

**División geológico-geotécnica aplicada a la zonación sísmica urbana:  
San Cristóbal, Cuba occidental**

*Geological-geotechnical division applied to urban seismic zonation.  
San Cristobal town, western Cuba.*

Ordaz, A.<sup>(1)</sup>; Chuy, T.J.<sup>(2)</sup>; Hernández-Santana, J.R.<sup>(3)</sup>; García J.A.<sup>(4)</sup>

(1) Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río, Calle Martí 270 Final, C.P. 20100, Pinar del Río, Cuba.

(2) Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), Calle 17 No. 61, Vista Alegre, C.P. 90400, Santiago de Cuba, Cuba.

(3) Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria. C. P. 04510, México D.F., Mexico.

(4) Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), Calle San Juan No. 43, Pinar del Río, Cuba.

**Resumen**

Se presenta el análisis detallado de las condiciones geológico-geotécnicas de un sector de las llanuras altas y medias meridionales del extremo occidental de Cuba, como base para la caracterización y evaluación del efecto de sitio y, en consecuencia, la identificación de los diferentes niveles de susceptibilidad sísmica en el pueblo de San Cristóbal. La actividad sísmica de esta región está asociada fundamentalmente a la dinámica regional de la falla activa de desplazamiento horizontal siniestro Pinar. Los seismos en el área se caracterizan por una magnitud moderada a débil, focos someros y una baja frecuencia. La metodología empleada constó de 3 tareas: (1) elaboración del mapa geológico-geotécnico, (2) zonación en términos de período dominante, y (3) estimación de la variación de intensidad macrosísmica ( $\Delta I$ ). Se ha caracterizado a los grupos litológicos en función de su potencia, velocidad de ondas S, valor-N de ensayos de penetración estándar y la densidad natural de sus materiales. Se propone una zonación en seis clases, según los períodos dominantes de sus materiales; además, se estimaron las  $\Delta I$  para cada clase. El grupo litológico aluvial reciente y el aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior, con espesores superiores a 30 m, presentan la mayor capacidad de amplificación sísmica.

**Palabras clave:** Zonación geológica-geotécnica, períodos dominantes, amplificación sísmica.



## **Abstract**

This paper presents the detailed analysis of the geological-geotechnical conditions of a sector of the southern high and middle plains of western Cuba, as a basis for the characterization and evaluation of the effect of site and, consequently, the identification of the different levels of seismic susceptibility in the San Cristóbal town. Seismic activity in this region is mainly associated to the regional dynamics of the active left-lateral strike-slip fault Pinar. Earthquakes in the area are characterized by moderate to weak magnitude, shallow focus and a low frequency. The methodology consisted of 3 tasks: (1) elaboration of the geological-geotechnical map, (2) zonation in terms of dominant period, and (3) estimate of the variation of macroseismic intensity ( $\Delta I$ ). The present lithologic groups were characterized according to their power, S wave velocity, value-N standard penetration test and the natural density of materials. Zonation is proposed in six classes, according to the dominant period of their materials; also were estimated for each class ( $\Delta I$ ). The recent alluvial lithologic group and alluvial marine group of Pliocene-lower Pleistocene, with thicknesses greater than 30 m, have the highest capacity of seismic amplification in the area.

**Keywords:** geological-geotechnical zonation, dominant periods, seismic amplification.

## **1. Introducción**

La sismicidad es uno de los fenómenos geodinámicos de la corteza terrestre que más influye en el desarrollo socioeconómico de una región o localidad, debido a sus efectos devastadores para la vida humana y el patrimonio histórico. En las principales zonas sísmicas, tanto por su energía como por la frecuencia de sus eventos, por lo general, existen estudios macrosísmicos e instrumentales dirigidos a la estimación de la peligrosidad, niveles de vulnerabilidad y de riesgo, sobre todo enfocados a la disminución de pérdidas humanas y al control de los daños de tipo económico.

Desafortunadamente, debido a múltiples factores de tipo técnico, político, financiero y otros, una gran parte de las zonas de moderada y débil actividad sísmica no cuentan con estudios de zonación de la peligrosidad sísmica, lo que además de someter a sus poblaciones al azar de estos procesos endógenos, tampoco facilita la adecuada ordenación territorial, tanto de sus áreas urbanas construidas, como las proyectadas en los programas de desarrollo socioeconómico regional o local. En este escenario, han adquirido una

gran importancia los llamados métodos indirectos de microzonación sísmica, basados en la consideración de los factores que intervienen en la respuesta del suelo a los movimientos sísmicos, a partir de la información geológica, geotécnica, geofísica e hidrogeológica disponible. Estos estudios tienen como objetivo establecer áreas, donde la intensidad de los terremotos puede variar de acuerdo con las condiciones geológico-geotécnicas locales, como tipos litológicos, espesor de los sedimentos poco consolidados, densidad y saturación hídrica de los suelos, entre diversos factores. Precisamente, el objetivo principal de este trabajo es determinar cómo influyen las condiciones geológico-geotécnicas del pueblo de San Cristóbal ante la ocurrencia de un seísmo de moderada a fuerte intensidad, delimitando unidades con similares respuestas dinámicas del suelo ante estos eventos.

La actividad sísmica, originada por la liberación súbita de la energía acumulada durante los procesos de deformación de la corteza terrestre, no constituye un evento desconocido en el archipiélago cubano, donde se reconocen dos tipos de sismicidad: entre placas y de interior de placas. La primera, relacionada

con la interacción entre la Placa de Norteamérica y la del Caribe, es la de mayor significado en el país, capaz de generar seismos de 8.0 grados magnitud Richter y ha sido responsable de 22 de los 28 terremotos de gran intensidad reportados en Cuba (Chuy, 1989, 2003). La segunda, asociada a fallas activas de tipo regional y local, se caracteriza por eventos sísmicos de baja frecuencia, con focos someros y una magnitud de moderada a débil. Sin embargo, reportes históricos e instrumentales registrados desde el año 1528 hasta el presente, tanto en el occidente como en el centro de Cuba, evidencian la ocurrencia de 6 seismos de gran intensidad, entre los que se encuentra el terremoto de 8 grados de intensidad MSK, en San Cristóbal, Cuba occidental, en el año 1880 (Chuy *et al.*, 1994; Cotilla, 1999; Chuy, 2000, 2003).

En el caso cubano, los estudios de microzonación sísmica tuvieron su comienzo a inicios de la década de los años 70 del siglo pasado, destacando las investigaciones desarrolladas por el Instituto de Geofísica y Astronomía, y por el Centro Nacional de Investigaciones Sísmológicas, ambos del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (Chuy y González, 1982; Álvarez *et al.*, 1991; Chuy, 1989, 2000, 2002, 2003; Chuy *et al.*, 1994; Chuy y Álvarez, 1995; Cotilla, 1998, 1999; González *et al.*, 1999; González, 2006). Sin embargo, en la región occidental aun resulta limitado el número de investigaciones vinculadas a la zonación sísmica, fundamentalmente han estado dirigidas a obras de gran importancia económica y a la ciudad de La Habana, por su carácter de capital del país (Chuy y González, 1982; González *et al.*, 1999; González, 2006), lo que le confiere un valor especial al presente trabajo.

## 2. Área de estudio

### 2.1. Localización geográfica

El pueblo de San Cristóbal se localiza al oeste de la provincia de Artemisa, en Cuba occi-

dental; y está comprendido entre las coordenadas 22°41'37'' y 22°43'23'', de latitud norte, y 83°4'33'' y 83°2'7'', de longitud oeste (Figura 1A). El área de estudio abarca una superficie de 14 km<sup>2</sup> y, en la actualidad, cuenta con 8 100 viviendas y aproximadamente 26 000 habitantes. El desarrollo demográfico de este pueblo ha marcado un notable crecimiento poblacional y del fondo habitacional, con la duplicación de ambos indicadores entre el año 1970 y el 2012, lo que determina la necesidad de una zonificación sísmica, como parte de las medidas de mitigación y prevención de dichos eventos en esta región de débil a moderada sismogeneación.

### 2.2. Marco geológico territorial

San Cristóbal se ubica sobre los sedimentos de la cuenca cenozoica de los Palacios, en Cuba occidental. Esta estructura deprimida es un monoclinal que buza hacia el Sur, con un ángulo muy suave, de 7° a 8°, cuyo corte estratigráfico está constituido por rocas sedimentarias y vulcanógeno-sedimentarias, que sobreyacen discordantemente sobre un basamento ofiolítico (Cabrera *et al.*, 2004). Éste yace a unos 3 km de profundidad y está conformado por restos de corteza oceánica, representados por un complejo ultramáfico de gabros, serpentinitas y basaltos. Sobre este basamento descansan los depósitos de la Formación Encrucijada, compuestos por basaltos, rocas vulcanógeno-sedimentarias, limolitas y calizas del Cretácico inferior (aptiense-albiense), y sobre ésta aparecen discordantemente los sedimentos terrígenos carbonatados de la Formación Los Negros del Cretácico superior (campaniense-maastrichtiense), con un espesor de 500-700 m, que incluyen areniscas, limolitas polimícticas y vulcanomícticas con intercalaciones de conglomerados vulcanomícticos y calizas micríticas con rudistas.

A partir de estos últimos sedimentos, aparecen las formaciones geológicas que revisten una importancia significativa para la zonifica-

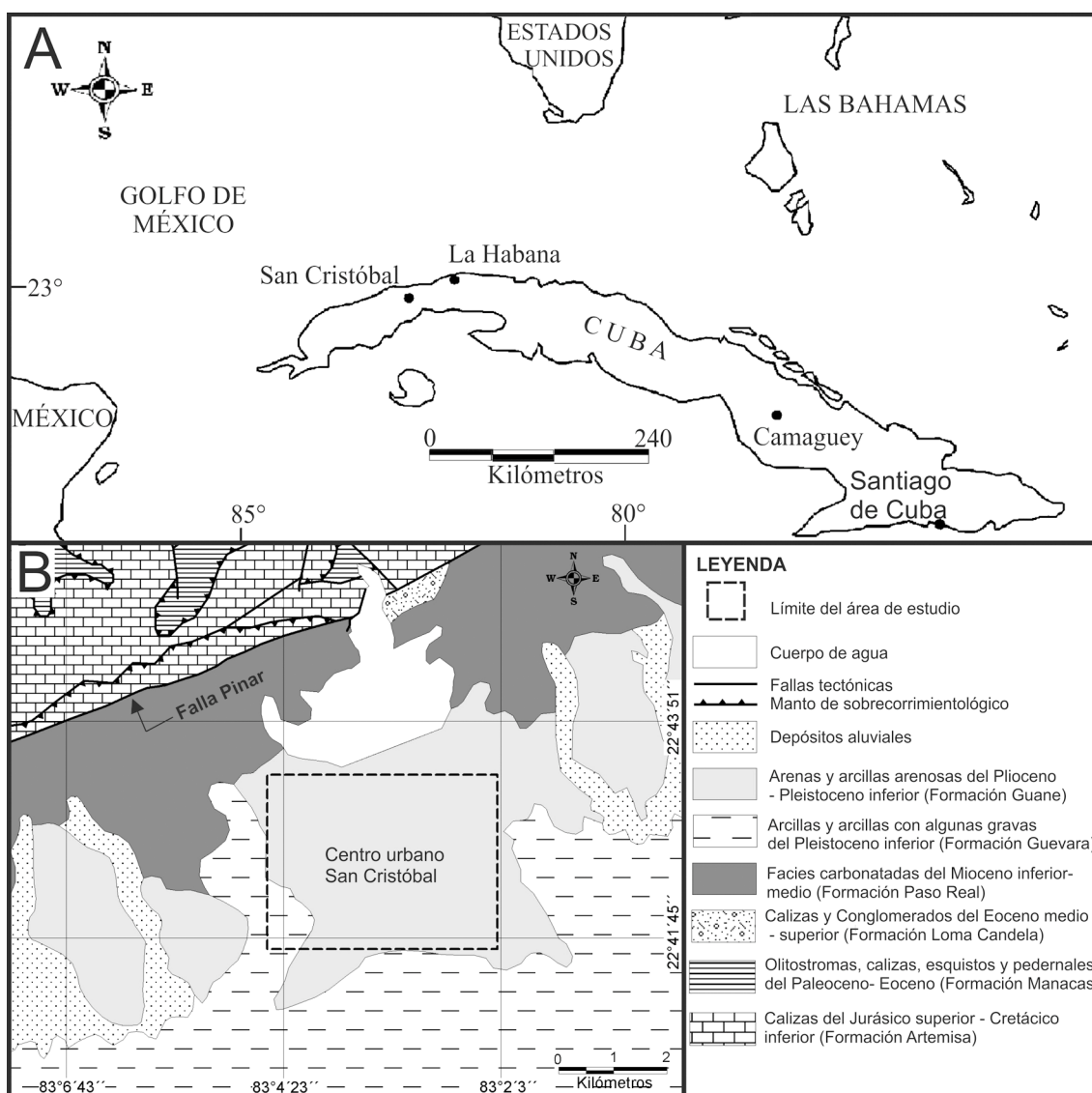


Figura 1. A. Área de estudio del pueblo de San Cristóbal y su entorno, extremo occidental de la provincia de Artemisa, en Cuba Occidental. B. Esquema geológico del pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas. Escala original 1: 100 000.  
 Figure 1. A. Study area of the San Cristobal town and its surroundings, far west of the province Artemisa in Western Cuba. B. Schematic geological map of San Cristobal town and surrounding areas. Original scale 1: 100 000.

ción de la susceptibilidad sísmica de la zona, ya que tienen determinado grado de afloramiento y un buzamiento horizontal y subhorizontal (Figura 1B). En orden de sobreposición: (a) Formación Loma Candela, representada por arcillas y areniscas calcáreas del Eoceno medio-superior; (b) Formación Paso

Real, compuesta por depósitos carbonatados y terrígenos del Mioceno inferior-medio, discordantes sobre la Formación Loma Candela, estando formados por calizas organógeno-detriticas con intercalaciones de areniscas, arcillas, arenas, calizas dolomitizadas y dolomías, con un espesor de 750 m. Finalmente, la

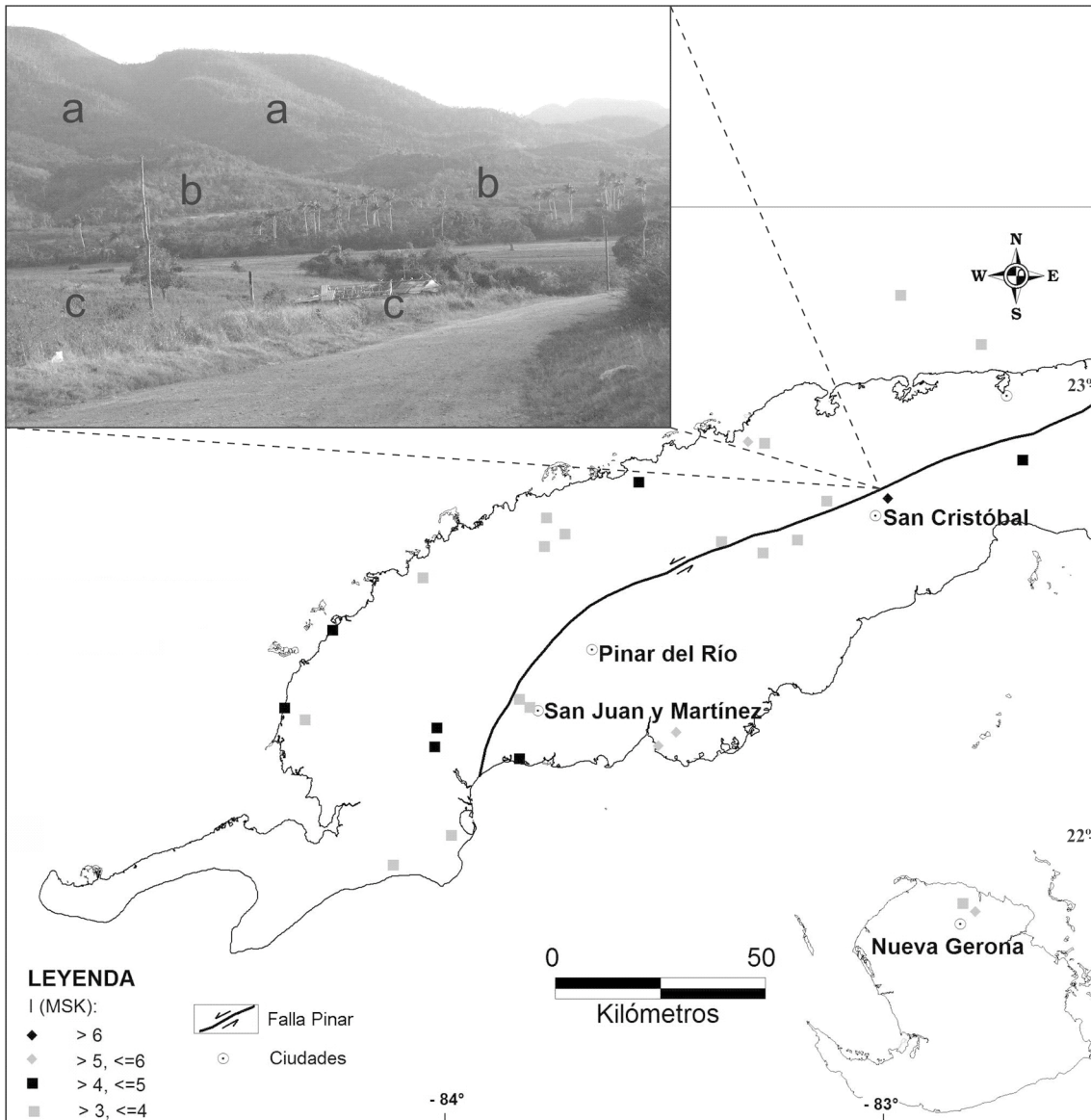


Figura 2. Actividad sísmica en la región occidental de Cuba (1528-2011). En la fotografía: Rasgos morfoestructurales de la falla de transformación Pinar, (a) Escarpa tectónica de la falla Pinar en las montañas bajas de la Sierra del Rosario, al norte del pueblo de San Cristóbal; (b) Lomeríos tectónico-erosivos; (c) Llanuras erosivas altas, en el entorno del área de estudio.

Figure 2. Seismic activity in western Cuba (1528-2011). In picture: Morphostructural features of the transform fault Pinar, (a) Tectonic scarp of Pinar fault; (b) Tectonic-erosive hills; (c) High erosive plains in the study area.

parte superior de la columna estratigráfica está ocupada por conglomerados, gravas, arenas y arcillas arenosas, débilmente cementados, de la Formación Guane del Plio-

ceno-Pleistoceno inferior; sedimentos arcillosos con presencia de gravas de la Formación Guevara y por acumulaciones cuaternarias, tanto de génesis fluvial como lacustre.

### 2.3. Condiciones geomorfológicas

Las principales características geomorfológicas están determinadas por la falla Pinar (Figura 2), la cual divide al territorio en las montañas bajas de la Sierra del Rosario (440 a 650 m) y el sistema escalonado de llanuras costeras del Sur de Pinar del Río (desde la costa hasta 100-120 m), enclavado en el depocentro de la cuenca Los Palacios. Esta estructura profunda de desplazamiento horizontal de izquierda, con componente normal, manifiesta cambios cinemáticos en sus desplazamientos (Cofiño y Cáceres, 2003; Cruz *et al.*, 2007), manteniéndose activa en la actualidad (McGillavry, 1970). La falla Pinar se desplaza por más de 180 km de longitud,

con una inclinación general hacia el sur-sureste, siendo la zona sismogénica más importante del occidente cubano (Díaz y Lilienberg, 1989). Como evidencia geomorfológica de la actividad sísmica de la falla Pinar, se encuentran paleodislocaciones sísmicas en las comunidades de Ojo de Agua y de La Soledad-San Pablo, con derrumbes que superan los centenares y miles de metros cúbicos, a escasos 8-10 km al norte-noroeste del pueblo de San Cristóbal.

El pueblo de San Cristóbal se sitúa al sur de esta falla, sobre llanuras altas y medias, entre 30 y 120 m de altitud, y edades del Pleistoceno medio e inferior (Biosca *et al.*, 1986; Díaz *et al.*, 1986). A su vez, en los ríos San

Tabla 1. Clasificación de los suelos, según su comportamiento sísmico. Comparación de la norma cubana NC 46: 1999 y la española NCSE-02.

Table 1. Classification of soils, according with their seismic behavior. Comparison of the Cuban standard NC46: 1999 and the Spanish NCSE-02.

Norma Cubana NC 46: 1999		Norma Española NCSE-02	
Perfil tipo	Descripción	Tipo de terreno	Descripción
	Roca de cualquier tipo, sedimentaria o cristalina. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de la onda cortante mayor de 800 m/s.		Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso, Vs >750 m/s.
S1	Suelos rígidos de un espesor menor de 60 m hasta la base rocosa, siempre y cuando los estratos superiores estén compuestos por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de la onda cortante entre 450 m/s y 750 m/s.	I	Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros, Vs entre 750 m/s y 400 m/s.
S2	Depósitos estables de suelos no cohesivos o arcillas duras. Los estratos superiores están compuestos por arenas, gravas o arcillas duras. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de una onda de cortante entre 240 m/s y 450 m/s.	II	Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme o muy firme, Vs entre 400 m/s y 200 m/s.
S3	Depósitos de arcillas blandas o medias y arenas con espesores de 10 m o más con o sin presencia de capas intermedias de arenas u otra clase de suelos no cohesivos. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de una onda de cortante menor de 240 m/s.	III	Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando. Vs < 200 m/s.
S4	Depósitos de arcilla blanda con espesores mayores de 12 m. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de una onda cortante menor que 150 m/s.	IV	

Cristóbal y Santa Cruz, el espectro de terrazas fluviales es de 1.5-2 m y de 3-5 m, ambas del Holoceno, y de 10-15 m y de 20-25 m del Pleistoceno superior (Lilienberg, 1973). Estos elementos permiten descartar la influencia de la topografía en el efecto de sitio.

#### 2.4. Sismicidad y movimientos tectónicos recientes

De acuerdo con el mapa de zonificación sísmica con fines de ingeniería (Chuy y Álvarez, 1995; Oficina Nacional de Normalización, 1999), el área de estudio pertenece a una zona de riesgo sísmico bajo, sin efectos dañinos para las construcciones. Por supuesto, esto se considera válido sólo para perfiles de suelo del tipo rocoso-cristalino, definidos como terrenos S1 (Tabla 1); sin embargo, desde el punto de vista de la historia sísmológica del occidente cubano, no puede plantearse la inexistencia de eventos sísmicos. En este sentido, diversos autores (Álvarez *et al.*, 1991; Cotilla, 1998, 1999; Chuy, 2003; Cotilla y Córdova, 2011) reportan algunos de cierta consideración, tales como: Trinidad, Sancti Spíritus, 5 de junio de 1824 (intensidad 6); La Habana, 21 de febrero de 1843 (intensidad 5); San Cristóbal, Artemisa, el 23 de marzo de 1880 (intensidad 8); Trinidad, 24 de enero de 1909 (intensidad 6); San Cristóbal, 20 de diciembre de 1937 (intensidad 6); Caibarién y Remedios, Villa Clara, 15 de agosto de 1939 (intensidad 7); Jagüey Grande, Matanzas, 16 de diciembre de 1982 (intensidad 6); y el 8 de marzo del 2000 (intensidad 5,5) en Varadero, Matanzas. Los eventos sísmicos registrados en el extremo de Cuba occidental (Figura 2) reflejan intensidades hasta mayores de 6 grados, según la escala macrosísmica MSK (Kárník *et al.*, 1984).

Chuy (2003) en investigaciones recientes sobre la amenaza sísmica esperada para el territorio nacional, determinó e incluyó al municipio de San Cristóbal en la zona con intensidad MSK comprendida entre 6.0-7.0 grados y una aceleración horizontal de 40-90

cm/s<sup>2</sup> (0.04 g-0.09 g, donde g = 980 cm/s<sup>2</sup>-aceleración de la gravedad) para suelos de consistencia media (S2), con una probabilidad de ocurrencia del 15 % y un periodo de retorno de 50 años. Estas nuevas consideraciones también influyeron en la necesidad y viabilidad de la zonación de susceptibilidad sísmica presentada en este trabajo.

Por otra parte, la dinámica de los movimientos tectónicos recientes de Cuba occidental, mediante nivelaciones geodésicas reiteradas de primer orden (Díaz y Lilienberg, 1989), reflejaron el carácter activo de la falla Pinar, complementado por las deformaciones sinestrales de las redes fluviales (Cruz *et al.*, 2007). Según la comparación entre los ciclos de nivelación de 10 y 25 años, realizada con la información del Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (hoy GEOCUBA), las montañas de la Sierra del Rosario, al norte de San Cristóbal, experimentan ascensos débiles del orden de + 1 a + 1.5 mm/año, mientras que las llanuras donde está enclavada el área de estudio, al sur, reportan descensos de 0 a-2 mm/año.

Otro rasgo importante es la migración de la sismicidad a lo largo de la falla Pinar, desde el poblado de San Juan y Martínez hasta la propia ciudad de La Habana. Estos resultados evidencian la actividad de la falla y la susceptibilidad sísmica del pueblo de San Cristóbal y de otros alrededores a dicha traza tectónica.

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. Materiales empleados

El levantamiento y la interpretación geológico-geotécnica del pueblo de San Cristóbal y su entorno, ocupó las hojas topográficas 3584-II-d-2, 3584-II-d-3, 3584-II-d-5 y 3584-II-d-6, a escala 1:10 000 (Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, 1981). Para la elaboración del mapa de sismos perceptibles en la región occidental, durante el período com-

prendido entre los años 1528 y 2011, se emplearon los catálogos proporcionados por el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), ampliados con datos instrumentales de la estación sismológica de Soroa, situada a 20 km al noreste de San Cristóbal, y por datos de seismos históricos, recogidos en diferentes documentos. La información geológico-geotécnica, se obtuvo de los informes técnicos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), donde se emplearon las técnicas de sondeos de penetración estándar y perforación rotaria.

### 3.2. Métodos

La metodología para la estimación de la susceptibilidad sísmica del pueblo de San Cristóbal incluyó las tareas siguientes:

Confección del mapa geológico-geotécnico: Fue elaborado con la información geotécnica contenida en 67 sondeos, con profundidades variables entre 10 y 40 m, ejecutados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Cuba. Ellos incluyen las descripciones de columnas litológicas, ensayos de penetración dinámica estándar (SPT) y resultados de propiedades físicas de los suelos, obtenidos en el laboratorio. La zonación geotécnica, se realizó a partir de grupos litológicos, estableciéndose una adecuada diferenciación, según su génesis, espesores y propiedades físico-mecánicas.

Tabla 2. Correlaciones empíricas basadas en  $N$  vs  $V_s$ , teniendo en cuenta la profundidad,  $z$  (Akin *et al.*, 2011).  
Table 2. Empirical correlations based on  $N$  vs  $V_s$ , taking account of depth,  $z$  (Akin *et al.*, 2011).

Tipo de suelo	$V_s$ (m/s)
Todos los suelos aluviales	$V_s=59.44N^{0.109}z^{0.426}$
Arenas aluviales	$V_s=38.55N^{0.176}z^{0.481}$
Arcillas aluviales	$V_s=78.1N^{0.116}z^{0.35}$
Todos los suelos del Plioceno	$V_s=121.75N^{0.101}z^{0.216}$
Arenas del Plioceno	$V_s=52.04N^{0.359}z^{0.177}$
Arcillas del Plioceno	$V_s=140.61N^{0.049}z^{0.232}$

Zonación en términos de período dominante: Este parámetro se correlaciona con el grado de oscilación de los suelos durante un episodio sísmico, pudiéndose inferir, que a mayores valores de períodos dominantes en un material, mayor será la amplificación provocada por las ondas S. En este caso, se utilizó la relación  $T = (4H/V_s)$ , propuesta por Bard (1985), donde  $H$  es el espesor de los sedimentos y  $V_s$ , la velocidad de ondas S. El volumen considerable de datos, permitió efectuar los cálculos de períodos dominantes en cada punto de sondeo e interpolar estos valores para obtener el mapa de susceptibilidad a la amplificación sísmica, según los valores de  $T$ , obtenidos empíricamente. Para determinar  $V_s$ , se utilizaron ecuaciones empíricas, que emplearon el número de golpes  $N$ , obtenido en el ensayo de campo de penetración estándar (NSPT), donde  $N$  corresponde al número de golpes necesarios para hincar una puntaza cónica de 30 cm, aplicándole un peso de golpeo de 63.5 kg, desde una altura de 76 cm. En total, se ha recopilado la descripción de 60 sondeos con ensayos de NSPT, con 1 320 valores de  $N$ . Para el cálculo de  $V_s$  de los suelos del pueblo de San Cristóbal, se empleó la propuesta de Akin *et al.* (2011), la cual considera la edad, génesis y profundidad de cada estrato estudiado (Tabla 2).

Estimación de la variación de intensidad macrosísmica: La evaluación de la susceptibilidad sísmica, a escala regional, requiere la intensidad macrosísmica esperada en la roca de referencia, estimada por Chuy (2003) y señalada en párrafos anteriores. El valor de la intensidad macrosísmica, en cada emplazamiento, variará en función de las características geotécnicas de los materiales, que conforman el suelo del emplazamiento. De este modo, es necesario calcular la amplificación local del movimiento del suelo, en términos de intensidad macrosísmica.

Para la estimación de  $DI$ , se empleó la propuesta de Petrovski (1980):

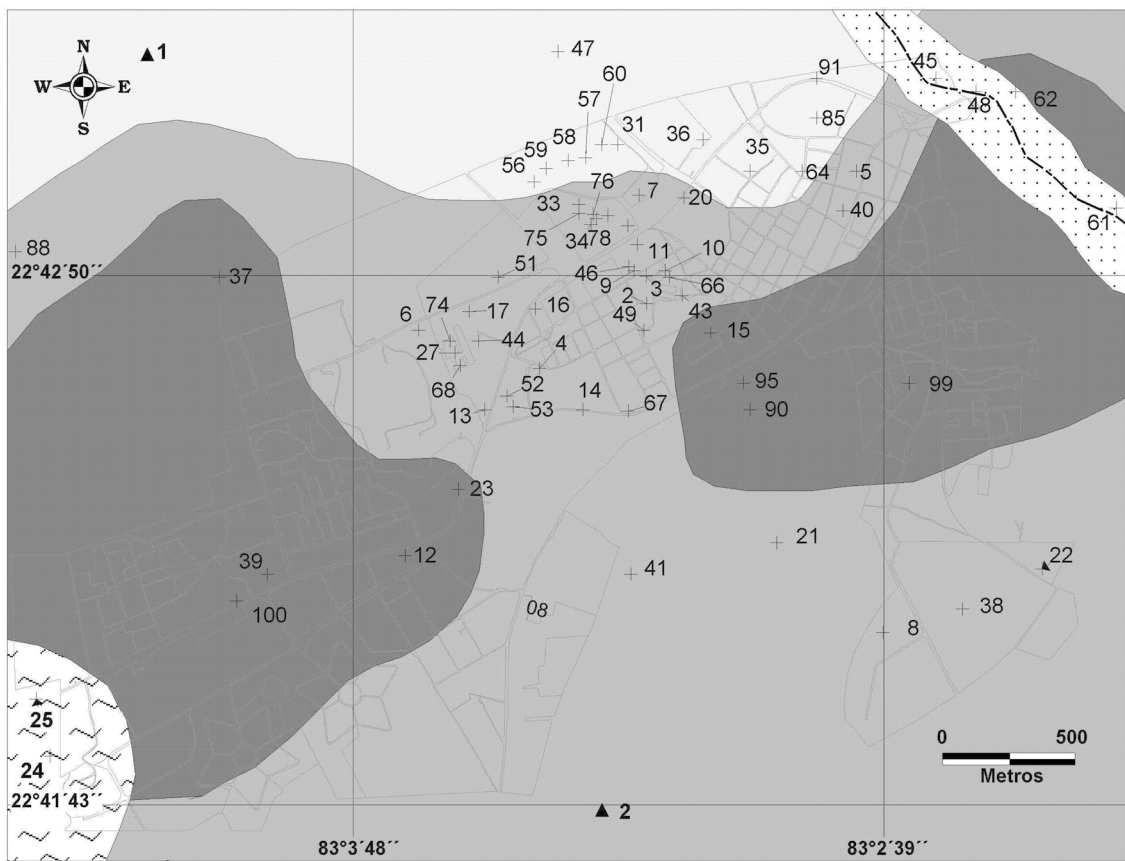
$$\Delta I = 1.67 \log \rho_0 V_0 / \rho_i V_i$$



Donde  $\rho_0$  y  $V_0$  son la densidad y la velocidad de las ondas transversales del suelo patrón respectivamente. Mientras que  $\rho_i$  y  $V_i$  son la densidad ponderada y la velocidad de ondas transversales equivalente para el corte estudiado. Consistentemente con el método empleado para determinar la intensidad regional, se consideró como suelo patrón a los terrenos S2 (arcillas carbonatadas). En

este caso de estudio, la profundidad de investigación se extiende hasta los 30 m. La velocidad de las ondas transversales hasta los primeros 30 metros ( $V_{s30}$ ) se define como:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}}$$



**LEYENDA**

- + Sondeos      ▲ Puntos de descripción (afloramientos)
- Río San Cristóbal
- Grupo litológico carbonatado del Neógeno. Alternancias de calizas, arcillas carbonatadas y margas fosilíferas. Supera los 50 m de espesor y subyace el grupo litológico aluvial marino del Plioceno- Pleistoceno inferior.
- Grupo litológico aluvial marino del Plioceno- Pleistoceno inferior. Arenas arcillosas, arcillas inorgánicas de baja compresibilidad. I: Potencia entre 20 y 40 m, II: Potencia entre 10 y 20 m y III: Potencia entre 7 y 10 m.
- Grupo litológico aluvial reciente. Arena y arenas gravosas con bajo contenido de arcilla. Espesores variables entre 5 y 25 m.

Figura 3. Mapa geológico-geotécnico de la localidad de San Cristóbal.  
 Figure 3. Geological-geotechnical map of the San Cristobal town.

Tabla 3. Descripción geotécnica (valor N, densidad natural y estimación empírica de Vs) de los grupos litológicos descritos en San Cristóbal.

Table 3. Geotechnical description (value N, natural density and empirical estimation of Vs) of lithologic groups, described in San Cristobal.

Grupo litológico	Medidas del valor-N (SPT)	Valor-N (SPT) promedio*	Media/mediana valor-N	Medidas de densidad natural	Densidad natural promedio* (g/cm <sup>3</sup> )	Media/mediana densidad húmeda	Vs (m/s)
Aluviales recientes	30	18	1.07	14	2.00	1.06	142
Aluvial marino del Plioceno-Cuaternario	1209	31	1.02	42	2.03	1.00	290
Carbonatado del Neógeno	81	34	1.04	15	2.07	1.02	345
Arcillas carbonatadas	-	-	-	-	2.30**	-	1070**
Roca intacta	-	-	-	-	-	-	-

\*El cálculo promedio de los valores se ha realizado ponderando el total de mediciones existentes.

\*\*Valores asumidos de trabajos precedentes.

Donde  $h_i$  y  $V_i$  son la potencia y la velocidad de las ondas transversales en cada uno de los niveles  $i$ , respectivamente.  $N$  es el número de estratos considerados en los treinta primeros metros.

#### 4. Resultados y discusión

##### 4.1. Caracterización geológico-geotécnica

De acuerdo con el análisis de las columnas litológicas y descripciones obtenidas en 67

sondeos, se establecieron 3 grupos litológicos, según se representa en la Figura 3:

Grupo litológico aluvial reciente: Estos depósitos se relacionan con las terrazas fluviales del Río San Cristóbal, constituidos por arenas poco arcillosas, arenas y gravas arenosas, de color carmelita con vetas grises, que clasifican, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Casagrande, 1948), como arenas arcillosas (SC) y gravas arcillosas (GC). Son sedimentos poco consolidados, como indica el bajo valor-N de 18 (Tabla 3 y Figura 4.B). El valor obtenido de Vs (~142

Tabla 4. Comparación de los rangos de valores de ondas S determinados en este trabajo, mediante las ecuaciones empíricas de Akin *et al.* (2011) con los ofrecidos en la literatura. Clasificación sísmica de los terrenos de San Cristóbal, según Lomtadze (1977) y las normas cubana NC 46: 1999 y española NCSE-02.Table 4. Comparison of the ranges of S-waves determined in the study, using the empirical equations of Akin *et al.* (2011) with those offered in the literature. Seismic classification of the lands of San Cristobal town, according Lomtadze (1977) and Cuban standards NC 46:1999 and Spanish NCSE-02.

Grupo litológico	Tipo de terreno Lomtadze (1977)	Tipo de terreno NC 46: 1999	Tipo de terreno NCSE-02	Vs (m/s) Lomtadze (1977)	Vs (m/s) NC 46: 1999	Vs (m/s) NCSE-02	Vs (m/s) Akin <i>et al.</i> (2011)
Aluviales recientes	IV	S3	IV	100-700	<240	<200	100-220
Aluvial marino del Plioceno-Cuaternario	V	S2	III	200-700	240-450	200-400	180-330
Carbonatado del Neógeno	V	S2	III	200-700	240-450	200-400	260-400
Arcillas carbonatadas	-	-	-	-	-	-	-
Intercalaciones de calizas y Margas	II	S1	I	400-3400	>800	>750	1070*

\* Valor asumido de trabajos precedentes.

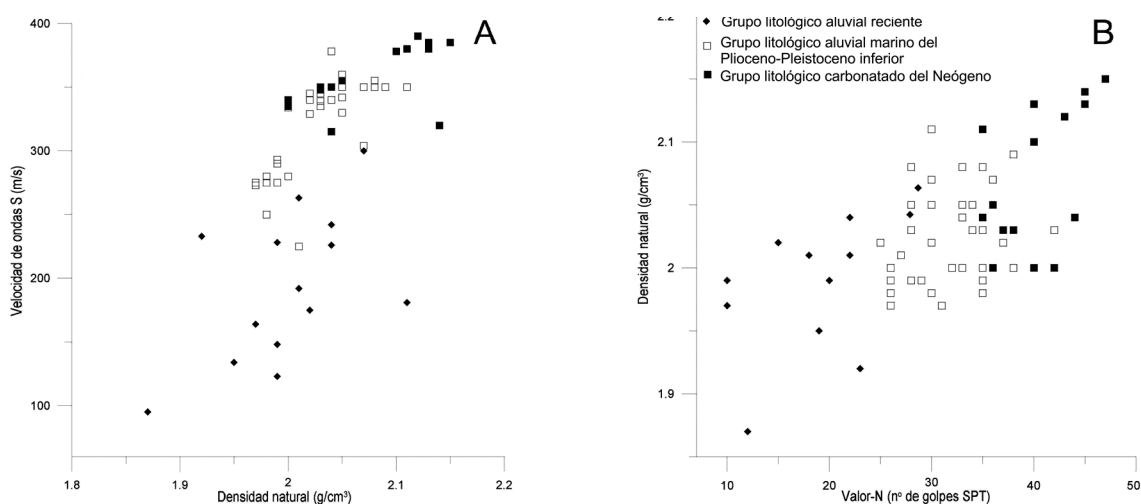


Figura 4. A. Relación entre la velocidad de ondas S y la densidad natural; B. Relación de la densidad natural y el valor-N, de los materiales estudiados, indicativos del grado de susceptibilidad sísmica de los suelos del pueblo de San Cristóbal.

Figure 4. A. Relationship between the S-wave velocity and the natural density; B. List of natural density and value-N of studied materials, indicative of the seismic susceptibility of soils in the San Cristobal town.

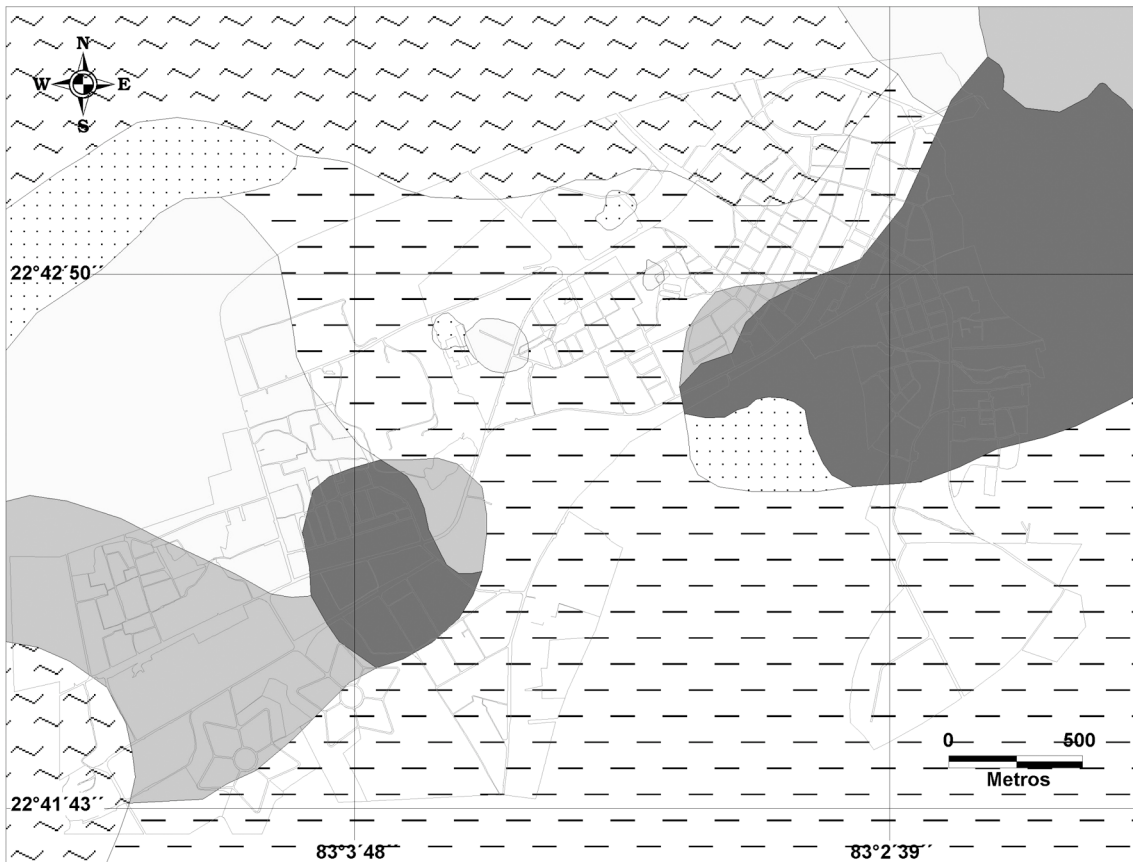
m/s), unido a sus características litológicas, le confiere a este grupo litológico, la categoría de terreno S3 o IV, según la norma cubana NC 46: 1999 y española NCSE-02 respectivamente (Tabla 4). La potencia de estos sedimentos oscila entre los 5 y 25 m, pudiendo alcanzar períodos dominantes superiores a 0.5 s.

En la Tabla 4, a modo de validación, se muestra una comparación de los rangos de velocidades de las ondas S; determinados en este trabajo mediante las ecuaciones empíricas de Akin *et al.* (2011) con los ofrecidos por Lomtadze (1977) y las normas cubana y española citadas anteriormente.

**Grupo litológico aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior:** La distribución espacial y potencia de estos suelos está muy bien definida (Figura 3). La mayor parte de la infraestructura de San Cristóbal descansa sobre este grupo litológico, yaciendo concordantemente sobre las rocas carbonatadas neógenas. Las arcillas, arcillas arenosas y arenas

arcillosas con gravas, son las litologías más representativas; las que clasifican por el SUCS, como arcillas inorgánicas de baja compresibilidad (CL), arcillas inorgánicas de alta compresibilidad (CH) y arena arcillosa (SC). El valor-N promedio es de 31 y la densidad natural de 2.03 g/cm<sup>3</sup>, con una relación media mediana de 1.02 y 1.00 respectivamente (Tabla 3 y Figura 4.A), mostrando un grado de incertidumbre prácticamente nulo (Terreno S2). La capacidad de amplificación sísmica para estos sedimentos, se incrementa en aquellos sitios con espesores superiores a los 30 m.

**Grupo litológico carbonatado del Neógeno:** Es el grupo litológico con menos afloración y nivel de estudio. Está representado petrográficamente por alternancias de calizas y margas fosilíferas, alcanzando espesores superiores a los 50 m. El techo del grupo, generalmente está meteorizado y lo conforman arcillas carbonatadas (CH según el SUCS) con fragmentos de calizas. El valor de Vs para la roca no meteorizada es de 1070 m/s, lo que



	Clase de suelo	Períodos dominantes	$\Delta I$ MSK
	1	>0.5 s	+0.5
	2	0.4 - 0.5 s	0
	3	0.3 - 0.4 s	0 a +0.5
	4	0.2 - 0.3 s	0
	5	0.1 - 0.2 s	0
	6	< 0.1 s	-1 a -0.5

Figura 5. Mapa de zonación sísmica, dividido en seis rangos de susceptibilidad a la amplificación sísmica, según los valores de períodos dominantes obtenidos empíricamente y su relación con los incrementos de intensidad macrosísmica.  
 Figure 5. Seismic zonation map, divided into six ranges of susceptibility to seismic amplification, according to the values of dominant periods, obtained empirically, and their relationship with the increases of macroseismic intensity.

correspondería a un material del tipo S1, en la clasificación de la norma cubana NC 46: 1999 y tipo I en la norma española NCSE-02. Los períodos dominantes son inferiores a 0.1 s, siendo los menos susceptibles a la amplificación sísmica.

#### 4.2. Susceptibilidad a la amplificación sísmica, según los valores de períodos dominantes

La evaluación de los espesores de sedimentos, el valor-N y la densidad natural, ha permitido hacer una primera división

Tabla 5. Situaciones geológicas-geotécnicas particulares para cada rango de período dominante y variación de intensidad sísmica.

Table 5. Particular geological-geotechnical conditions for each dominant period range and variation of seismic intensity.

Descripción del perfil litológico	Período dominante ( $T=4H/V_s$ )	Variación de la intensidad sísmica ( $\Delta I$ )
Corte conformado por suelos del grupo litológico Aluviales recientes o Aluvial marino del Plioceno-Cuaternario, hasta la profundidad de 30 m y en ocasiones hasta los 40 m aproximadamente. Las rocas carbonatadas del Neógeno aparecen como segunda capa.	>0.5 s	0.5
Grupo litológico aluvial marino del Plioceno-Cuaternario, hasta la profundidad de 25 m aproximadamente. Las rocas carbonatadas del Neógeno aparecen como segunda capa.	0.4 a 0.5 s	0
Suelos del Grupo litológico Aluvial reciente, con espesor de 15 m sobre las rocas carbonatadas del Neógeno.		0.5
Grupo litológico aluvial marino del Plioceno-Cuaternario compactos, hasta la profundidad de 25 m aproximadamente. Las rocas carbonatadas del Neógeno aparecen como segunda capa.	0.3 a 0.4 s	
Grupo litológico aluvial marino del Plioceno-Cuaternario, hasta la profundidad de 15 m aproximadamente. Las rocas carbonatadas del Neógeno aparecen como segunda capa.	0.2 a 0.3 s	0
Grupo litológico aluvial marino del Plioceno-Cuaternario, hasta la profundidad de 10 m aproximadamente. Las rocas carbonatadas del Neógeno aparecen como segunda capa.	0.1 a 0.2 s	0
Afloran los suelos aluviales marinos del Plioceno-Cuaternario con espesores inferiores a 10 m. Las rocas carbonatadas del Neógeno aparecen como segunda capa.	<0.1 s	-0.5
Corte conformado por las rocas del Grupo litológico carbonatado del Neógeno, con una potencia superior a los 50 m.		-1

geológico-geotécnica y formular las primeras valoraciones referentes a su comportamiento sísmico (Figura 5). Una vez determinada la potencia de los depósitos no consolidados y la  $V_s$  en cada sondeo, se pudo determinar el período dominante en cada punto. A partir de las relaciones empíricas empleadas, se determinaron seis clases de períodos dominantes (> 0.5; 0.4 a 0.5; 0.3 a 0.4; 0.2 a 0.3; 0.1 a 0.2 y <0.1 s) que responden a ocho situaciones geológico-geotécnicas (Tabla 5).

La clase 1 es la más proclive a la amplificación sísmica. Según su cartografía, se relaciona con los suelos del grupo litológico aluvial reciente y sus parámetros geotécnicos son los más desfavorables (Tabla 3; Figura 4.A y B). En esta clase, se incluyen también los suelos

aluviales marinos, cuando alcanzan espesores mayores o iguales a 30 m. Mientras la clase 6 es la menos susceptible, con el grupo litológico carbonatado del Neógeno en superficie o muy cerca de ella.

#### 4.3. Caracterización del efecto local, en función de la variación de la intensidad macrosísmica

Conocida la intensidad esperada en el pueblo de San Cristóbal (6-7 grados MSK), para un período de retorno de 50 años (Chuy, 2003) y el incremento de la intensidad, según el efecto de sitio, se pueden reajustar los valores de intensidad macrosísmica esperados en cada zona del pueblo. En este caso de estu-

Tabla 6. Tipos de estructuras constructivas y sus daños, según grados de intensidad sísmica MSK-64. Adaptado por los autores, a partir de Kárník *et al.* (1984), a las condiciones del área de estudio (N (%): Porcentaje de los daños, DC: Categoría de los daños, los valores subrayados son estimados complementarios).

Table 6. Types of building structures and their damages, according to degrees MSK-64. Adapted by the authors from Kárník *et al.* (1984) and applied to the conditions of the study area (N in %: Percentage of damages; DC: Category of damages; estimated underlines values are complementary).

Intensidad Macrosísmica MSK-64	Tipos de estructuras					
	A		B		C	
	N (%)	DC	N (%)	DC	N (%)	DC
V	95	0	100	0	100	0
	<u>45</u>	<u>0</u>	<u>95</u>	<u>0</u>	100	0
VI	50	1	5	1		
	5	2				
VII	<u>10</u>	<u>1</u>	<u>15</u>	<u>0</u>	<u>50</u>	<u>0</u>
	<u>35</u>	<u>2</u>	<u>35</u>	<u>1</u>	50	1
VIII	50	3	50	2		
	5	4				
	<u>10</u>	<u>2</u>	<u>10</u>	<u>1</u>	<u>10</u>	<u>0</u>
	<u>35</u>	<u>3</u>	<u>35</u>	<u>2</u>	<u>35</u>	<u>1</u>
	50	4	50	3	50	2
	5	5	5	4	5	3

dio, se obtienen cuatro valores de  $\Delta I$  (-1; -0.5; 0; y +0.5) en las 60 columnas litológicas, donde se efectuaron los cálculos.

Según la relación intensidad macrosísmica –estructuras constructiva– daños (Tabla 6) de Kárník *et al.* (1984), para intensidades entre 6 y 7 grados MSK, se pueden pronosticar daños de categoría 1 para el 50 % de construcciones de tipo A. Cartográficamente estos daños se esperan en edificaciones construidas sobre el grupo litológico aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior, con potencia entre los 10 y 20 m. Los daños esperados pudieran incrementarse en los sectores identificados con  $\Delta I = +0.5$  (Figura 5).

Mientras que los daños en las zonas con  $\Delta I = -1$  o  $-0.5$  serían mínimos, según la escala MSK, la categoría de los daños sería 0, el seísmo sería perceptible por las personas y animales, los objetos colgados se desplazarían. Este pronóstico se relaciona, con la infraestructura ubicada en aquellos sitios, donde las rocas carbonatadas del Neógeno afloran o están muy cerca de la superficie.

## 5. Conclusiones

La interpretación litológica de la red de sondeos, permitió la clasificación geológico-geotécnica de San Cristóbal en 3 grupos litológicos: Aluvial reciente, Aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior y Carbonatado del Neógeno. Esta división responde a la génesis, disposición de los materiales y a sus propiedades físicas.

Mediante la descripción litológica de cada sondeo y el valor-N de penetración estándar, se pudo obtener empíricamente la  $V_s$  para cada grupo litológico. Con estos datos, se estimó el período dominante (T) de cada terreno, definiéndose seis clases de períodos dominantes ( $> 0.5$ ; 0.4 a 0.5; 0.3 a 0.4; 0.2 a 0.3; 0.1 a 0.2 y  $< 0.1$  s). La clase 1 ( $T > 0.5$ ) es la más susceptible a la amplificación sísmica, representada por cortes aluviales recientes o aluviales marinos del Plioceno-Pleistoceno inferior muy potentes ( $> 30$  m).

Se obtienen cuatro rangos de  $\Delta I$  (-1; -0.5; 0 y +0.5) en los 60 sondeos, donde se efectua-

ron los cálculos. La zona correspondiente a un  $\Delta I$  de + 0.5, guarda relación espacial con la Clase 1 de períodos dominantes, confirmando la alta susceptibilidad sísmica de sus materiales. La delimitación geográfica de esta zona, es de gran utilidad para los ingenieros civiles y planificadores del territorio.

La susceptibilidad sísmica del grupo litológico aluvial reciente, en las zonas aledañas al valle del Río San Cristóbal, puede estar acompañada por el desarrollo de fallas y grietas de despegue en los bordes y escarpas de sus terrazas fluviales superiores.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), a la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y al Departamento de Geología de la Universidad de Pinar del Río de Cuba, y a los Institutos de Geofísica y de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, su apoyo a los trabajos de campo, ensayos de laboratorio y procesamiento de la información, durante los proyectos "Evaluación y conservación del macizo geológico con fines constructivos" y "Microzonación sísmica del pueblo de San Cristóbal". A los revisores anónimos la gratitud por sus valiosos comentarios y acertadas sugerencias durante el proceso de arbitraje científico.

### Bibliografía

- Akin, M.K.; Kramer, S.L.; Topal, T. (2011). Empirical correlations of shear wave velocity ( $V_s$ ) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey). *Engineering Geology*, 119, 1-17.
- Álvarez, L.; Chuy, T.; Cotilla, M. (1991). Peligrosidad sísmica de Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del territorio nacional. *Revista Geofísica*, 35, 125-150.
- Bard, P.Y. (1985). Les effets de site d'origine structurale: principaux résultats expérimentaux et théoriques. *Genie Parasismique* (V. Davidovici, ed.). Paris, 223-238.
- Biosca, L.; González, L.; Díaz, J.L.; De la Cruz, R.; Hernández, J.R.; Portela, A.; Blanco, P.; Rodríguez, M.; Magaz, A.R. (1986). Mapa geomorfológico de la provincia de Pinar del Río, a escala 1:250 000. *Reporte de Investigación del Instituto de Geografía*, 6, 37.
- Cabrera, J.; Guardado, R.; Peláez, R.; González, N. (2004). Regionalización hidrogeológica de la provincia de Pinar del Río en un SIG. *Minería y Geología*, 1-2, 26.
- Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. *American Society of Civil Engineers, Transactions*, 113, 901-991.
- Chuy, T.J.; González, B.E. (1982). Estimación de la peligrosidad sísmica del área de ubicación de la Refinería Cienfuegos. *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, 2, 136-156.
- Chuy, T.J. (1989). Isosistas de terremotos, 23 de enero de 1880. En: *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. Instituto Geográfico Nacional de España, Madrid, II.3.2.
- Chuy, T.J.; González, B.E.; Orbera, L. (1994). Seismicity and Seismic Hazard Assessment for Western Cuba. *Geología y Minería*, XI (3), 45-51.
- Chuy, T.J.; Alvarez, J.L. (1995). Peligrosidad sísmica de Cuba con fines de la Norma Sismorresistente Cubana. En: *Reporte de Investigación*. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, 24 pp.
- Chuy, T.J. (2000). Estimados de peligrosidad y microzonación sísmica de Cuba utilizando terremotos perceptibles. En: *Sismos perceptibles, peligro y vulnerabilidad sísmica en Cuba*. Academia, La Habana, 7-50.
- Chuy, T.J. (2002). Precisión por zonas de la peligrosidad sísmica de Cuba con fines de su desarrollo económico sostenible. En: *Nuevas Investigaciones Sismológicas en Cuba*. Academia, La Habana, 27-36.
- Chuy, T.J. (2003). Macrosísmica de Cuba: su aplicación en los estimados de peligrosidad sísmica. *Minería y Geología*, 1-2, 43-50.
- Cofiño, C. E.; Cáceres, D. (2003). Efectividad de la utilización de métodos microtectónicos en el desciframiento de la evolución de estructuras tectónicas (Falla Pinar). *Minería y Geología*, 3-4, 29-34.
- Cotilla, M. (1998). Una revisión de los estudios sismotectónicos en Cuba. *Estudios Geológicos*, 54, 129-145.
- Cotilla, M. (1999). Apuntes necesarios acerca de los acontecimientos sismológicos en Cuba. *Anales de geografía de la Universidad Complutense*, 19, 71-93.
- Cotilla, M.; Córdova, D. (2011). Study of the earthquake of the January 23, 1880, in San Cristóbal, Cuba and the Guane fault. *Física de la Tierra*, 6, 35-56.
- Cruz, R.; Sánchez, J.; Otero, R.; Gómez, J.E.; Sosa, C.; Fariñas, C.; Pérez, Y.; Mejías, L.; Rodríguez, O. (2007). Efectividad de la geomorfología aplicada en la precisión de fallas generadoras del relieve en la provincia Pinar del Río, Cuba. En: *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis, 2207-2213.
- Díaz, J.L.; Portela, H.A.; Blanco, P.; Magaz, A.R.; Hernández, J.R. (1986). *Los principios básicos de la clasificación morfoestructural del relieve cubano*. Academia, La Habana, 60 pp.
- Díaz, J.L.; Lilienberg, D.A. (1989). Nuevos datos sobre los movimientos tectónicos recientes en Cuba Oc-

- cidental. *Reporte de Investigación del Instituto de Geografía*, 4, 11 pp.
- González, B.E.; Arango, E.; Oliva, R.; Chuy, T.J.; Zapata, J.A.; García, J.; Rodríguez, V.; Serrano, M.; Ortega, L.; Pérez, L.D.; Llanes, C.; de la Rosa, A.L.; Ballagas, B. (1999). Past, present and perspective research on seismic microzoning in the cities of Santiago de Cuba and Havana. En: *Reports of the International Research Project "Join Study on Seismic Microzonation in Earthquake Countries"*. Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta, 24-56.
- González, B.E. (2006). Utilización de los mapas de microzonificación sísmica en el análisis de la vulnerabilidad y la evaluación del riesgo sísmico de áreas urbanas en Cuba. *Revista Facultad de Ingeniería UCV*, Caracas, 21 (4), 5-16.
- Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (1981). Hojas cartográficas 3584-II-d-2, 3584-II-d-3, 3584-II-d-5, 3584-II-d-6, a escala 1:10 000. La Habana, 4 hojas.
- Instituto de Geología y Paleontología (2004). Mapa geológico digital, Hoja Los Palacios 3583. Centro Nacional de Información Geológica, La Habana, 1 hoja.
- Kárník, V.; Schenkova, Z.; Schenk, V. (1984). Vulnerability and MSK scale. *Engineering Geology*, 20, 161-168.
- Lilienberg, D.A. (1973). Algunos problemas de la formación del relieve del archipiélago cubano. *Serie Espeleológica y Carsológica*, 48, 1-12.
- Lomtadze, V. D. (1977). *Geología aplicada a la ingeniería geodinámica*. Pueblo y Educación, La Habana, 350 pp.
- McGillavry, H.J. (1970). Geological history of the Caribbean. *Koninkl. Nederlandse Akad. v. Wetensch. Proc.*, 73, 64-96.
- Oficina Nacional de Normalización (1999). *Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción (Norma Cubana-46:1999)*. La Habana, 101 pp.
- Petrovski, J.T. (1980). Microzonación sísmica y problemas conexos. En: *Terremotos. Evaluación y mitigación de su peligrosidad*. Blume, 50-68.