

Determinación de un escenario de peligro sísmico determinístico en la península de Hicacos

Establishing a deterministic seismic danger scenario at the Hicacos peninsula

Madelin Villalón-Semanat^{1*}, Darío Candebat-Sánchez¹, Zulima Rivera-Álvarez¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

* Autor para la correspondencia: madelin@cenais.cu

Resumen

Mediante un enfoque determinístico para caracterizar los movimientos del suelo se desarrolló un escenario de terremoto para precisar el peligro sísmico de la península de Hicacos en Matanzas, Cuba. Se seleccionaron las zonas de origen de terremoto del territorio occidental con la mayor potencialidad sísmica, en un radio de 300 km, para la península. En estas fallas se asociaron los terremotos con la magnitud máxima a partir del criterio de expertos en resultados de estudios recientes. A partir de la descripción de las características geológicas de las formaciones presentes en la península se hizo una clasificación del tipo de suelo según la norma sísmica vigente (NC 46 2017). Mediante el software SELINA se procesaron los datos de los terremotos, conjuntamente con las relaciones empíricas de predicción del movimiento del suelo y la distancia a cada sitio (unidad de suelo) para el análisis determinístico del peligro sísmico. Como resultado, se obtuvieron valores de espectro de respuesta de suelo (PGA, Sa0.2, Sa1.0), tanto para suelo blando como para suelo tipo roca, de acuerdo con el escenario de terremoto y se correlacionó la intensidad con los parámetros del movimiento del suelo.

Palabras clave: peligro sísmico determinístico; escenario de peligro; aceleración pico; fuente sísmica; espectro de respuesta de suelo.

Abstract

Using a deterministic approach to characterize soil movements, an earthquake scenario was developed for determining the seismic hazard of the

Hicacos peninsula in Matanzas, Cuba. The earthquake origin areas of the western territory with the highest seismic potential, within a radius of 300 kilometers, were selected for the peninsula. Earthquakes with the maximum magnitude were associated in these faults based on expert judgment based on results of recent studies. On the basis of the description of geological characteristics of formations present on the peninsula, a classification of the soil type was made according to the current seismic standard (Cuban Standard, 2017). The earthquake data was processed by using SELINA software in conjunction with the empirical relationships for predicting soil movement and the distance to each site (soil unit) for the deterministic analysis of seismic hazard. As a result, soil response spectrum values (PGA, Sa0.2, Sa1.0) were obtained for both soft soil and rock-type soil according to the earthquake scenario and it was correlated intensity with soil movement parameters.

Keywords: deterministic seismic hazard; hazard scenario; peak acceleration; seismic source; soil response spectrum.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tuvo el propósito de desarrollar un escenario de terremoto para determinar el peligro sísmico de la península de Hicacos (Matanzas, Cuba), empleando un enfoque determinístico en la caracterización de los movimientos del suelo.

La península de Hicacos está situada en la región occidental de Cuba, alejada de la interacción en la zona límite entre las placas de Norteamérica y El Caribe (Figura 1). Esto determina que la tectónica activa esté relacionada con las deformaciones que se producen al interior de las placas tectónicas.

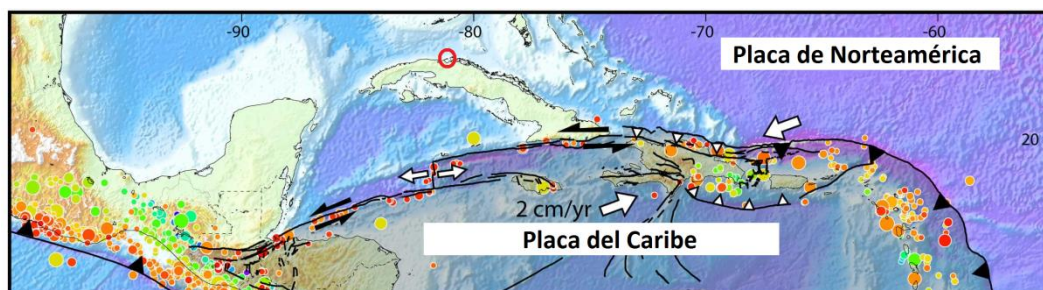


Figura 1. Ubicación de la península de Hicacos (enmarcada en el círculo rojo) dentro del entorno sismotectónico del Caribe.

La propia interacción de las placas tectónicas ha dado origen a estructuras tectónicas secundarias hacia el interior del país. De ahí que la sismicidad que se manifiesta en la zona occidental tenga un origen de interior de placas. Aquí

se han generado daños locales de consideración dada la poca profundidad de los terremotos que han ocurrido muy próximos o debajo de las ciudades y pueblos que existen en esta región del país.

De acuerdo con Arango-Arias y otros investigadores (2017), desde el punto de vista tectónico no existe coincidencia en los diferentes mapas o esquemas neotectónicos y sismotectónicos elaborados por diferentes autores para la región del norte de Matanzas-Villa Clara, donde se ubica la península de Hicacos (Cotilla 1998; Cotilla *et al.* 1996, 2007).

Cuevas-Ojeda y demás colaboradores (2018) obtuvieron un esquema tectónico para la región occidental (Figura 2) donde fueron caracterizadas las diferentes estructuras desde el punto de vista de las anomalías geofísicas, determinándose longitud, direcciones y estimaciones de profundidad de estas. Sin embargo, en su trabajo no se distingue cuáles de estas fallas son sísmicamente activas ni se caracterizaron todas las profundidades de dichas fallas. En esa figura se enumeraron las fallas de interés para nuestro estudio, que son 92: falla Norte Cubana, 126: falla Pinar y 140: falla Las Villas.

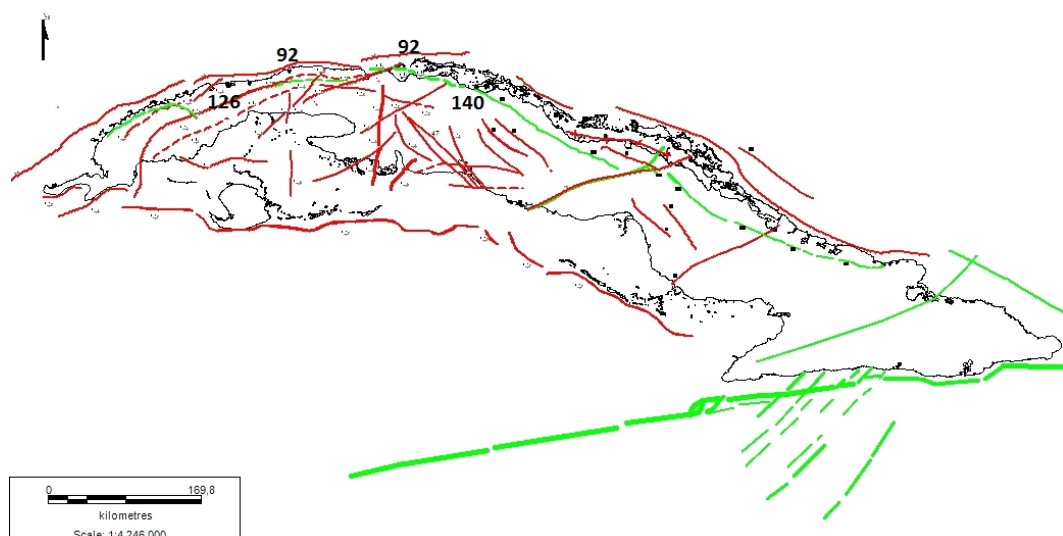


Figura 2. Esquema tectónico (Cuevas *et al.* 2018) que incluye en rojo las fallas interpretadas por geofísica y en verde las fallas propuestas por otros autores (92: falla Norte Cubana, 126: falla Pinar, 140: falla Las Villas).

Considerando el resultado de la interpretación geofísica de estos autores, las fallas de mayor interés con influencia en la península de Hicacos y por su envergadura son:

- Falla Pinar (# 126) con 230 km de longitud por criterios geofísicos y 246 km por interpretación de imágenes satelitales, con una de 30 km.

Los autores plantean que puede extenderse más hacia el este como se aprecia en las líneas discontinuas de la Figura 2.

- Falla Norte cubana (# 92), estructura discontinua con cuatro sectores (tramo más occidental 34 km; segundo tramo 68 km; tercer tramo 186 km y el más oriental 110 km).
- Falla Las Villas (# 140) con longitud aproximada de 220 km, estimada del esquema de este estudio y una profundidad entre 5-15 km. También refieren que esta falla continúa más al noroeste como se observa en el trazado en líneas discontinuas de la Figura 2, denominándola falla Las Villas supuesta. En esta dirección la falla corta la península de Hicacos en el comienzo de esta franja de tierra.

Esta extensión hacia el noroeste de la falla Las Villas supuesta cortando la península es muy significativa. Por su parte, French y Schenk (2004) presentan el trazado de un sector de la falla Norte Cubana que atraviesa la península de Hicacos aproximadamente por el mismo lugar. Es posible que, por su ubicación, los terremotos que ocurrieron en Santa Marta en 2000 y 2017 estén relacionados con esta compleja tectónica.

Desde el punto de vista geológico-tectónico la falla Pinar ha sido estudiada por numerosos investigadores (Cruz *et al.* 2011; Cofiño y Cáceres 2007; Cofiño *et al.* 2011; Hernández, Sosa y Gómez 2007) que han localizado y caracterizado la evolución de la falla. En general, esta falla es clasificada del tipo de deslizamiento por el rumbo.

La falla Norte Cubana presenta varios sectores y en el tercero de estos algunos autores apuntan un campo de esfuerzos complejos (Braunmiller, Thompson y McNutt 2019), sugiriendo la existencia de varias zonas de debilidad adyacentes a la falla principal con diferentes mecanismos focales en la secuencia de Corralillo 2014 (Figura 3) (mecanismo de falla normal para el terremoto principal y de falla inversa para la mayoría de las réplicas de mayor energía $M \geq 3,8$).

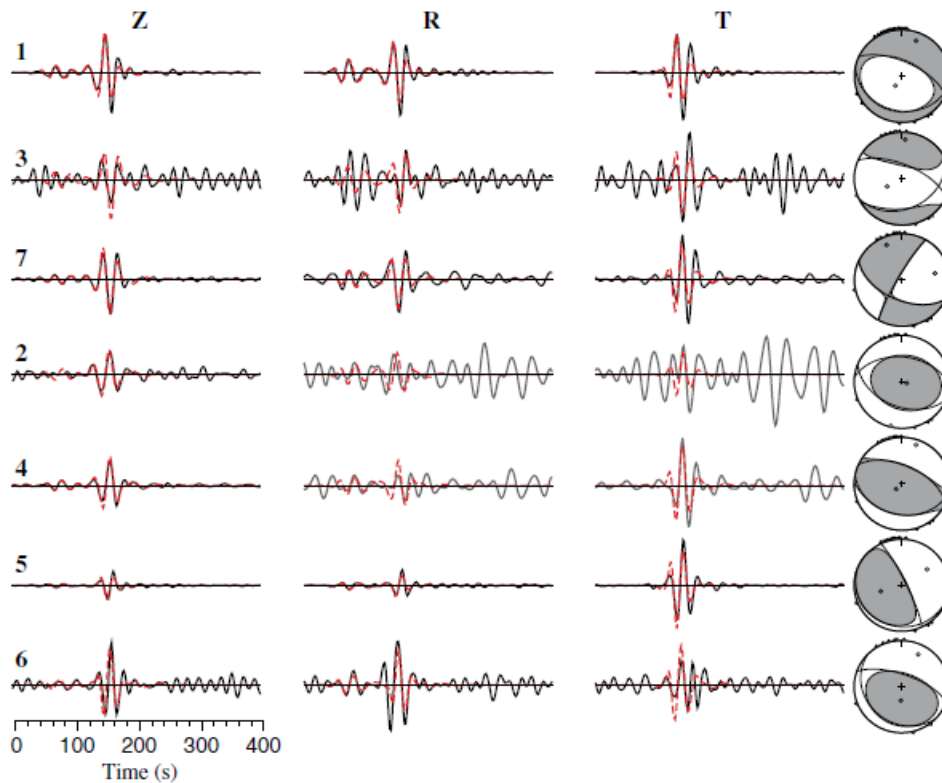


Figura 3. Imagen donde se observan los mecanismos focales de la secuencia de 2014 Corralillo (Braunmiller, Thompson y McNutt 2019).

Con relación a la secuencia de Corralillo 2014, Arango-Arias y otros investigadores (2017) calcularon dos tensores de momento sísmico del terremoto principal, con dos modelos de velocidades, que evidenciaron planos de falla con orientación NW-SE y con mecanismos de falla normal (Figura 4).

Tiempo de origen (yyyymmddhh:mm): 20140109 20:57 UTC							
	Lat (°N)	Lon (°W)	Prof. (km)	Mw	Mec Focal	Plano Soluc (N1 N2)	%DC
SSNC 1	23.26	80.66	3	5.0		280 76 -97 127 16 -64	83
SSNC 2	23.28	80.60	3	5.1		279 70 -106 140 25 -52	84

Figura 4. Resultados resumidos del tensor del momento sísmico del terremoto principal de la secuencia de Corralillo 2014 determinados por Arango-Arias y otros investigadores (2017) para dos modelos de velocidades (SSNC1 y SSNC2).

La falla Las Villas ha sido descrita como una falla inversa (Jelev 1993; Jelev, Marinova y Vázquez 2004); sin embargo, Cotilla y otros investigadores (2007) la describen como una falla normal con algunos sectores de falla inversa.

Los registros históricos de la actividad sísmica en la región occidental de Cuba datan de la época de la colonia española. En este caso podemos mencionar, como muy significativo, el terremoto del 23 de enero de 1880 ($M_s = 6,0$) que produjo VIII grados de intensidad máxima en la escala MSK en la zona de San Cristóbal, Pinar del Río, que se sintió con intensidad máxima VI en La Habana, cuya área de perceptibilidad se extendió hasta Cienfuegos (Chuy 1999; Chuy y Llanes 2012). Muchos autores asocian este terremoto a la falla Pinar (Díaz y Lilienberg 1989; Chuy 1999; Cuevas-Ojeda *et al.* 2015).

En la actual provincia de Matanzas ocurrieron tres terremotos con intensidad máxima de V en la escala MSK, en 1852, 1854 y 1903 (Chuy 1999). Más al este, a la falla Las Villas, Cotilla y demás colaboradores (2007) le asocian el terremoto del 15 de agosto de 1939 ($M_s = 5,6$).

Con la instalación de estaciones sismológicas en la región occidental, a partir de la década de 1960, se incrementó la capacidad de detección de terremotos en esta zona de baja sismicidad. Se registraron terremotos significativos como el de Torriente-Jagüey Grande en 1982, con magnitud 5 e intensidad máxima VI en la escala MSK en esta localidad (Chuy, González y Orbera 1994).

En el año 2000 se registraron otros terremotos importantes, sobre todo en la península de Hicacos, en Santa Marta, con la particularidad de tener bajas magnitudes y ser muy superficiales, lo cual provocó intensidades moderadas en Varadero y algunos daños ligeros en viviendas de tipo C (edificios de hormigón armado prefabricado, construcciones de paneles grandes prefabricados, construcciones de madera bien fabricadas) e instalaciones hoteleras (7 de octubre de 2000, M_l 2,7 y 2,8; intensidad máxima V). También el 29 de julio de 2017 ocurrió un terremoto de magnitud 4,5 con intensidad máxima de VI en Santa Marta (Figura 5) y en el oeste de la península (Chuy *et al.* 2017).

Con anterioridad había ocurrido un terremoto en la localidad de Corralillo al norte de Villa Clara en enero de 2014 con magnitud de momento (M_w) 5,1 perceptible en las provincias de Villa Clara, Matanzas, Mayabeque y La Habana, así como en los cayos situados al sur de la Florida, Estados Unidos, desde Key West hasta Marathon (Arango-Arias *et al.* 2017) con intensidad máxima de VI en la escala EMS-98 (Escala Macrosísmica Europea).



Figura 5. Grietas pasantes en muros de mampostería. Vivienda en Santa Marta.
Fuente: Chuy *et al.* (2017).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Determinación de un escenario de peligro sísmico determinístico (PSD) en la península de Hicacos

En el enfoque determinístico para caracterizar los movimientos del suelo se propone un escenario de terremoto tal que represente el mayor peligro sísmico en un sitio; para ello se requiere tener en cuenta tres aspectos fundamentales: la definición de una o varias fuentes sísmicas, el terremoto que determina el peligro mayor de la o las fuentes con una magnitud especificada y un parámetro del peligro, como por ejemplo la aceleración pico del suelo (PGA, por sus siglas en inglés) que produce este terremoto a una distancia D de la localidad de interés.

De acuerdo con Reiter (1991) el peligro sísmico determinístico en un sitio X podría ser expresado simplemente como la aceleración pico resultante de la ocurrencia de un terremoto de una magnitud M dada en la fuente Y , a una distancia específica del sitio.

2.2. Definición de las fuentes sísmicas

Las fuentes sísmicas pueden ser fallas claramente determinadas y parametrizadas, estructuras geológicas no muy bien detalladas o grandes zonas sismotectónicas cuando se desconoce con exactitud la relación con la actividad sísmica. Estas pueden ser representadas como fuentes puntuales, lineales o en forma de áreas.

La identificación de fallas activas en la región occidental ha sido controversial a lo largo de las últimas décadas, ya que no ha habido un consenso en cuanto a la presentación de modelos de fallas activas que respondan a la sismicidad manifiesta. Estas discrepancias son más frecuentes en zonas de baja e infrecuente actividad sísmica, lo que hace muy difícil ajustar esta sismicidad a fallas en específico.

En el occidente de Cuba se aprecia una gran dispersión espacial de los epicentros de los terremotos (Figura 6) con agrupamientos alrededor de las estaciones sismológicas, debido a errores azimutales por la distribución de las estaciones sismológicas ubicadas en esta región, lo que aumenta la incertidumbre en las determinaciones hipocentrales. A esto se añade el corto tiempo de registro instrumental para el análisis de la sismicidad de baja energía.

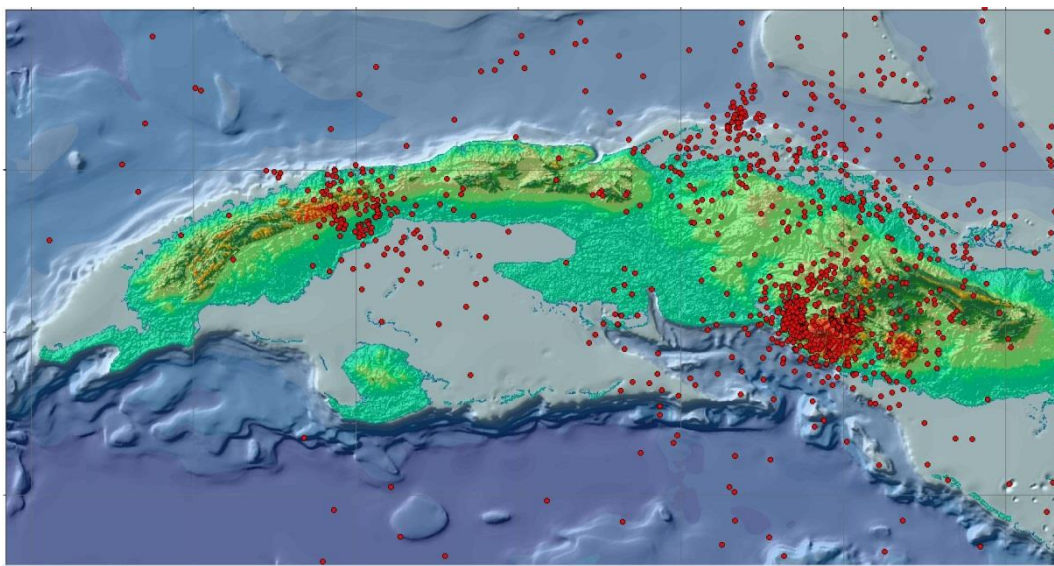


Figura 6. Distribución espacial de los epicentros de los terremotos en Cuba occidental, 2010-2017. Fuente: Servicio Sismológico Nacional de Cuba (2019).

Como se evidencia en párrafos anteriores hay una escasez de estudios tectónicos detallados en la región occidental de Cuba y en el país en general, que proporcionen los datos paramétricos de las fallas sísmicamente activas como son: el área y ancho de la falla, la longitud de la falla, la tasa de desplazamiento, el mecanismo de la falla, su ángulo de buzamiento, el rumbo, entre otros; que permitan determinar con mayor precisión la magnitud máxima de una falla sísmica.

Para realizar este trabajo se seleccionaron las fallas o zonas más importantes para el área de estudio, basados en los modelos tectónicos de Cuevas *et al.* (2018), el mapa de fallas de French y Schenk (2004), la sismicidad histórica de Chuy, González y Orbera (1994) y la instrumental registrada en la región por el Servicio Sismológico Nacional.

De esta forma se seleccionaron tres fuentes sísmicas en el territorio occidental con la mayor potencialidad en un radio de 300 km. Se propone una combinación del escenario de terremoto compuesto por tres zonas de fallas

(falla Pinar, tramo de la falla Norte Cubana que corta la península de Hicacos y el tercer tramo de la Norte Cubana al noreste de la península) (Figura 7).

Esta última fuente pudiera estar relacionada con el terremoto más fuerte de la zona en el período de registro instrumental (M_w 5,1 en 2014, Corralillo), cuyo mecanismo focal y dirección de ruptura (Arango-Arias *et al.* 2017) no están en correspondencia con el ambiente tectónico descrito en otras investigaciones para esta región.

2.3. Terremoto determinante del peligro

A estas zonas de fallas se les asignó la magnitud máxima según Álvarez, Lindholm y Villalón (2017), la cual, como una regla aproximada, este valor de magnitud máxima es, al menos, cinco decimales mayor que la magnitud máxima histórica. Estas son:

- Zona de falla Pinar, magnitud máxima 6,7
- Zona de falla Norte Cubana, magnitud máxima 6,2
- Zona de falla Norte Cubana (tramo noreste), magnitud máxima 6,2

El escenario se define a partir de la ubicación de los terremotos de San Cristóbal de 1880 en la falla Pinar, Corralillo 2014 en el tercer tramo de la falla Norte Cubana y Santa Marta 2017 en el sector de la falla Norte Cubana que corta la península (Figura 7) con las magnitudes máximas asignadas, a distancias de la península de 195 km, 55 km y 5 km, respectivamente.

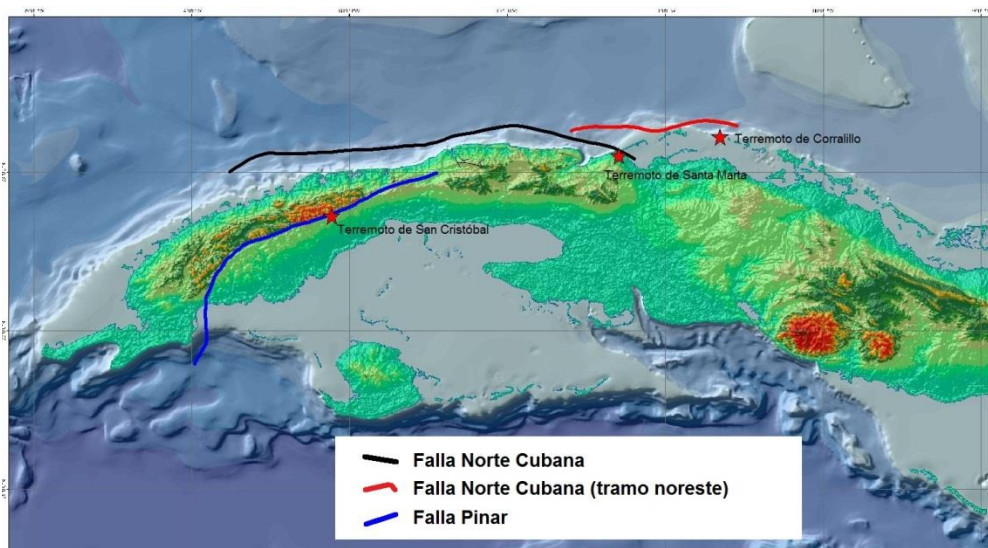


Figura 7. Escenario de terremoto definido para la península de Hicacos donde se muestran las fallas seleccionadas y la ubicación de los terremotos de interés para este análisis.

2.4. Clasificación del suelo según la norma sísmica vigente

Para calcular la aceleración sísmica mediante un espectro de respuesta de suelo en este escenario se tiene en cuenta el tipo de suelo presente en la península de Hicacos, considerando la descripción de las características geológicas de las formaciones presentes en el Mapa Geológico de Cuba Occidental 1:100 000 (Núñez *et al.* 2006) y las terminologías y descripciones de las unidades litoestratigráficas del léxico estratigráfico (Carrillo *et al.* 2009) (Figura 8).

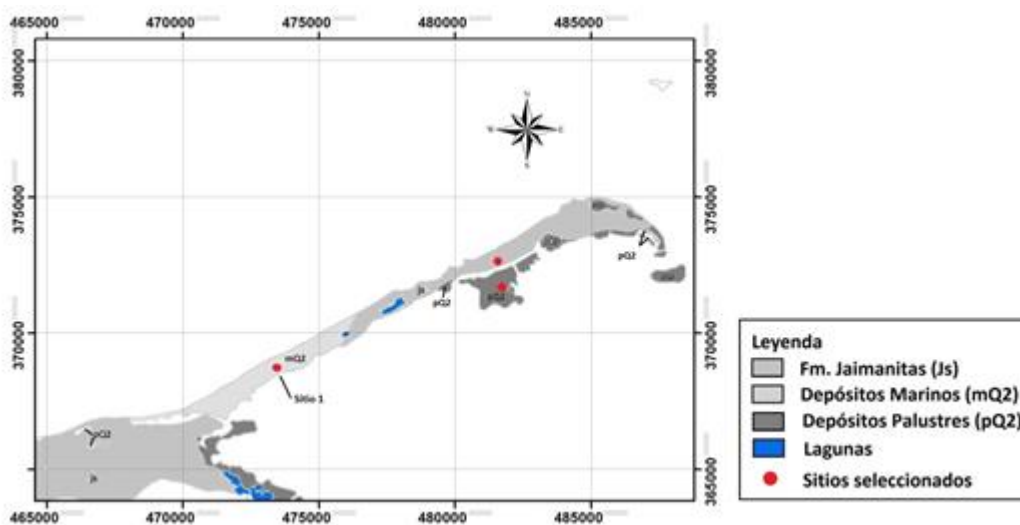


Figura 8. Mapa geológico de la península de Hicacos (modificado de Núñez *et al.* 2006), con los sitios seleccionados para el cálculo del peligro sísmico.

Se hizo una clasificación del tipo de suelo según la norma sísmica vigente (Norma Cubana 2017), en suelos: roca y suelo blando que son los que predominan en la península de Hicacos:

Roca: formación Jaimanitas

Suelo blando: sedimentos cuaternarios marinos y palustres

Dada la escasez de datos geotécnicos y de mediciones geofísicas para obtener los valores de velocidad de la onda de corte (V_s), estos fueron obtenidos de la bibliografía internacional, de tablas calibradas para terremotos fuertes en diferentes tipos de suelos, algunos de ellos con características similares a los nuestros. Se obtuvieron los valores de V_s de los suelos presentes en cada estrato y se estimó la V_{s30} para homogenizar la clasificación del suelo en el área de estudio acorde a la Norma Cubana (2017).

De esta forma, se seleccionaron tres puntos dentro de la península, uno representativo del suelo roca y dos puntos para suelo blando distribuidos en la península (Figura 8).

Examinando estos aspectos fue posible seleccionar una relación de atenuación para calcular el espectro de respuesta del suelo. En este caso, la de Abrahamson y Silva (2008) que tiene en cuenta la V_{S30} , es aplicable a distancias entre 0 y 200 km y considera mecanismos focales normal, de rumbo e inverso, entre otros aspectos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Espectro de respuesta del suelo

Mediante el software SELENA (Molina *et al.* 2015) se procesaron los datos de los terremotos, sus coordenadas, magnitud y profundidad; el rumbo y el buzamiento según Cofiño y Cáceres (2007) y Arango-Arias y otros investigadores (2017) y la distancia a cada sitio (unidad de suelo), conjuntamente con las relaciones empíricas de predicción del movimiento del suelo de Abrahamson y Silva (2008). Este programa es una herramienta para la estimación de pérdidas por terremotos, que como resultado del peligro sísmico, produce un espectro de respuesta del suelo. En esta investigación al considerar el tipo de suelo se calculó un "espectro específico del suelo" para cada sitio seleccionado.

Se evaluaron todos los escenarios: contemplando los tres terremotos juntos y cada uno por separado. Como resultado se determinó que el escenario determinístico más desfavorable se presenta si ocurre un terremoto en la fuente sísmica que atraviesa la península de Hicacos (identificada aquí como el tramo de la falla Norte Cubana que corta la península). Siendo el sitio 1 (Figura 8) donde se producirían los mayores valores de aceleración pico y amplitud espectral por su proximidad y por las características del suelo.

La Tabla 1 muestra un ejemplo del escenario de peligro sísmico que resulta mayor que los valores de aceleración dados por los últimos estimados de peligro sísmico determinístico para la península, donde (S_0) es la PGA.

Tabla 1. Valores de aceleración espectral según estudio determinístico

Período (s)	0	0,2	1
S_a (g)	0,4826	1,2366	0,6775

En la Figura 9 se muestra el gráfico del espectro de respuesta del sitio para suelo blando, obtenido en el estudio determinístico realizado.

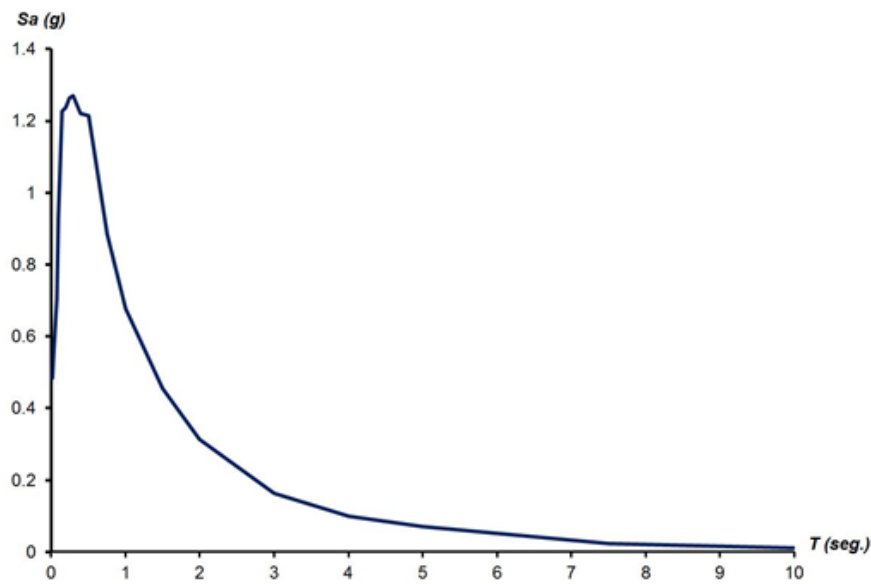


Figura 9. Espectro del sitio según estudio determinístico para suelo blando.

Tomando como referencia los valores de aceleración espectral para 0 s; 0,2 s y 1,0 s, obtenidos del análisis determinístico, se construyó un espectro de diseño siguiendo las especificaciones de la norma cubana vigente (Norma Cubana 2017). Dicho documento establece las ecuaciones para este propósito según cada rama del espectro.

En la Figura 10 se muestran los espectros construidos con los valores indicados por la norma cubana de diseño sismorresistente vigente (Norma Cubana 2017) para suelo blando y con los valores derivados del estudio determinístico.

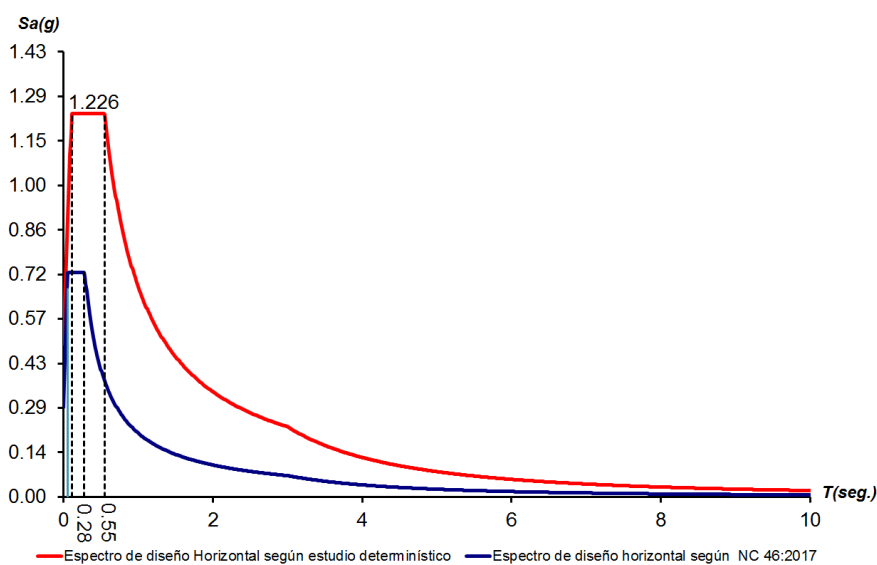


Figura 10. Relación entre espectros para suelo blando. Variación de valores de aceleración.

Se observa que el estudio determinístico arroja un valor de aceleración pico del terreno (PGA) de 0,4826 g (473,43 cm/s²), que es 59 % mayor que el valor obtenido en la norma cubana de diseño sismorresistente vigente (Norma Cubana 2017) y que es de 0,289 g (283,509 cm/s²).

Igualmente los valores de períodos de esquina, calculados según las ecuaciones dadas por la norma cubana vigente (Norma Cubana 2017) y que limitan la meseta del espectro resultado del estudio determinístico, son mayores (0,11 s–0,55 s); en contraposición a los del espectro de diseño de la norma cubana (0,06 s–0,28 s). Un mayor tamaño de la meseta del espectro implica que mayor cantidad de tipos estructurales serán afectados al ocurrir un sismo como el que describe el espectro determinístico obtenido.

Edificaciones con períodos entre 0,11 s y 0,55 s serán sometidas a los mayores valores de aceleración espectral y, por tanto, a una mayor acción del terremoto. Asimismo, en las zonas de período largo edificaciones de grandes períodos, mayor de tres segundos, serán mayormente afectadas.

Aunque la Escala Macrosísmica Europea (Comisión Sismológica Europea 1998) afirma que:

Mientras es innegable que los valores de intensidad obtenidos de los efectos observados son un producto del movimiento real del suelo, la relación entre estos es compleja y no es amena a correlaciones simples; también hay evidencia de que la aceleración pico del suelo no es el parámetro más importante que afecta a la intensidad. Las correlaciones entre intensidad y aceleración pico del suelo muestran típicamente mucha dispersión, tan grande que limitan el significado de los valores que se predicen (aunque la dispersión puede ser reducida usando aceleraciones espectrales) (p. 55).

Sin embargo, para dar un acercamiento de lo que significa la consideración de un mayor valor de aceleración espectral para período 0 s, se realizó un análisis de los valores de intensidad. Para esto se utilizaron diferentes ecuaciones, obtenidas por autores de reconocido prestigio internacional.

Norma Española (NCSE-2002):

$$\text{Log}_{10} a = 0,30103 I - 0,2321 \quad (1)$$

Gutenberg and Richter (1942):

$$\text{Log}_{10} a = 0,333 I - 0,5000 \quad (2)$$

Murphy and O'Brien (1977)

$$\text{Log}_{10} a = 0,25 I + 0,25 \quad (3)$$

Trifunac and Brady (1975)

$$\text{Log}_{10} a = 0,30 I - 0,0140 \quad (4)$$

En la Tabla 2 se muestran los resultados de aplicación de dichas ecuaciones.

Tabla 2. Valores de aceleración para las ecuaciones descritas

Autores	Intensidad			
	6	7	8	9
	$a_{\text{máx}} \text{ (g)}$			
Gutenberg and Richter	0,03	0,07	0,15	0,32
Trifunac and Brady	0,06	0,12	0,25	0,49
Murphy and O'Brien	0,06	0,10	0,18	0,32
NCSE-2002	0,04	0,08	0,15	0,31

Es válido aclarar que estas ecuaciones han sido obtenidas para diferentes ambientes tectónicos y condiciones. Sin embargo, comparar los valores del estudio determinístico presentado en este trabajo con las aceleraciones obtenidas permite suponer, con cierta fiabilidad, que las intensidades superarían los nueve grados para el valor correspondiente al período $T=0$ s (0,4826 g) y, por tanto, consistente con falla seria en muros; falla estructural parcial de techos, falla de techos y pisos, colapso o casi colapso total, grandes rajaduras en elementos estructurales con falla a compresión del hormigón y fractura de barras de refuerzo. Ruptura de uniones de vigas reforzadas; inclinación de columnas. Colapso de algunas columnas o de un único piso superior.

Igualmente se utiliza la relación mostrada por IGN-UPM (2013) que establece para España una relación entre la máxima aceleración del terreno y la intensidad, afirmando que para valores superiores de 0,392 g la intensidad en la escala macrosísmica europea (Comisión Sismológica Europea 1998) es de nueve grados.

4. CONCLUSIONES

- Con el estudio determinístico se obtienen valores de espectro de respuesta de suelo, tanto para suelo blando como para suelo tipo roca, considerando la potencialidad sísmica de la falla Pinar, el tramo de la falla Norte Cubana que corta la península de Hicacos y el tercer tramo de la falla Norte Cubana al noreste de la península.

- Se determina que el escenario determinístico más desfavorable se presenta si ocurre un terremoto en la fuente sísmica que atraviesa la península de Hicacos (identificada aquí como el tramo de la falla Norte Cubana que corta la península). Está ubicado en el sitio 1 dentro de la península de Hicacos, a cinco kilómetros de esta fuente, caracterizado por presentar un suelo blando que propicia la aparición de las mayores aceleraciones.
- El escenario más desfavorable seleccionado es representativo de la magnitud máxima de las zonas de fallas analizadas y se corresponde con un terremoto extremo que solo debe tenerse en cuenta para el diseño y rehabilitación de obras críticas.
- El análisis espectral muestra que, para el escenario determinístico seleccionado, las edificaciones son sometidas a una mayor demanda sísmica que la establecida en la norma cubana de diseño (2017) para el terremoto extremo. Por tanto, los requerimientos para el diseño y la rehabilitación para las estructuras críticas son mayores que los solicitados por dicha norma para el área correspondiente al escenario presentado.

5. REFERENCIAS

- Abrahamson, N. A. y Silva, W. J. 2008: Summary of the Abrahamson and Silva NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra*, 24(1): 67-97.
- Álvarez, L.; Lindholm, C. y Villalón, M. 2017: Seismic hazard for Cuba: A new approach. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 107(1): 229-239. Consulta: 15/12/2019. doi: 10.1785/0120160074.
- Arango-Arias, E. D.; González-Matos, O. F.; Palau-Clares, R. y Leyva-Arias, M. 2017: Evaluación del comportamiento de la actividad sísmica de Corralillo, Villa Clara, Cuba iniciada el 9 de enero de 2014. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 18(1): 71-85. ISSN 1729-3790.
- Braunmiller, J.; Thompson, G. y McNutt, S. 2019: The January 2014 Northern Cuba Earthquake Sequence: Unusual location and unexpected source mechanism variability. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(3): 919-928. Consulta: 15/12/2019. doi: 10.1785/0120180272.
- Carrillo, D.; Echavarría, B.; Castellanos, E.; Triff, J. y Núñez, K. 2009: *Léxico Estratigráfico de Cuba*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Chuy, T. J.; González, B. E. y Orbera, L. 1994: Seismicity and Seismic Hazard Assessment for Western Cuba. *Minería y Geología*, XI(3): 45-51.
- Chuy, T. J. 1999: *Macrosísmica de Cuba y su utilización en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica*. Tesis doctoral. Fondos del MES y del IGA. 150 p.

- Chuy, T. J. y Llanes, C. 2012: Impacto en la región occidental de Cuba del terremoto de San Cristóbal de 1880. En: *Salud y desastres. Experiencias cubanas*. Tomo V. La Habana: Editorial Ciencias Médicas. ISBN 978-959-212-599-5.
- Chuy, T. J.; Candebat, D.; Arango, E. D.; Arencibia, E.; González, O. F. y Leyva, M. 2017: Informe del sismo del 29 de julio de 2017 de Santa Marta –Varadero, provincia de Matanzas. Informe Técnico. Fondos del CENAIIS. 25 p.
- Chuy, T. J.; Candebat, D.; Arango, E. D.; Arencibia, E. E.; González, O. F. y Leyva, M. 2017: Informe del sismo del 29 de julio del 2017 de Santa Marta – Varadero, provincia de Matanzas. Fondos del CENAIIS.
- Cofiño, C. E. y Cáceres, D. 2007: Desciframiento de la evolución de estructuras tectónicas mediante la utilización de métodos microtectónicos (caso de estudio falla Pinar). En: 2da Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, VII Congreso de Geología (GEOLOGIA ´2007), Geología Regional y Tectónica.
- Cofiño, C. E.; Fernández de Lara, R.; Ordaz, A. y Cáceres, D. 2011: Origen y funcionamiento de la estructura tectónica Pinar a partir de datos geólogo-geofísicos. En: 4ta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, X Congreso Cubano de Informática y Geociencias (GEOINFO'2011).
- Comisión Sismológica Europea 1998: Escala Macrosísmica Europea (EMS-1998). 95 p.
- Cotilla, M.; Bankwitz, P.; Franzke, H. J.; Álvarez, L.; González, E.; Diaz, J. L.; Grunthal, G.; Pilarski, J. y Arteaga, F. 1996: Una valoración sismotectónica de Cuba. *Revista Geofísica*, 45: 145-179.
- Cotilla, M. O. 1998: An overview on the seismicity of Cuba. *J. Seism.*, 2: 323-335.
- Cotilla, M.; Bankwitz, P.; Franzke, H. J. y Cordoba, D. 2007: Seismicity and seismoactive faults of Cuba. *Russian Geology and Geophysics*, 48(2007): 505-522.
- Cruz, R.; Sánchez, J.; Rodríguez, O.; Mejías, L.; Pérez, Y. y Pérez, M. V. 2011: Nuevas consideraciones estructurales y sismotectónicas vinculadas a la Sierra de los Órganos - Rosario. Provincia de Pinar del Rio. Cuba. En: 4ta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, IX Congreso de Geología (GEOLOGIA ´2011), Geología Regional y Tectónica. 28 p.
- Cuevas-Ojeda, J. L.; Polo-González, B.; Alcaide-Orpí, J. F. y Zapata-Balanqué, J. A. 2015: Evidencias geofísicas en la determinación de la falla Pinar, Cuba, con fines paleosismológicos. En: Memorias VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, VIII Congreso Cubano de Geofísica GEOFÍSICA ´2015. Mayo 4-8, La Habana, Cuba. ISBN 2307-499X.

- Cuevas-Ojeda, J. L.; Alcaide-Orpi, J. F.; Polo-González, B.; Arango-Arias, E. D.; Vega-Garriga, N.; Ríos-Martínez, Y. y Viltres-Milán, Y. 2018: Anomalías geofísicas como indicador de posibles fallas en la región centro occidental, Cuba. Informe de Proyecto. Fondos del CENAIIS. 81 p.
- Díaz, J. L. y Lilienberg, D. A. 1989: Nuevos datos sobre los movimientos tectónicos recientes en Cuba Occidental. Reporte de Investigación, No. 4. Instituto de Geografía. 11 p.
- French, D. C. y Schenk, J. C. 2004: Map Showing Geology, Oil and Gas Fields, and Geologic Provinces of the Caribbean Region. Open-File Report OFR-97-470-K. U.S. Geological Survey. Denver, Colorado, USA. DOI 10.3133/ofr97470K.
- Gutenberg, B. y Richter, C. F. 1942: Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 32(3): 163-191.
- Hernández, I.; Sosa, C. y Gómez, J. 2007: Cartografía de la falla Pinar utilizando métodos geológicos, geomorfológicos, sísmicos y de los campos potenciales. En: 2da Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, VII CONGRESO DE GEOLOGÍA (GEOLOGIA '2007), Geología Regional y Tectónica. 5 p.
- IGN-UPM. 2013: Nuevo mapa de peligrosidad sísmica de España. Proyecto OPPEL.
- Jelev, V. 1993: On the structure of the Las Villas-Baez region (Central Cuba). *Review of the Bulgarian Geological Society*, LIV, Part 3.
- Jelev, V.; Marinova, R. y Vázquez, C. 2004: Plate tectonic interpretation of Las Villas región (Central Cuba). *Godishnik Sofiskiia Univ.*, Volumen 47, Pergamino I, p. 93-96.
- Molina, S.; Lang, D. H.; Meslem, A.; and Lindholm, C. 2015: SELENA v6.5, User and Technical Manual v6.0. Report no. 15---00. Kjeller (Norway) – Alicante (Spain), June 2015, 109 p.
- Murphy, J. R. and O'Brien, L. J. 1977: The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(3): 877-915.
- NCSE-2002. Norma de construcción sismorresistente. *BOE*, No. 244. Madrid.
- Norma Cubana. NC 46: 2017: Propuesta de Norma Cubana NC 46:2017: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción. La Habana: Oficina Nacional de Normalización. 107 p.
- Núñez, K.; Castellanos, E.; San Jorge, W. y Romeu, A. 2006: Mapa geológico digital de Cuba occidental, 1:100000. Instituto de Geología y Paleontología, Sistema de Información Geológica de Cuba (SIGEOL). Organización Panamericana de la Salud. Índice de seguridad hospitalaria.

- Reiter, L. 1991: *Earthquake hazard analysis: Issues and insights*. New York: Columbia University Press. 254 p. ISBN 0-231-06534-5.
- Servicio Sismológico Nacional de Cuba. 2019. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Santiago de Cuba.
- Trifunac, M. D. and Brady, A. G. 1975: On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(1): 139-162.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de intereses que declarar

Contribución de los autores

MVS: Análisis determinístico del peligro sísmico: recopilación y análisis de la información sismotectónica, geofísica y sismológica disponibles. Determinación del escenario de terremoto. Preparación de datos de entrada para el cálculo de parámetros del movimiento del suelo (PGA). Redacción del manuscrito. Discusión y análisis de los resultados. Revisión final y aprobación del original. DCS: Caracterización de los daños por terremotos recientes en la península de Hicacos y confección y análisis del espectro de diseño con respecto a la norma sísmica vigente y su correlación con las intensidades sísmicas. Redacción de esta sección del manuscrito. Discusión y análisis de los resultados. Revisión final y aprobación del original. ZRA: Caracterización geológica, clasificación del suelo según la norma sísmica vigente y cartografía de los puntos de suelo. Redacción de esta sección del manuscrito. Discusión y análisis de los resultados. Revisión final y aprobación del original.

ORCID

MVS, <https://orcid.org/0000-0002-9367-1828>

DCS, <https://orcid.org/0000-0002-0066-4937>

ZRA, <https://orcid.org/0000-0001-5702-8010>

Recibido: 14/01/2020

Aceptado: 05/03/2020