

Modelación de parámetros geotécnicos como contribución a la zonación sísmica local: ciudad de San Cristóbal, Cuba

Alexis Ordaz-Hernández
Elmidio Estévez-Cruz
José Ramón Hernández-Santana
Tomás Jacinto Chuy-Rodríguez

Resumen

Los parámetros geotécnicos de los suelos (número de golpes del ensayo de penetración estándar, densidad natural, contenido de finos, límite líquido, humedad y el índice de plasticidad) intervienen en las ecuaciones empíricas para determinar la variación de la intensidad sísmica, la velocidad de ondas transversales, la susceptibilidad a la licuefacción, entre otros. Generalmente, se emplean valores promedios que caracterizan la formación geológica, o un complejo ingeniero geológico, lo que induce una gran incertidumbre. Este artículo propone un procedimiento para la estimación y modelación de los principales parámetros geotécnicos que inciden en la zonación sísmica local. El procedimiento consta de cuatro etapas: la elaboración de bases de datos, el análisis exploratorio de datos, la creación del modelo geológico 3D y, finalmente, la generación del modelo cuantitativo. La aplicación de esta metodología en la ciudad de San Cristóbal reveló valores bajos de densidad natural, lo que sugiere condiciones desfavorables de respuestas de los suelos frente a sismos.

Palabras clave: parámetros geotécnicos; zonación sísmica local; modelación

Geotechnical parameter modelling as a contribution to the local seismic zonation: San Cristóbal city, Cuba

Abstract:

The geotechnical parameters of soils (number of strokes of the standard penetration trial, natural density, content of fine material, liquid limit, humidity and plasticity index are included in the empirical equations to determine the variations of the seismic intensity, transversal waves, susceptibility to liquefaction, among others. Generally, average values are used to characterize the geological formation or geological engineering complex; which causes a great deal of uncertainty. This article proposes a procedure for estimating and modelling the main geotechnical parameters that have an impact on the local seismic zonation. The procedure is divided into 4 stages: the preparation of a data base, an exploratory analysis of data, the development of a 3D geological model and finally the production of a quantitative model. The application of this methodology in the city of San Cristóbal revealed low values of natural density which suggests unfavorable conditions of soils in relation to soil response to seismic activities.

Keywords: geotechnical parameters; local seismic zonation; modeling

1. INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica en Cuba Occidental se asocia 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, revelan la ocurrencia de seis sismos de gran intensidad, entre los que se encuentra el terremoto de ocho grados de intensidad MSK (6,0 Richter), en San Cristóbal, en el año 1880 (Cotilla 1999 & Chuy 1999, 2003).

La geología superficial de áreas urbanas influye en gran medida en el nivel de las sacudidas sísmicas, existiendo una marcada relación entre las propiedades geotécnicas de los suelos y su susceptibilidad sísmica. Según Youd & Perkins (1978), los materiales no consolidados suelen ser los responsables de importantes modificaciones en la amplitud de las sacudidas sísmicas y de efectos inducidos como la licuefacción.

La ciudad de San Cristóbal fue fundada en 1830 y en la actualidad supera los 20 000 habitantes. Su infraestructura se desarrolla sobre los materiales no consolidados de la cuenca cenozoica Los Palacios (Figura 1). Según Ordaz *et al.* (2011), estos sedimentos pueden alcanzar valores de periodo dominante (T) superiores a los 0,5 s e incrementos de la intensidad macrosísmica (ΔI) de 0,5.

Los elementos expuestos han motivado el estudio en detalle de las propiedades geotécnicas del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, objetivo de este trabajo. Para lo cual, se seleccionaron algunos parámetros vinculados a la estimación de la capacidad de oscilación de los suelos, durante un episodio sísmico; así como los que intervienen en la susceptibilidad a la licuefacción: número de golpes del ensayo de penetración estándar (NG-SPT), densidad natural (γ_f), contenido de finos (CF), límite líquido (LL), índice de plasticidad (IP) y la humedad natural (W).

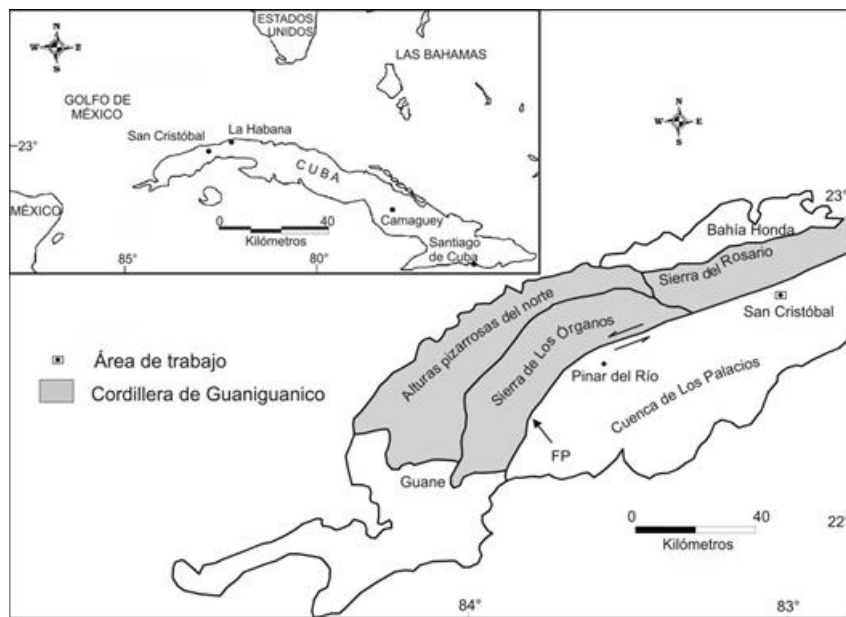


Figura 1. Ubicación geográfica de la ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental.

Los parámetros citados han sido utilizados, en mayor o menor medida, en los estudios de zonificación sísmica en Cuba (González & Kogan 1987; Chuy 1988; González *et al.* 1989; González 1991; Zapata 1996; González & Pérez 2000; entre otros); sin embargo, pocas veces se ha estudiado el comportamiento espacial de cada uno, en los casos de estudios citados. Tomando como punto de partida esta necesidad, en este trabajo se propone un procedimiento para la modelación de los parámetros físico-mecánicos, fundamentalmente aplicable a aquellos con incidencia en la respuesta de los suelos frente a sismos. Este resultado ofrece consistencia al uso de ecuaciones empíricas, que lleva implícito el empleo de las propiedades físico-mecánicas del suelo.

1.1. Condiciones geológicas locales

De acuerdo al análisis de las columnas litológicas y descripciones obtenidas en 77 puntos de documentación ingeniero-geológicas, para la ciudad se establecen tres conjuntos faciales genéticos (CFG), según se representa en la Figura 2:

- Conjunto facial genético 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), como arenas arcillosas (SC) y gravas arcillosas (GC). Son sedimentos poco consolidados, como indica el bajo valor del NG-SPT de 18 (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción geotécnica de los conjuntos faciales genéticos descritos en la ciudad de San Cristóbal, donde se incluye: valor del número de golpes del ensayo de penetración estándar (NG-SPT) y densidad natural (Ordaz *et al.* 2011)

Conjunto facial genético	Medidas del valor NG-SPT	Valor NG-SPT promedio *	Media/mediana Valor NG-SPT	Medidas de densidad natural	Densidad natural promedio * (g/cm ³)	Media/mediana densidad húmeda	
(1)	30	18	1,07	14	2,00	1,06	
(2)	1 209	31	1,02	42	2,03	1,00	
(3)	(3A)	81	34	1,04	15	2,07	1,02
	(3B)	-	-	-	-	2,30	-

(1) Aluvial reciente; (2) Aluvial marino del Plioceno-Cuaternario; (3) Carbonatado del Neógeno; (3A) Arcillas carbonatadas, (3B) Roca intacta. *El cálculo promedio de los valores se ha realizado ponderando el total de mediciones existentes.

- Conjuntos facial genético aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior: La distribución espacial y potencia de estos suelos está muy bien definida (Figura 2). La mayor parte de la infraestructura de San Cristóbal descansa sobre este CFG, 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 del NG-SPT promedio es de 31 y la densidad natural de 2,03 g/cm³, con una relación media mediana de 1,02 y 1,00, respectivamente, mostrando un grado de incertidumbre prácticamente nulo (Tabla 1).

- Conjuntos facial genético del Neógeno: El de menos 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.

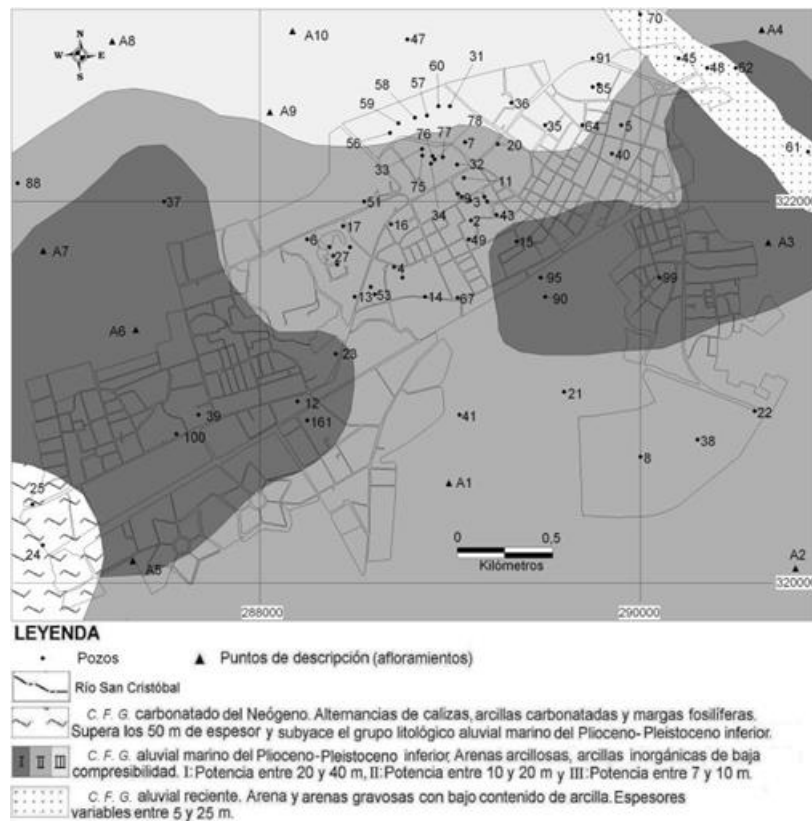


Figura 2. Esquema ingeniero-geológico de la ciudad de San Cristóbal, escala original 1: 10 000 (Ordaz *et al.* 2011).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La información geotécnica se obtuvo de los informes técnicos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, donde se emplearon las técnicas de sondeos de penetración estándar y perforación rotaria. En la Tabla 2 se muestran los parámetros geotécnicos utilizados; así como su aplicación a los estudios de susceptibilidad sísmica.

Tabla 2. Relación de parámetros geotécnicos más empleados en los estudios de efectos de sitio

Parámetro geotécnico	Aplicación al efecto de sitio ante un terremoto	Investigador(es)
(N-SPT) Número de golpes obtenido en el ensayo de penetración estándar	Estimación de velocidad de ondas transversales	Hasançebi & Ulusay (2007); Hanumantharao & Ramana (2008); Dikmen (2009); Akin <i>et al.</i> 2011; entre otros
	Cálculo del valor normalizado del ensayo de penetración estándar $(N_1)_{60}$	Seed & Idriss (1971), modificado en el 2001 por Youd & Idriss (2001)
(γ_f) Densidad natural	En la estimación del módulo de cortante para pequeñas deformaciones	Andrus & Stokoe (2000)
	Estimación de la variación de intensidad sísmica	Medvedev (1962) y Petrovski (1980)
(CF) Contenido de finos	Criterios de susceptibilidad a la licuefacción	Andrus & Stokoe (2000) y Brandes (2003)
(LL) Límite líquido	Criterios de susceptibilidad a la licuefacción	Wang (1979) y Brandes (2003)
(IP) Índice de plasticidad	Criterios de susceptibilidad a la licuefacción	Seed <i>et al.</i> (2003)
(W) Humedad	Criterios de susceptibilidad a la licuefacción	Seed <i>et al.</i> (2003) y Henríquez (2007)

2.1. Procedimiento

Para la modelación de los parámetros geotécnicos se sugiere el siguiente procedimiento:

- a. Elaboración de bases de datos. La modelación espacial de los parámetros seleccionados (Tabla 2), demandó la elaboración de una base de datos, específica para este fin, la cual incluye: Coordenadas Lambert de la boca del pozo (X, Y y Z), profundidad y el valor del parámetro estudiado en las diferentes profundidades.
- b. Análisis exploratorio de datos (AED). El AED consiste en estudiar el comportamiento estadístico de las distintas variables en el conjunto facial genético u otra unidad geológica que lo integre.

El análisis estadístico se inicia con el estudio de la distribución de frecuencia, la cual indica cómo se distribuyen las muestras en intervalos regulares de los posibles valores. Posteriormente, se construyen los histogramas y gráficos de frecuencia acumulativa. Del estudio y análisis de los histogramas se obtienen las conclusiones sobre el tipo de distribución que siguen los datos, la presencia de valores anómalos y la posible existencia de poblaciones complejas (bimodalidad o multimodalidad). Esta etapa es de suma importancia, pues facilita la toma de decisiones acerca de las posibles técnicas de interpolación que se deben usar en el momento de la estimación. Esta etapa incluye el estudio y cuantificación de la variabilidad espacial de los parámetros de interés, a través de la variografía.

- c. Creación del modelo geológico 3d. El éxito en el pronóstico del comportamiento espacial de un parámetro geotécnico no está relacionado directamente con el método de estimación empleado, sino con la correcta aplicación de los principios geológicos. Tener nociones sobre la continuidad de los estratos y la variabilidad de los parámetros geotécnicos es, sin dudas, la principal tarea. Aunque la ciudad de San Cristóbal (caso de estudio) se ubica sobre condiciones geológicas supuestamente simples de cuencas sedimentarias, en ella confluyen diferentes tipos genéticos de suelo y estos, a su vez, pueden clasificar en una amplia gama de acuerdo con su granulometría u otras características. En estas condiciones, se recomienda subdividir el macizo geológico en subpoblaciones, que cumplan o se aproximen a la hipótesis de estacionalidad. En este caso, se subdividió el área en tres conjuntos faciales genéticos: aluvial reciente, aluvial marino del Plioceno-Cuaternario y el carbonatado del Neógeno. Posteriormente, con el empleo de software Rockworks 2006 y de la base de datos, se genera un modelo geométrico tridimensional. En este caso, aplicando el método de las superficies (Houlding 1994 y Sides 1997). Este método se fundamenta en la generación de dos planos que limitan los cuerpos geológicos por la parte superior e inferior (techo y piso del estrato). Posteriormente, las superficies generadas son modeladas empleando el algoritmo de TIN (redes irregulares de triángulos). Los puntos (X, Y y Z) que yacen en las distintas superficies se extraen automáticamente de la base de datos.
- d. Creación del modelo cuantitativo. En esta etapa se estiman, en los bloques elementales que cubren el modelo geométrico

generado, los principales parámetros geotécnicos, empleando los métodos de estimación geoestadísticos (kriging ordinario). El proceso de interpolación se realizó en el software SGeMS. Finalmente, se pueden construir perfiles y vistas en plantas donde se visualizan los resultados del modelo.

3. RESULTADOS

Siguiendo la secuencia descrita, se obtienen los modelos matemáticos que caracterizan la variabilidad espacial de los parámetros seleccionados (Tabla 3). La estimación se limitó a los primeros 15 m del corte, donde se concentra la mayor cantidad de muestras.

Tabla 3. Modelos matemáticos de la variabilidad espacial utilizados en la estimación de los parámetros geotécnicos por kriging ordinario. San Cristóbal, Cuba

Parámetro geotécnico	Modelo matemático
NG-SPT	$Y_{(h)}=15+174sph(150, 150, 7)$
Contenido de finos	$Y_{(h)}=90exp(70, 70, 10)+135exp(224, 224, 10)$
Humedad	$Y_{(h)}=3exp(160, 160, 6)+5,5exp(205, 205, 168)$
Índice de plasticidad	$Y_{(h)}=1+10exp(211, 211,16)+31exp(393, 393, 90)$
Densidad	$Y_{(h)}=0,0005+0,001exp(15, 15, 4)+0,004exp(750, 750, 109)$
Límite liquido	$Y_{(h)}=5+78sph(78, 78, 13)$

La modelación de los parámetros geotécnicos estudiados permite listar un grupo de regularidades en su comportamiento, las que pueden influir en la susceptibilidad sísmica del macizo geológico y en la ocurrencia de fenómenos inducidos:

3.1. Regularidades generales

Los sedimentos correspondientes a la formación Guane (Conjuntos facial genético aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior), son los de mayor aflorabilidad y al mismo tiempo los más estudiados geotécnicamente en la ciudad de San Cristóbal. Los histogramas confeccionados para los seis parámetros geotécnicos muestran una distribución simétrica de los datos, lo que permitió aplicar los métodos de la geoestadística lineal (kriging ordinario) para la estimación espacial de cada variable (Figura 3). El análisis (histograma) del contenido de fino para esta formación geológica muestra dos poblaciones de datos, sugiriendo una facie arcillosa y otra arenosa.

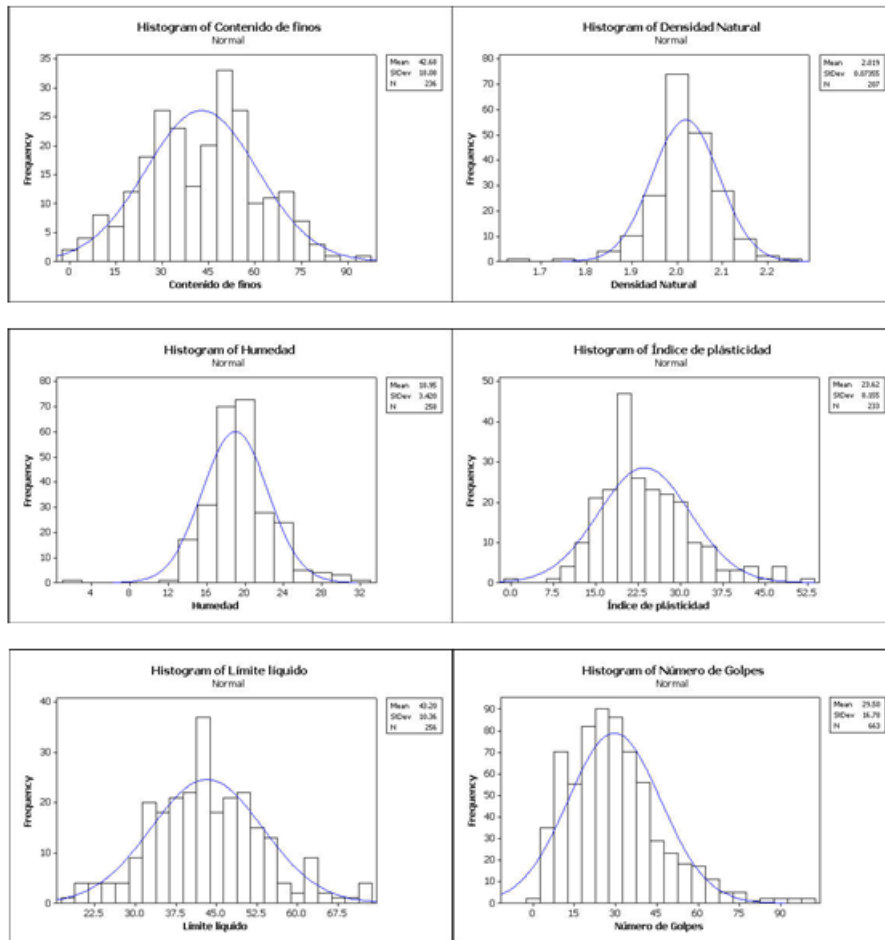


Figura 3. Histogramas obtenidos para seis parámetros geotécnicos con incidencia en la peligrosidad sísmica local, ciudad de San Cristóbal, Cuba.

3.2. Regularidades específicas

La variable NG-SPT es la de menor varianza kriging, lo que ofrece menor incertidumbre en sus estimaciones (Figura 4). Los valores NG-SPT inferiores a 10 son muy poco representativos. De interés por su representatividad e influencia en la respuesta sísmica se puede considerar los comprendidos en el intervalo de 10 a 20 golpes (de la cota 48 a la 52), ubicados hacia el centro del área (Figura 5).

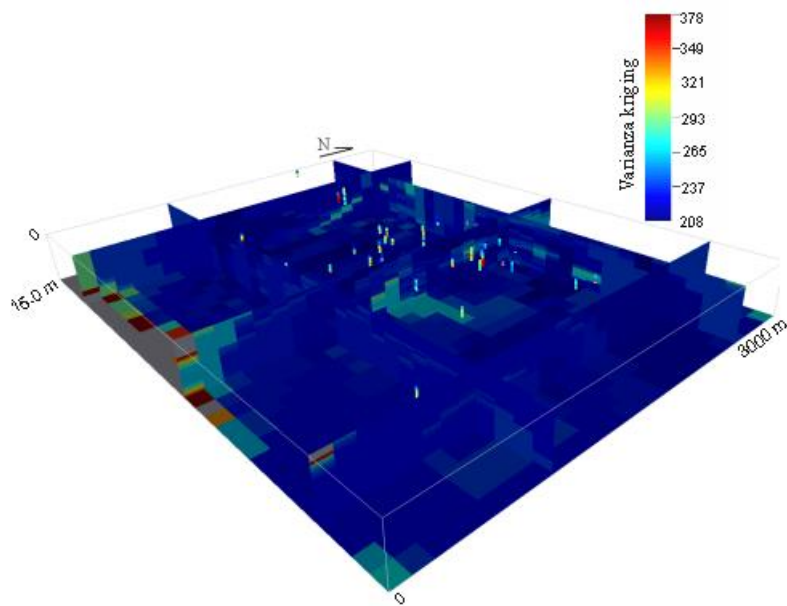


Figura 4. Varianza kriging para el estimado del número de golpes del ensayo de penetración estándar.

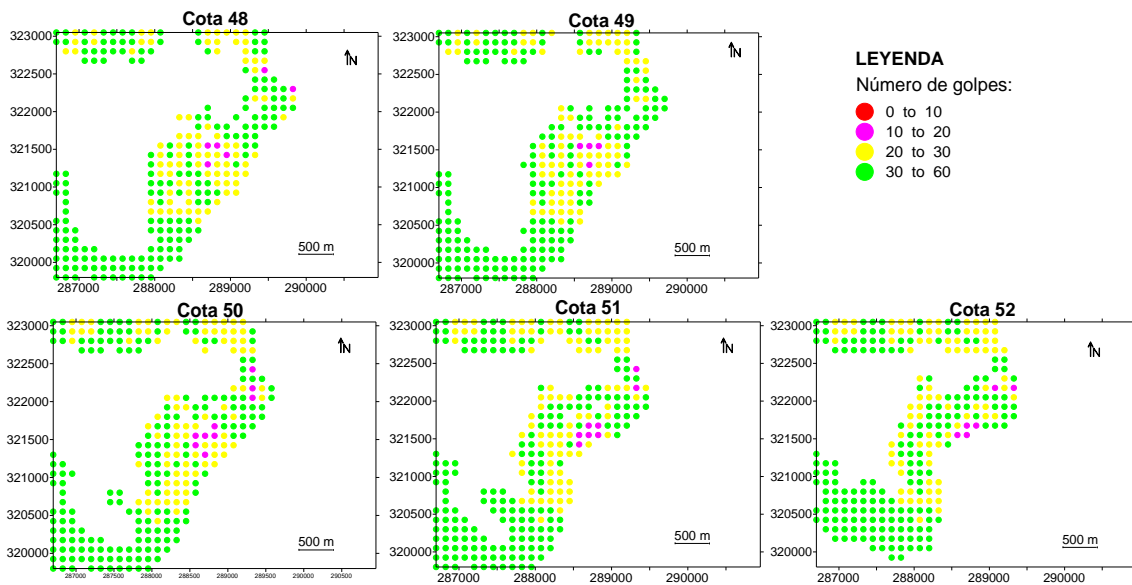


Figura 5. Comportamiento del número de golpes en algunas cotas de la ciudad de San Cristóbal.

Para la ciudad de San Cristóbal se evidencian valores bajos de densidad (inferiores a $2,0 \text{ g/cm}^3$) en casi la totalidad de las cotas analizadas. Se debe resaltar la coincidencia espacial de valores inferiores a $2,0 \text{ g/cm}^3$ con NG-SPT entre 10 y 20, en un área de $0,12 \text{ km}^2$, entre las cotas 48 y 52 (Figura 6).

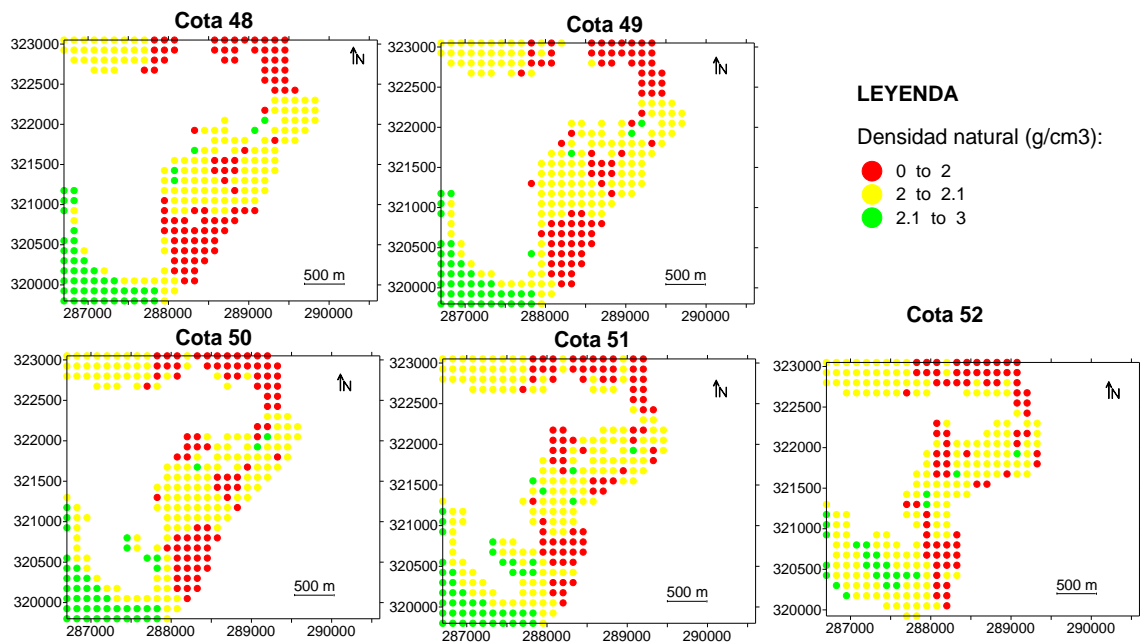


Figura 6. Comportamiento de la densidad natural en algunas cotas de la ciudad de San Cristóbal.

El contenido de fino es uno de los parámetros que define la clasificación de los suelos; permite discriminar entre un suelo de grano grueso o de grano fino. Los suelos enriquecidos en fracción fina son menos susceptibles a licuar. A partir de la modelación del comportamiento de este parámetro, se puede delimitar áreas con contenidos de finos relativamente bajos (5 % a 35 %) en casi la totalidad de las cotas analizadas. En este sentido, la distribución de suelos con límite líquido (LL) bajo está muy restringida y se localiza fundamentalmente entre las cotas 42 y 44. Esta poca ocurrencia de sedimentos con bajo LL puede sugerir una baja susceptibilidad a la licuefacción. Según los criterios de Wang (1979) y Brandes (2003), los suelos con LL inferiores al 32 % y bajos contenidos de finos pueden ser susceptibles a la licuefacción en caso de sismos.

La humedad (W) es un parámetro de poca variación en la ciudad, donde predominan humedades entre 17 % y 23 % en las cotas analizadas (de la cota 40 a la 60). El índice de plasticidad (IP) varía notablemente, aunque entre las cotas 40 y 45 m sobre el nivel medio del mar, se aprecia un predominio del IP entre el 12 % y el 20 %. Ambas variables (W e IP) se utilizan para establecer aproximaciones sobre las posibilidades de licuefacción (Seed *et al.* 2003 y Henríquez 2007), según estos criterios el análisis debe llevar implícito el comportamiento del límite líquido.

4. DISCUSIÓN

La profundidad de investigación es un elemento importante en la modelación de las propiedades físico-mecánicas, con incidencia en la zonación sísmica local. Internacionalmente se sugiere una profundidad de investigación de 30 m, fundamentalmente para la estimación de la amplificación de las ondas sísmicas en el medio (Borcherdt *et al.* 1991; *Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering* 1999; entre otros). Este trabajo parte del aprovechamiento de los resultados de ensayos geotécnicos y descripciones contenidas en los archivos afines en Cuba, dichos resultados se concentran fundamentalmente en los primeros 15 m; lo que indudablemente constituye una limitante. Sin embargo, la citada información de archivo, en el caso cubano, puede ser perfectamente utilizada fundamentalmente en dos direcciones:

(a) Definir áreas susceptibles a la licuefacción. Este fenómeno inducido es prácticamente exclusivo de los primeros 15 m (Tuttle *et al.* 1990; González de Vallejo 2002 y Seed *et al.* 2003).

(b) En el análisis de la susceptibilidad frente a deslizamientos inducidos. Básicamente en la estimación de las propiedades geomecánicas de los materiales (densidad, cohesión, ángulo de fricción interna, humedad, etc.).

En general, la modelación de las propiedades físico-mecánicas de los suelos, constituye una herramienta de rigor, fundamentalmente aplicable a la solución de fenómenos geotécnicos en las capas superficiales. Además, permite definir el grado de incertidumbre (varianza kriging) de los resultados obtenidos.

5. CONCLUSIONES

1. La modelación de parámetros geotécnicos ofrece consistencia a los métodos cuantitativos aplicados a la evaluación de la susceptibilidad sísmica local, y es de viable aplicación en otras ciudades cubanas que cuenten con un alto nivel de estudio geotécnico.
2. Los bajos valores de densidad natural, para el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, sugieren condiciones desfavorables de respuestas de los suelos frente a sismos.
3. La modelación del contenido de finos, límite líquido, humedad y el número de golpes del ensayo de penetración estándar, indican poca ocurrencia de sedimentos susceptibles a licuar.

6. REFERENCIAS

- 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.
- ANDRUS, R. D. & STOKOE, K. H. 2000: A Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(11): 1 015-1 025.
- BRANDES, H. G. 2003: *Geotechnical and Foundation Aspects*. University of Haway, Honolulu [Handbook], 1-61.
- BORCHERDT, R. D.; WENTWORTH, C. M.; JANSSEN, A.; FUMAL, T. & GIBBS, J. 1991: Methodology for predictive GIS mapping of spatial study zones for strong ground shaking in the San Francisco Bay Region, CA. En: 4th International Conference on Seismic Zonation, p. 5-552.
- CHUY, T. J. 1988: Influencia de las condiciones geológicas en la intensidad sísmica de Santiago de Cuba. *Movimientos Tectónicos Recientes de Cuba* 2: 46-63.
- CHUY, T. J. 1999: *Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica*. Tesis doctoral. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Santiago de Cuba. 178 p.
- CHUY, T. J. 2003: Macrosísmica de Cuba: su aplicación en los estimados de peligrosidad sísmica. *Minería y Geología* (1-2): 43-50.
- COTILLA, M. 1999: Apuntes necesarios acerca de los acontecimientos sísmológicos en Cuba. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 19: 71-93.
- DIKMEN, U. 2009: Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering* 6: 61-72.
- GONZÁLEZ, B. E. & KOGAN, L. A. 1987: Estimación del grado base para el suelo patrón de la ciudad de Santiago de Cuba. Resultados de las Investigaciones de los Proyectos Geofísicos Internacionales. *Investigaciones Sismológicas* 10: 1-18.
- GONZÁLEZ, B. E.; MIRZOEV, K.; CHUY, T. J.; GOLUBIATNIKOV, V. L.; LYSKOV, L. M. & ZAPATA, J. A. 1989: Microzonación sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba. Comunicaciones científicas sobre Geofísica y Astronomía. La Habana, 1-14.
- GONZÁLEZ, B. E. 1991: *Estimación del efecto sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba*. Tesis doctoral. Instituto de Geofísica y Astronomía. La Habana. 170 p.

- GONZÁLEZ, B. E. & PÉREZ, L. D. 2000: Escenarios de peligro sísmico y de fenómenos geotécnicos asociados en municipios urbanos de la ciudad de La Habana. En: 2^{do} Taller de Mitigación y Prevención de Desastres-UNAICC, La Habana, 1-14.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I. 2002: *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. 744 p.
- HANUMANTHARAO, C. & RAMANA, G. V. 2008: Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India. *Journal of Earth System Science* 117: 719-730.
- HASANÇEBI, N. & ULUSAY, R. 2007: Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66: 203-213.
- HENRÍQUEZ, C. 2007: *Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 600 p.
- HOULDING, S. W. 1994: *3D Geoscience Modelling*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Hong Kong, 309 p.
- MEDVEDEV, S. V. 1962: Engineerin seismology. Israel Program for Scientific Translation. Jerusalem. 1-31.
- ORDAZ, A.; CHUY, T. J.; HERNÁNDEZ-SANTANA, J. R. & GARCÍA, J. A. 2011: División geológico-geotécnica aplicada a la zonación sísmica urbana: San Cristóbal, Cuba Occidental. *Cuaternario y Geomorfología* 26(1-2): 89-104.
- PETROVSKI, J. T. 1980: Microzonación sísmica y problemas conexos. En: *Terremotos. Evaluación y mitigación de su peligrosidad*. Ed. UNESCO, Blume, 50-68.
- SEED, H. B. & IDRIS, I. M. 1971: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Jl. Soil Mech. F. Div. ASCE* 97 SM 7.
- SEED, R. B.; CETIN, K. O.; MOSS, R. E.; KAMMERER, A. M.; WU, J.; PESTANA, J. M.; RIEMER, M. F.; SANCIO, R. B.; BRAY, J. D. & FARIS, A. 2003: Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. En: 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation, H.M.S. Queen Mary, Long Beach, California: 1-72.
- SIDES, E. J. 1997: Geological modelling of mineral deposit for prediction in mining. *Geol Rundsch* 86: 342-353.
- TECHNICAL COMMITTEE FOR EARTHQUAKE GEOTECHNICAL ENGINEERING, TC4. 1999: Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. The Japanese Geotechnical Society, 219 p.

- TUTTLE, M.; LAW, K. T.; SEEBER, L. & JACOB, K. 1990: Liquefaction and Ground Failure Induced by the 1988 Saguenay, Quebec, Earthquake. *Canadian Geotechnical Journal* 27: 580-589.
- WANG, W. 1979: Some Findings in Soil Liquefaction, Research Report, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, 1-20.
- YOUNG, T. L. & IDRISSE, I. M. 2001: Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127: 297-313.
- YOUNG, T. L. & PERKIN, M. D. 1978: Mapping of liquefaction induced ground failure potential. *Journal of Geology Engineering* 104(4): 433-446.
- ZAPATA, J. A. 1996: *Utilización de variantes metodológicas de microzonación sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba*. Tesis doctoral. CENAIIS, Santiago de Cuba. 111 p.

Alexis Ordaz-Hernández. alexisordaz@geo.upr.edu.cu
Máster en Geología. Profesor Asistente.
Universidad de Pinar del Río, Cuba.

Elmidio Estévez-Cruz. estevez@geo.upr.edu.cu
Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular.
Universidad de Pinar del Río, Cuba.

José Ramón Hernández-Santana. santana@igg.unam.mx
Doctor en Ciencias Geográficas. Investigador Titular A.
Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.

Tomás Jacinto Chuy-Rodríguez. chuy@cenais.cu
Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular.
Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Cuba.