud. En el caso de Cuba, el autor propone la utilización de datos macrosísmicos de terremotos, para plantearse una relación entre la magnitud Ms de los terremotos y su Longitud de Ruptura (LR), condicionada por la aparición temporal de réplicas perceptibles (VTR). Para ello se seleccionaron 15 casos de terremotos (Tabla 2), cuyas réplicas fue posible contabilizar.

$$LR = -28,9 + \exp(3,37 + 0,18 Ms)$$

La relación obtenida entre los valores de Magnitud y la Longitud de Ruptura avala los criterios utilizados de selección, ubicación y categorización energética de las réplicas, toda vez que la correlación

TABLA 2. TERREMOTOS CONSIDERADOS PARA LA VALORACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LAS RÉPLICAS

FECHA	LAT. N	LONG. W	Ms	I (MSK)	LAR	VTR	CRP
1852 08 20	(19,77)	(75,35)	(7,3)	9,0	80	98	26
1852 11 26	(19,50)	(76,25)	(7,0)	8,0	70	69	9
1880 01 23	(22,71)	(82,71)	(6,0)	8,0	58	98	44
1914 02 28	(21,22)	(76,17)	(6,2)	7,0	62	15	9
1927 03 25	(20,15)	(75,58)	(5,2)	6,0	41	4	7
1932 02 03	19,80	75,80	6,75	8,0	70	209	123
1939 08 15	22,50	79,25	5,6	7,0	53	129	24
1947 08 07	19,90	75,30	(6,3)	7,0	58	51	45
1974 04 08	21,80	78,01	4,5	6,0	32	130•	10
1976 02 19	19,87	76,87	5,7	8,0	52	69	38
1982 12 16	22,61	81,23	5,0	6,0	41	6	5
1990 05 22	19,94	76,03	4,8	6,0	42	135•	4
1990 09 04	19,86	75,82	4,5	6,0	40	167•	2
1992 05 25	19,62	77,70	7,0	7,0	74	225⊕	20
1992 11 07	19,60	76,34	4,4	4,5	36	49⊕	3

() Datos macrosísmicos. • Ventana temporal (Gardner y Knopoff, 1974) para réplicas instrumentales.

LAR: Longitud del Área de Ruptura (km). VTR: Ventana Temporal de Réplicas (días).

⊕ Se utilizan las réplicas instrumentales. CRP: Cantidad de Réplicas Perceptibles.

propuesta se aproxima bastante en su trazado a la presentada por Gardner y Knopoff (1974), con una mayor cantidad de información instrumental.

Para la ventana temporal de réplicas (VTR) no fue posible establecer una relación semejante a la espacial, toda vez que al considerarse sólo las réplicas perceptibles, se introduce un error mayor que en el caso anterior, debido a que las réplicas perceptibles ocurren generalmente en un período cercano al sismo principal y no es factible establecer hasta cuándo pudieran estarse produciendo réplicas instrumentales.

CONCLUSIONES

Por primera vez se recogen en un catálogo los sismos perceptibles de Cuba (1528-1990) con parámetros espacio-energéticos asignados a cada uno de los 961 propuestos, limpio de réplicas, el cual fue preparado previamente como Base de Datos Automatizada para PC. El Atlas de Isosistas de Terremotos de Cuba (1528-1990), que incluye los mapas de 196 sismos, permite realizar valoraciones sobre la atenuación sísmica en términos de intensidad, toda vez que en Cuba no han funcionado sistemas especializados para

el registro de terremotos fuertes. Por otra parte, el Mapa de Peligrosidad Sísmica de Cuba obtenido a escala 1:1 000 000, en términos de la aceleración horizontal máxima (% g) para perfiles de suelos tipo S2, tiempo de vida útil de 50 años y probabilidad de excedencia de 15 %, fue aprobado como soporte de la Nueva Norma Sísmica Cubana a través del de Zonación Sísmica de Cuba con fines de Ingeniería. Resultados complementarios lo constituyen el Mapa de Intensidades Máximas reportadas y la relación entre la Magnitud Ms y la Longitud de Ruptura para el archipiélago cubano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVAREZ, J. L.: *Sacudida. Versión 2.0. Un Programa para la estimación de la Peligrosidad Sísmica*, 59 pp., Ed. Academia, La Habana, 1995.
- ÁLVAREZ, J. L. y T. J. CHUY: "Isoseismal Model for Greater Antilles". Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, pp. 134-141, Liblice Castle, Czechoslovakia, 1985.
- CHUY, T. J.: "Sismicidad histórica de las Antillas Mayores", en: *Resúmenes del Primer Congreso Internacional sobre Desastres Naturales* (ACC-MINSAP-Cruz Roja- EMNDC), pp. 15-16, La Habana, 1987.

- : Atlas de Isosistas de las Antillas Mayores. Reporte de Investigación. Fondos del CENAI. Categoría de Mención en XI Forum Nacional de Ciencia y Técnica, 1996.
- : "Peligrosidad Sísmica y desarrollo socioeconómico de las Antillas Mayores", *Minería y Geología*, XV (3):53-57, 1998.
- : "Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica". Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas, Fondos del Instituto de Geofísica y Astronomía y del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, 1999.
- CHUY, T.J. Y J. L. ÁLVAREZ: "Sismicidad histórica de La Española", en *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, 12 pp., no. 16, La Habana, 1988.
- CHUY, T.J., J. L. ÁLVAREZ, J. A. ZAPATA Y B. E. GONZÁLEZ: "Investigaciones sismológicas complejas para el Complejo Hidroenergético Toa-Duaba". Reporte de Investigación. Fondos del CENAI y ENERGOPROYECTO, 1992.
- CHUY, T. J., B. E. GONZÁLEZ Y L. ORBERA: "Seismicity and Seismic Hazard Assessment for Western Cuba", *Geología y Minería*, XI (3):45-51, 1994.
- FEDOTOV, S.A. Y L.S. SHUMILINA: "Sacudibilidad sísmica de la Kamchatka" [en ruso]. Noticias de la AC de la URSS, *Fizika Zemli*, no. 9, pp. 3-15, 1971.
- GARDNER, J.K. Y L. KNOPOFF: "Is the sequence of Earthquakes in Southern California with aftershocks removed, Poissonian?", en *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 64, no. 5, pp. 1363-1367, 1974.
- ORBERA, L., B. E. GONZÁLEZ, T. J. CHUY Y OTROS: "Caracterización sismológica del área de construcción del Centro de Investigaciones Nucleares". Reporte de Investigación. Fondos del CENAI y de la SEAN, 1990.
- PICO, R. Y T. J. CHUY: *Macrosistema para el Procesamiento de Datos Macrosísmicos en la región del Caribe. Memorias de Informática 90*, pp. 196-203, La Habana. 1990.
- RIZNICHENKO, YU.V., ed.: *Sacudibilidad sísmica del territorio de la URSS* [en ruso], 192 pp., Nauka, Moscú, 1979.
- SCHWARTZ, D. P. Y K. J. COPPERSMITH: "Fault behavior and characteristic earthquakes. Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones", *J. Geophys. Res.* 89(B7): 5681-5698, 1984.
- TABER, S.: "Jamaica Earthquakes and the Bartlett Trough", *Bull. Seism. Soc. Am.*, X(2) :55 - 89, 1920.
- : "The Seismic Belt in the Greater Antilles", *Bull. Seism. Soc. Am.*, XII (4) :199 - 219, 1922a.
- : "The Great Fault troughs of the Antillas", *Journal of Geology*. 30 (2) :89 - 114, 1922b.
- TOMBLIN, J. M. Y G. R. ROBSON: "A Catalogue of Felt Earthquakes for Jamaica with references to others islands in the Greater Antilles, 1524-1971", Mines Geological Division, Special Publ. Jamaica, 1977.
- TRIFUNAC, M. D. Y A. G. BRADY: "On the correlation of Seismic Intensity scales with the peaks of ground motion records", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65 (1):139 - 162, 1975.

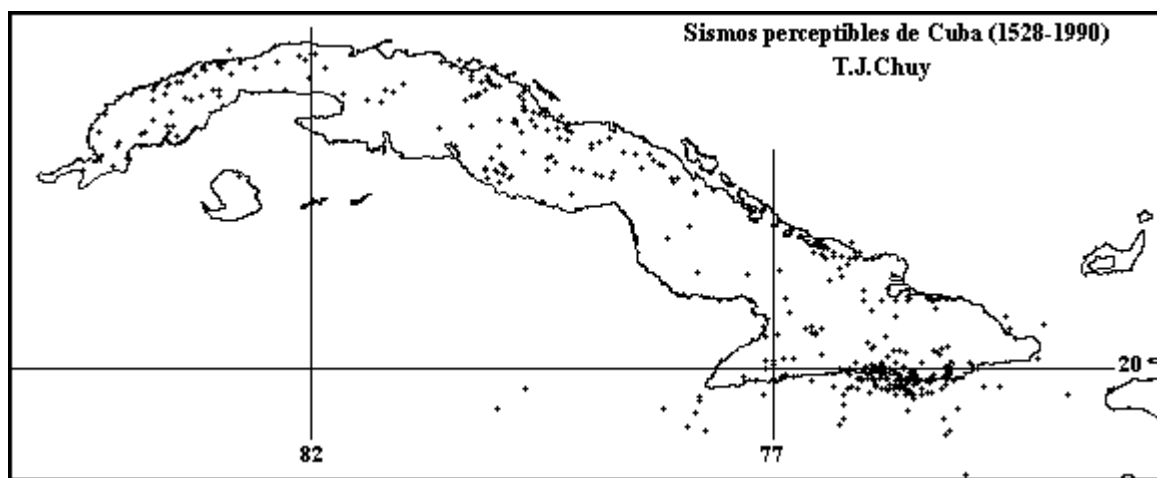
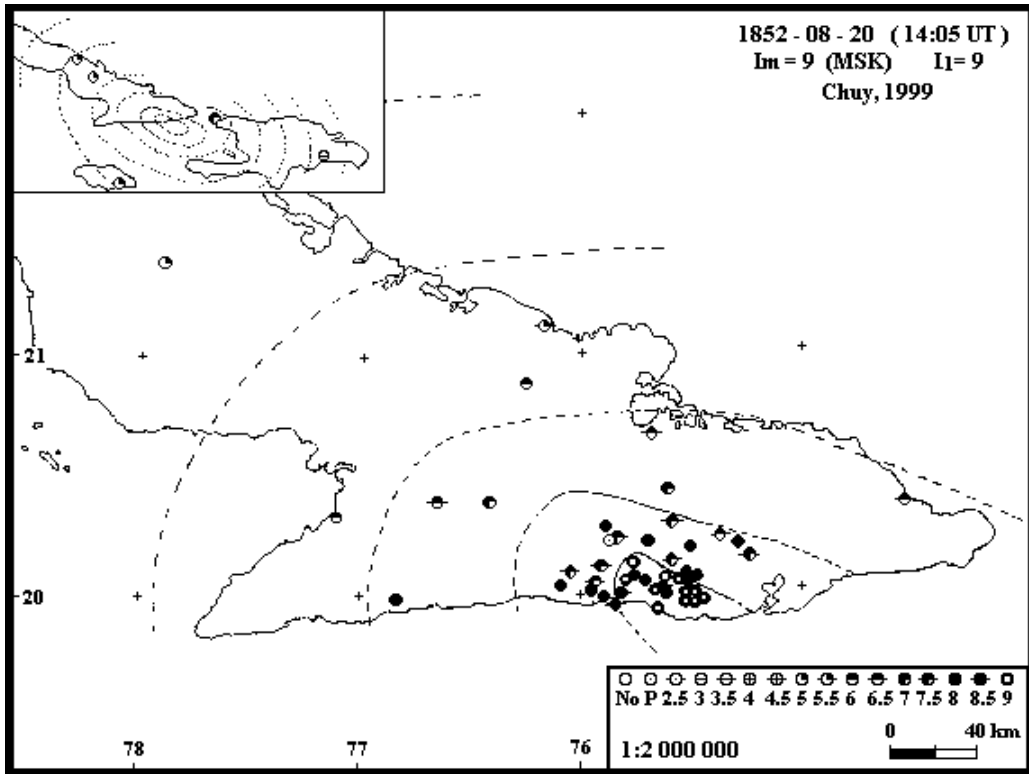
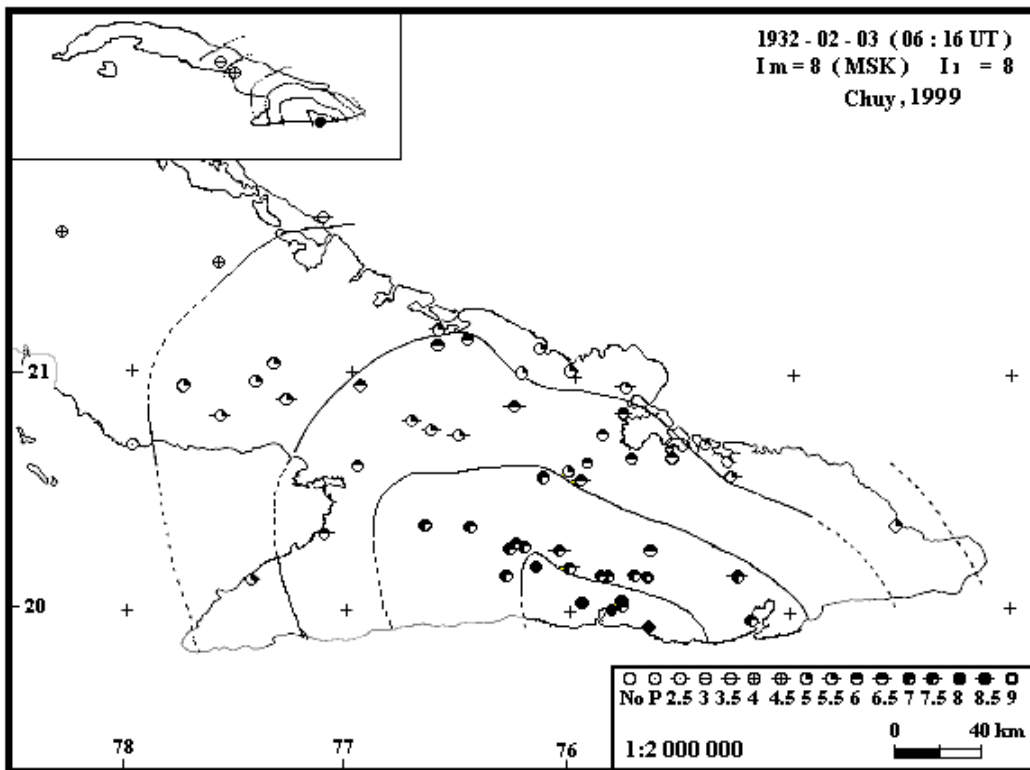


Figura1. Distribución de los sismos perceptibles en Cuba de 1528 a 1998.



NOTA: Im - Intensidad máxima ; I₁ - Primera isosista ; P - perceptible ; Las intensidades en MSK .
 Figura 2. Mapa de isosistas para la intensidad máxima 9.



NOTA: Im - Intensidad máxima ; I₁ - Primera isosista ; P - perceptible ; Las intensidades en MSK .
 Figura 3. Mapa de isosistas para intensidad máxima 8.

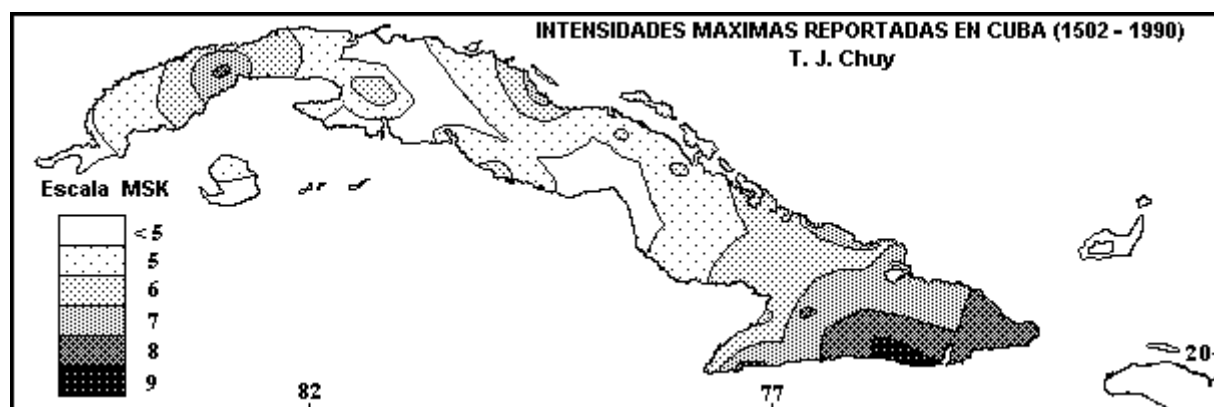


Figura 4. Intensidades máximas reportadas en Cuba (1502-1990).

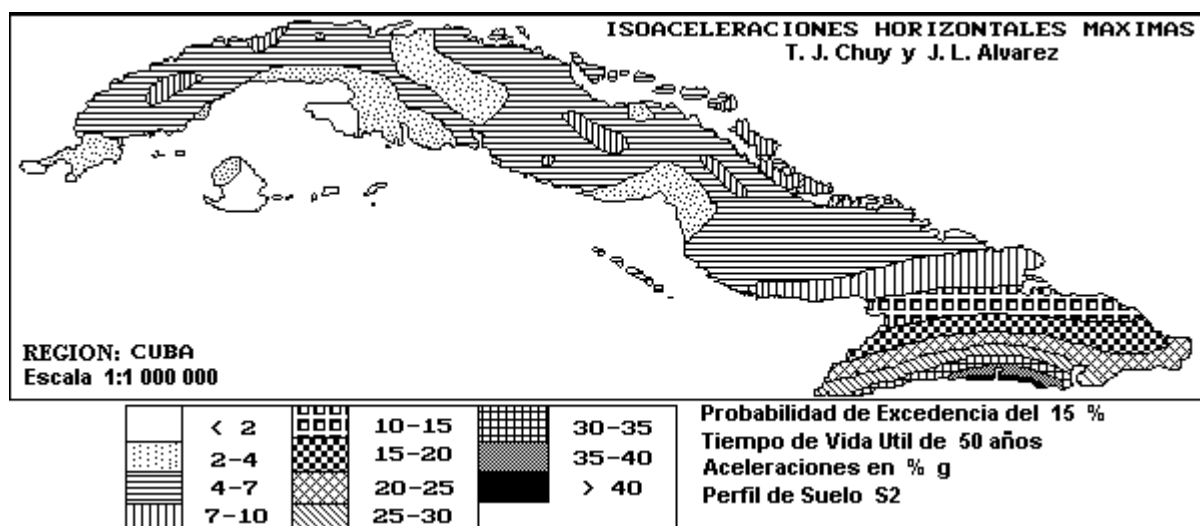


Figura 5. Mapa de isoaceleraciones horizontales máximas.

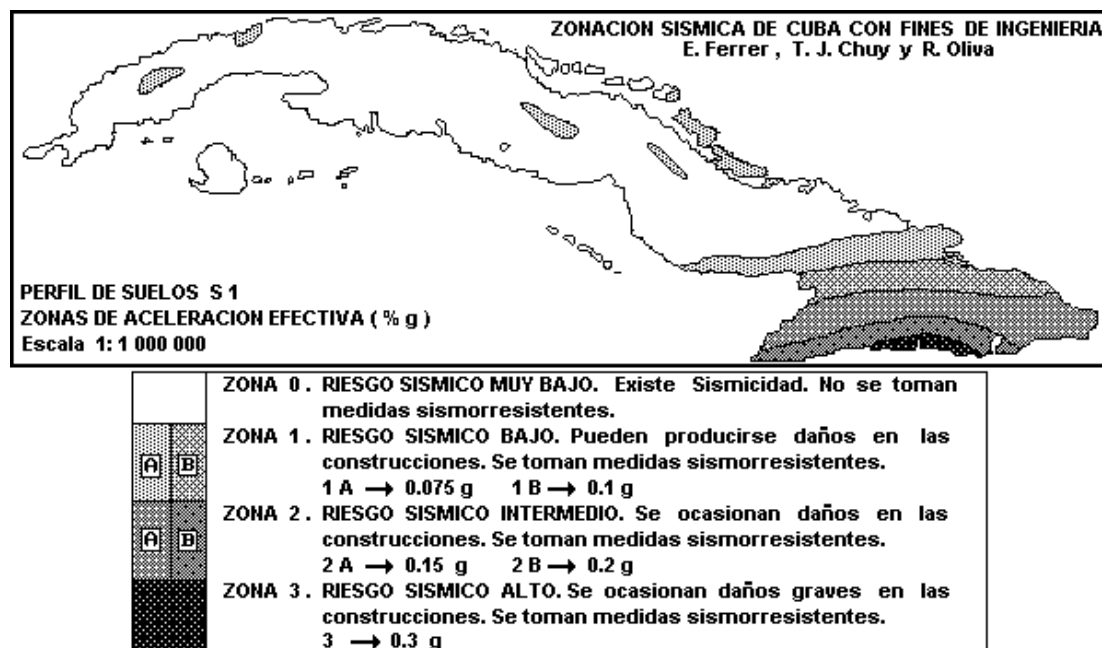


Figura 6. Mapa de zonación sísmica con fines de ingeniería.