

Metodología para la modelación geológica 2D de la ciudad de Santiago de Cuba

Methodology for 2D geological modeling of Santiago de Cuba city

Zulima Rivera-Alvarez^{1*}, Julio García Peláez², Dario Slejko³, Ángel Medina⁴, Yamila Torres⁵, Gilberto Quevedo Sotolongo⁶

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba

²GEM Foundation, c/o EUCENTRE, Pavia, Italy.

³Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste, Italy.

⁴Oficina Nacional de Recursos Minerales, Santiago de Cuba, Cuba.

⁵División de Estudios Ambientales, Empresa GEOCUBA Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba

⁶Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales. Facultad de Construcciones de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba

*Autor para correspondencia: zuli@cenais.cu

Resumen

Se propone una metodología para la obtención de un modelo geológico 2D, a escala 1:25 000, en la ciudad de Santiago de Cuba. El modelo tiene como fin la futura modelación del suelo y el cálculo del efecto de sitio, sobre la base de 61 perfiles geológicos calibrados con información geológica, geotécnica, morfológica, geofísica, tectónica y sísmica. Los perfiles cruzan toda la ciudad en una malla regular de 500 x 500 m. En campañas de mediciones geofísicas se obtuvieron los valores de velocidad longitudinal y de corte (V_p, V_s) para cada tipo de material predominante. Este modelo posibilitará una mejor interpretación de la evolución geológica de la cuenca y de su estratigrafía. Toda la información está recopilada en bases de datos y los resultados están soportados en un sistema de información geográfica (ArcGis 10).

Palabras clave: modelación 2D; perfiles geológicos; estratigrafía.

Abstract

To obtain a 2D geological model in Santiago de Cuba city, a methodology was proposed (1:25 000 scale). The aim of the model is the site effect calculation and modeling soil, based on 61 geological profiles calibrated with geological, geotechnical, and morphological, geophysical, tectonic and seismic information. Profiles cross the entire city in a regular 500 x 500 m mesh. The longitudinal and cutting velocity values (V_p , V_s) were obtained in geophysical measurement campaigns for each kind of predominant material. This model allows interpreting the fault trough and its stratigraphy better. All information is collected in databases and results are supported in a geographic information system (ArcGis 10).

Keywords: 2D geological modeling; geological profiles; stratigraphy.

1. INTRODUCCIÓN

El territorio cubano se encuentra en el límite entre la microplaca de Gonave y la placa Norteamericana. La ciudad de Santiago de Cuba, localizada en la parte más oriental de la isla, muy próxima a la zona de falla Oriente (ZFO), presenta las principales características tectónicas del límite de placas en la región oriental de Cuba (Figura 1).

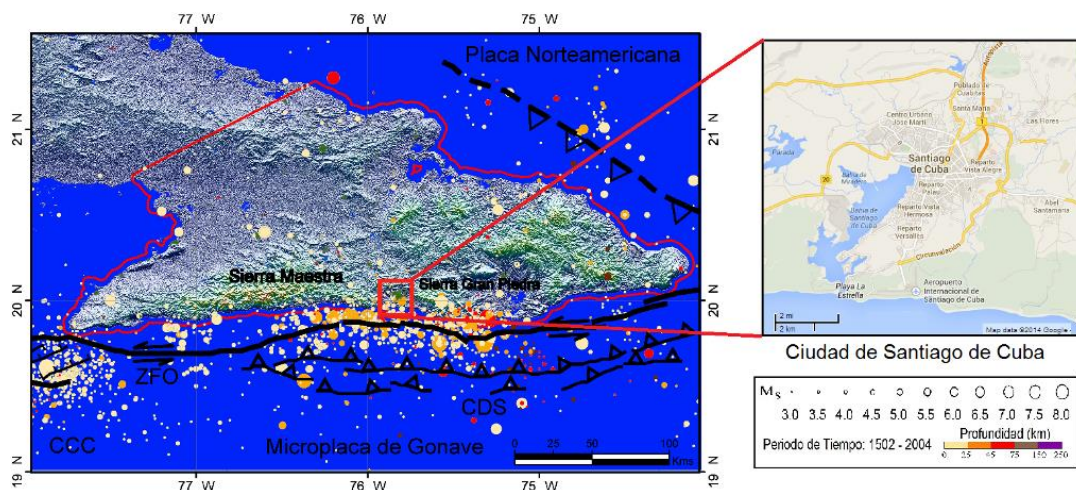


Figura 1. Sismicidad y cuadro sismo tectónico de Cuba Oriental. Principales características tectónicas del límite de placas: ZFO, Zona de Falla Oriente; CCC, Cuenca de Cabo Cruz, CDS, Cinturón deformado de Santiago (CDS). Los círculos coloreados representan los epicentros de terremotos con magnitud $M \geq 3,0$ (García 2007).

La región suroriental es la más activa tectónicamente de todo el país, con una elevada actividad sísmica asociada, donde se localizan los terremotos con mayores valores de magnitud e intensidad.

La mayor extensión de la ciudad se enmarca en la cuenca de Santiago de Cuba, su relieve es semimontañoso y su principal accidente geográfico, la bahía; estas características la definen como una cuenca cerrada donde predominan, fundamentalmente, en sus primeros estratos, sedimentos del Neógeno y Cuaternario, tales como arenas, gravas, arcillas, areniscas y margas. El lecho rocoso está formado por rocas volcánicas y vulcanógeno sedimentarias de edad Paleógeno.

Numerosas fallas atraviesan la ciudad, por lo que pueden ocasionar incrementos en la actividad sísmica, en dependencia del tipo de suelo presente, de la profundidad del nivel freático y su geomorfología, y provocar daños a las estructuras en la superficie. Además, existen zonas susceptibles a fenómenos físico-geológicos como son los deslizamientos y la licuefacción, procesos erosivos (fluvial y marino), la meteorización y el carso. Todos estos factores favorecen el incremento de movimientos sísmicos con los consecuentes daños a los habitantes y las construcciones.

Por estas razones, desde hace varios años se han llevado a cabo diversos estudios geológicos, geotécnicos, morfológicos, geofísicos, tectónicos y sismológicos (Pérez, García y Cañete 1994; González 1997; Medina *et al.* 1999; Fernández *et al.* 2000; Zapata 2000; Rivera 2000; Rivera *et al.* 2004; Álvarez *et al.* 2004, 2013; Biescas, Rivera y Zapata 2005; García 2007; Arango *et al.* 2009), encaminados a la correcta determinación de la peligrosidad sísmica, microzonificación sísmica y respuesta de sitio, a partir del análisis del corte geológico, tipo de suelo, propiedades y la amplificación que estos puedan tener. Todos estas investigaciones intentan evitar que ante un terremoto de gran intensidad se produzca el fenómeno de resonancia suelo-estructura y se ocasionen daños en las edificaciones y la población circundante, minimizando de esta manera el riesgo sísmico y con ello las víctimas fatales.

El objetivo de este trabajo fue obtener un modelo geológico 2D de la ciudad de Santiago de Cuba, para la futura modelación bidimensional del movimiento del terreno. Para este propósito se establece un procedimiento metodológico a partir de la información disponible.

1.1. Descripción geológica de la cuenca de Santiago de Cuba

La cuenca de Santiago de Cuba constituye una depresión que divide el sistema montañoso de la Sierra Maestra en dos grandes sectores claramente diferenciados: la Sierra de la Gran Piedra al este y la Sierra Maestra al oeste; esta depresión constituye un bloque tectónico independiente, el bloque Santiago (Pérez, García y Cañete 1994), el cual limita al este con el bloque Gran Piedra y al oeste con el bloque El Cobre (Figura 1). El área de estudio

está atravesada por numerosas fallas normales y de *strike-slip*, geológicamente activas, de edad muy reciente, que cortan la cuenca en diferentes direcciones.

La ciudad ocupa casi toda la extensión de la cuenca y presenta poca complejidad litológica (Figura 2, Tabla 1).

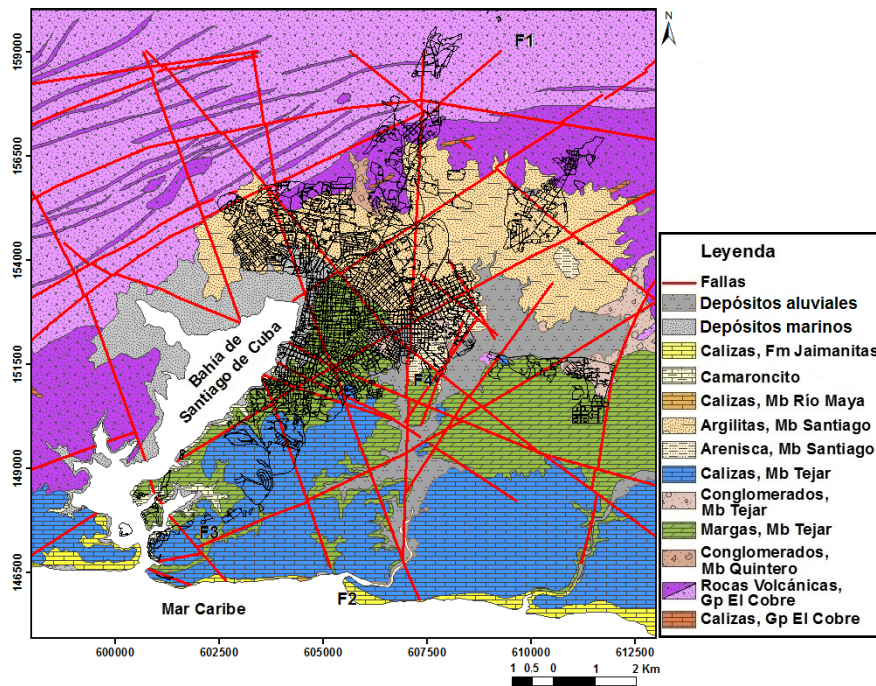


Figura 2. Mapa geólogo-tectónico de Santiago de Cuba (modificado de Medina *et al.* 1999). Escala 1:25 000. F1, F2, F3, F4: afloramientos fotografiados que se muestran en las figuras de la 5 a la 8.

Tabla 1. Tabla de tiempo geológico de las formaciones geológicas presentes en la cuenca de Santiago de Cuba

Eratema (Era)	Sistema (Período)	Serie (Época)	Notación	Espesor (m)	Unidades Estratigráficas	
Cenozoico (Cz)	Cuaternario	Holoceno	alQ ₂	~ 5	Depósitos aluviales	
			mQ ₂	~ 5	Depósitos marinos	
		Pleistoceno	Sup	Q ₁ ³	~ 10	Fm. Jaimanitas
			Inf	Q ₁ ¹ - N ₂ ²	~ 4	Camaroncito
	Neógeno	Plioceno	Sup	Q ₁ ¹ - N ₂ ²	30 - 80	Fm. Río Maya
			Inf	N ₂ ¹	~ 10	Mb Santiago
			Sup	N ₁ ³ - N ₂ ¹	~ 100	Mb Tejar

		Med	$N_1^2- N_1^3$	~ 15	Mb Quintero
Paleógeno	Eoceno	Med	$E_1^2- E_2$	5000- 6000	Gp El Cobre
	Paleoceno	Sup			

En los párrafos que siguen se hace una breve descripción litológica de las formaciones (Fm.), sus miembros (Mb) y del grupo El Cobre (Gp), presentes en el área de estudio. Se emplearon los criterios de Medina *et al.* (1999) y del Léxico Estratigráfico de Cuba (2013).

- a) **Depósitos aluviales:** constituida por limo gris y gris parduzco, limos arenosos y arcillas arenosas. Se extiende en el cause y orilla de los ríos y en las desembocaduras de estos.
- b) **Depósitos marinos:** arenas calcáreas y cuarzosas con restos de conchas, guijarros de playa y bancos de tormenta. Se corresponden a depósitos transportados por el oleaje y las corrientes litorales hacia las partes emergidas de los cayos, situadas por la parte del mar abierto.
- c) **Formación Jaimanitas:** calizas biodetríticas, carsificadas, muy fosilíferas con conchas bien preservadas, corales de especies actuales y ocasionalmente biohermos. Los bolsones cársticos a veces se encuentran rellenos por una fina mezcla carbonático-arcillosa ferruginosa de color rojo ladrillo. Contienen fragmentos de sedimentos terrígenos y calizas preexistentes. La cementación es variable y en su superficie presenta un casquete recristalizado de evaporita y caliche combinados, por debajo del cual, en ocasiones, la roca aparece desintegrada, convertida en un material terroso. Predominan las facies de playa, post-arrecifal y arrecifal.
- d) **Camaroncito (unidad informal):** calcarenitas laminares de grano medio a grueso, bien cementadas, con diseminaciones de gravas polimícticas predominantemente finas. Facies de playa donde existía un fuerte oleaje. Es posible que forme parte de la Fm. Río Maya.
- e) **Formación Río Maya:** calizas biohémicas algáceas, coralinas y micríticas muy duras de matriz micrítica. Las calizas se encuentran frecuentemente dolomitizadas. El contenido de arcilla es muy variable. Abundantes clastos de material terrígeno, su granulometría varía entre arenas y cantos. Intercalaciones de conglomerados polimícticos de granulometría variable y cemento calcáreo. Sus depósitos corresponden a episodios de desarrollo arrecifal que alternan con

episodios de intenso aporte de materiales clásticos terrígenos, predominando los de desarrollo arrecifal.

- f) **Formación La Cruz:** secuencia terrígeno-carbonatada en la base y el techo, siendo en su parte media, carbonatada-terrígena. De acuerdo con las asociaciones de fósiles presentes, parece haberse depositado en condiciones de bahía y zonas de lagunas costeras con manglares. Las alternaciones de depósitos terrígenos y carbonáticos sugieren episodios alternos de subsidencia y emersión. Está conformada por tres miembros, los cuales están bien desarrollados en el área de estudio:
- a) **Miembro Santiago:** compuesto por argilitas calcáreas limoso arenosas plásticas con intercalaciones o interestratificaciones de aleurolitas polimícticas areno-arcillosas. Son depósitos regresivos. La asociación *Ammonia-Elphidium-Cyprideis-Perisocytheridea* con arcillas fosfatizadas, limos y lodos calcáreos, así como la presencia de *Ostrea*, sugieren un ambiente lagunar costero.
- b) **Miembro Tejar:** presenta calcarenitas finas de matriz margosa y cemento carbonatado y aleurolitas de igual carácter, color amarillo castaño. Parece haberse depositado en condiciones de bahía, con varias lagunas costeras y manglares, de acuerdo con la presencia de asociaciones *Ammonia-Elphidium-Ostrácodos* y *Discorbis-Elphidium-Miliólidos*. La asociación *Amphistegina-Archais* sugiere un medio de mayor energía, posiblemente, la parte externa de la bahía, con fondos arenosos y crecimiento coralino limitado. La presencia de calcita magnesiana y de dolomita en las arcillas está igualmente vinculada a un medio de circulación restringida (zonas lagunares). Las alternancias de materiales carbonatados y terrígenos parece estar relacionada con períodos alternos de emersión y subsidencia.
- c) **Miembro Quintero:** formado por conglomerados polimícticos de calizas y vulcanitas con matriz margosa o arenítica con cemento calcáreo más o menos desarrollado. Su ambiente de sedimentación fueron depósitos transgresivos del borde litoral.
- **Grupo El Cobre:** está constituido por diferentes tipos de rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables, tanto en sentido vertical como lateral. Las transiciones entre ellas a veces son bruscas y otras graduales y en muchos casos es prácticamente imposible establecer delimitaciones entre ellas. Las rocas más abundantes son: tobas, tobas aglomeráticas, lavas y lavas aglomeráticas de composición andesítica, andesito-dacítica y dacítica, raramente riolítica, riodacítica y basáltica.

Se intercalan tufitas y calizas, además, se asocian cuerpos hipabisales y diques de diversa composición. También aparecen tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas y vulcanomícticas y grauvacas. Su ambiente de sedimentación es de cuenca marina de profundidad variable (de somera a media), de salinidad normal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Selección de los datos

La correcta caracterización del sitio con propósitos de peligrosidad sísmica y la posible respuesta local de los suelos requiere de un buen conocimiento de algunos tópicos como son (Figura 3).

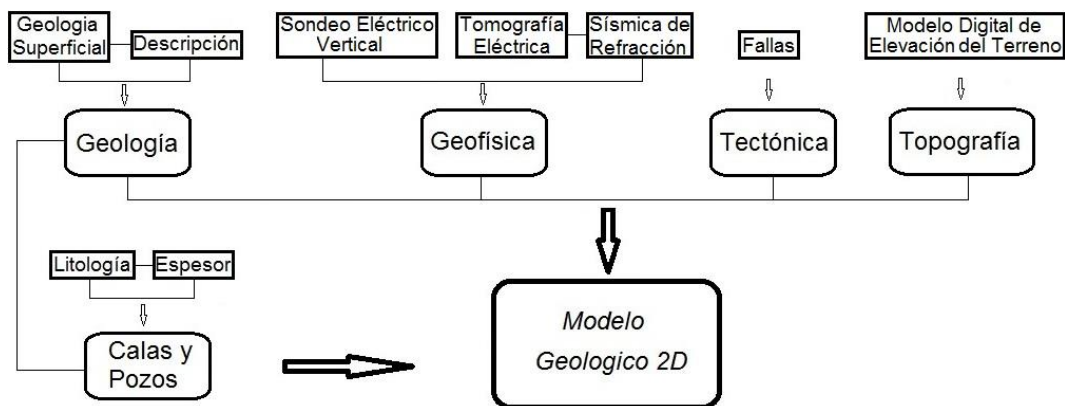


Figura 3. Diagrama de datos para obtener un modelo geológico 2D.

a) Geología superficial

Los datos geológicos constituyen la información básica para la caracterización litoestratigráfica del sitio. Se empleó el mapa geólogo-tectónico de la Ciudad de Santiago de Cuba a escala 1:25 000 (Medina *et al.* 1999) como referencia de la geología superficial presente en el área de estudio y toda la información referente a trabajos de campo y descripción de afloramientos.

b) Estratigrafía

Se utilizó toda la literatura disponible relacionada con el tema (Nagy *et al.* 1976, 1983; Cabrera *et al.* 2003 y Léxico Estratigráfico de Cuba 2013) y las perforaciones realizadas en el área de estudio: 550 investigaciones ingeniero-geológicas realizadas en 2012 por la Empresa de Investigaciones Aplicadas de Oriente (ENIA) y 11,120 pozos que en ocasiones sobrepasan los 2 km, realizados por la Empresa Geominera Oriente (EGMO por Méndez *et al.* 2001). Siempre que fue posible, se tomaron los datos de las

coordinadas, litología por estratos, espesor, nivel freático y propiedades físico-mecánicas.

c) Tectónica

La identificación de las fallas geológicas en la región de estudio se basa en las fallas propuestas como geológicamente activas por Medina *et al.* (1999) en los pasados 20 Ma. (Mioceno al Holoceno). Se tomó la información de su geometría profunda, ubicación, tipo de falla, edad probable, extensión, dirección y orientación (ángulo de buzamiento y rumbo).

d) Geofísica

La información de los estudios geofísicos para identificar el basamento (50 sondeos eléctricos verticales, SEV) se tomó de Medina y demás colaboradores (1999). Se desarrollaron campañas de mediciones geofísicas locales para caracterizar los diferentes tipos de suelos predominantes: 37 perfiles de resistividad eléctrica (tomografía) y sísmica de refracción somera, la selección del lugar se realizó teniendo en cuenta la variabilidad del suelo y las condiciones del medio.

e) Topografía

Todos los sitios se caracterizaron por su elevación con base en el Modelo de Elevación del Terreno (MDT) de la región de estudio, realizado por la Agencia de Medio Ambiente de Cuba (2010).

f) Batimetría

Como la ciudad se encuentra formando parte del sector de la Bahía, fue necesario el uso de datos batimétricos (Díaz, Pérez y Polo 1998) para determinar la profundidad del lecho marino.

2.2. Procedimiento metodológico para la elaboración del modelo geológico 2D de la cuenca de Santiago de Cuba

Los modelos geológicos son representaciones gráficas de cuerpos geológicos o capas litológicas de un área o región determinada, los cuales permiten hacer correlaciones estratigráficas. Se confeccionan a diferentes escalas, en función de los datos.

La obtención del modelo geológico 2D en la ciudad de Santiago de Cuba a escala 1:25 000 permitirá elaborar perfiles estratigráficos para la futura modelación del efecto de sitio y estimación de la amplificación de movimiento del suelo esperada, debido a su respuesta local.

Para esto se creó un procedimiento metodológico como sigue a continuación:

- 1- Recopilación de la información, selección y evaluación de los datos
 - Datos geológicos y geofísicos
 - Datos de calas y pozos
 - Datos de tectónica y sísmica
- 2- Preparación digital de bases datos
- 3- Elaboración e interpretación de perfiles sísmicos
- 4- Elaboración e interpretación de perfiles geológicos
 - Correlación longitudinal y transversal de perfiles
- 5- Confección del mapa

Para la sísmica de refracción se emplearon 12 geófonos verticales de 10 Hz, dispuestos equidistantemente, con el objetivo de determinar la variación de velocidad de las ondas longitudinales (V_p) y las propiedades de los perfiles de suelo (Coeficiente de Poisson, Módulo de Young, Módulo de Corte, módulo volumétrico y amortiguación) en las diferentes capas; el terreno fue energizado con una maza de 10 kg que golpea en una placa de aluminio.

Para la resistividad eléctrica se emplearon 12 electrodos, dispuestos equidistantes, con el objetivo de determinar la distribución de las heterogeneidades litológicas en el terreno. Estos métodos tienen la limitación que solo pueden caracterizar los estratos superficiales.

3. RESULTADOS

Se elaboró un mapa del basamento rocoso en términos de los estratos donde la V_s es mayor de 800 m/s, representando el estrato de partida, el cual constituye la base de la aplicación de los métodos de modelación de suelos para el cálculo de la amplificación local del suelo; este es determinado para las rocas duras o muy duras acorde a sus propiedades físico-mecánicas.

Los valores de resistividad eléctrica se ajustaron de acuerdo con los datos obtenidos por Orellana (1982), Das (2001) y Loke (2004).

La velocidad de las ondas de corte (V_s) se obtuvieron por $V_s = V_p \times 1.74$ (Moreno, Grandison y Atakan 2002) y se compararon con las obtenidas por Redpath (1973) y Das (2001). Se confrontó con la interpretación de la resistividad eléctrica (tomografía) y la información de calas y pozos geológicos cercanos.

La velocidad en las diferentes profundidades para cada material de suelo predominante se calculó a partir de las características geofísicas de las capas

superficiales de ese material, eliminando las capas superficiales con una profundidad inferior a un metro y teniendo en cuenta la profundidad máxima a la que aparece. Para las capas más profundas, donde no fue posible calcular la velocidad experimentalmente, se tomaron en cuenta los valores promedio de densidades y velocidades de onda sísmica (Sadovskii *et al.* 1973).

De esta manera, se obtuvo una línea de tendencia que permitió calcular los valores de velocidad en cualquier punto de las capas profundas (Tabla 2).

Teniendo en cuenta lo antes explicado, se obtuvo un valor inicial de V_s del promedio de las V_s determinadas por la sísmica in situ y el promedio de la profundidad a la que apareció el material y un valor de V_s final, tomado del promedio de V_s (a partir de Sadovskii *et al.* 1973) con la profundidad máxima a la que apareció este material.

Los valores de densidad (Tabla 2) se obtuvieron a partir de los datos de las perforaciones geotécnicas realizadas por la ENIA y se compararon con la literatura disponible (NAVFAC 1982). Teniendo en cuenta estos datos se calculó el promedio de densidades para cada tipo de material.

Tabla 2. Promedio de velocidades (V_s) y profundidad para los materiales predominantes en la región de estudio

Suelo	Densidad (kg/m ³)	Prom. V_s (m/s)	Prom. Prof (m)	Línea de tendencia																																												
Arcilla limosa	1,85	179	2,19	$V_s = 3,2591 \cdot h + 171,86$																																												
		400	70,00		Arcilla	1,87	290	3,18	$V_s = 1,566 \cdot h + 285,02$	700	265,00	Arena	1,89	348	4,20	$V_s = 2,5251 \cdot h + 337,39$	600	104,00	Grava arenosa	1,91	443	4,27	$V_s = 1,5107 \cdot h + 436,55$	500	42,00	Conglomerado	1,95	300	3,00	$V_s = 5,9524 \cdot h + 282,14$	800	87,00	Marga arcillosa	1,93	438	5,60	$V_s = 3,7945 \cdot h + 416,75$	800	101,00	Arenisca	1,94	504	8,92	$V_s = 1,3795 \cdot h + 491,69$	700	151,00	Caliza margosa	2,04
Arcilla	1,87	290	3,18	$V_s = 1,566 \cdot h + 285,02$																																												
		700	265,00		Arena	1,89	348	4,20	$V_s = 2,5251 \cdot h + 337,39$	600	104,00	Grava arenosa	1,91	443	4,27	$V_s = 1,5107 \cdot h + 436,55$	500	42,00	Conglomerado	1,95	300	3,00	$V_s = 5,9524 \cdot h + 282,14$	800	87,00	Marga arcillosa	1,93	438	5,60	$V_s = 3,7945 \cdot h + 416,75$	800	101,00	Arenisca	1,94	504	8,92	$V_s = 1,3795 \cdot h + 491,69$	700	151,00	Caliza margosa	2,04	622	8,06	$V_s = 1,936 \cdot h + 606,4$				
Arena	1,89	348	4,20	$V_s = 2,5251 \cdot h + 337,39$																																												
		600	104,00		Grava arenosa	1,91	443	4,27	$V_s = 1,5107 \cdot h + 436,55$	500	42,00	Conglomerado	1,95	300	3,00	$V_s = 5,9524 \cdot h + 282,14$	800	87,00	Marga arcillosa	1,93	438	5,60	$V_s = 3,7945 \cdot h + 416,75$	800	101,00	Arenisca	1,94	504	8,92	$V_s = 1,3795 \cdot h + 491,69$	700	151,00	Caliza margosa	2,04	622	8,06	$V_s = 1,936 \cdot h + 606,4$											
Grava arenosa	1,91	443	4,27	$V_s = 1,5107 \cdot h + 436,55$																																												
		500	42,00		Conglomerado	1,95	300	3,00	$V_s = 5,9524 \cdot h + 282,14$	800	87,00	Marga arcillosa	1,93	438	5,60	$V_s = 3,7945 \cdot h + 416,75$	800	101,00	Arenisca	1,94	504	8,92	$V_s = 1,3795 \cdot h + 491,69$	700	151,00	Caliza margosa	2,04	622	8,06	$V_s = 1,936 \cdot h + 606,4$																		
Conglomerado	1,95	300	3,00	$V_s = 5,9524 \cdot h + 282,14$																																												
		800	87,00		Marga arcillosa	1,93	438	5,60	$V_s = 3,7945 \cdot h + 416,75$	800	101,00	Arenisca	1,94	504	8,92	$V_s = 1,3795 \cdot h + 491,69$	700	151,00	Caliza margosa	2,04	622	8,06	$V_s = 1,936 \cdot h + 606,4$																									
Marga arcillosa	1,93	438	5,60	$V_s = 3,7945 \cdot h + 416,75$																																												
		800	101,00		Arenisca	1,94	504	8,92	$V_s = 1,3795 \cdot h + 491,69$	700	151,00	Caliza margosa	2,04	622	8,06	$V_s = 1,936 \cdot h + 606,4$																																
Arenisca	1,94	504	8,92	$V_s = 1,3795 \cdot h + 491,69$																																												
		700	151,00		Caliza margosa	2,04	622	8,06	$V_s = 1,936 \cdot h + 606,4$																																							
Caliza margosa	2,04	622	8,06	$V_s = 1,936 \cdot h + 606,4$																																												

800 100,00

Se desarrolló un modelo geológico 2D a escala 1:25 000, sobre la base de 61 perfiles geológicos, calibrados en todos los datos disponibles. Estos perfiles atraviesan toda la ciudad en una cuadrícula regular de 500 x 500 m con dirección norte a sur y este a oeste y tienen en cuenta la topografía superficial y profunda del suelo, la velocidad de onda de corte (VS) en cada capa y sus propiedades físico-mecánicas (Figura 4).

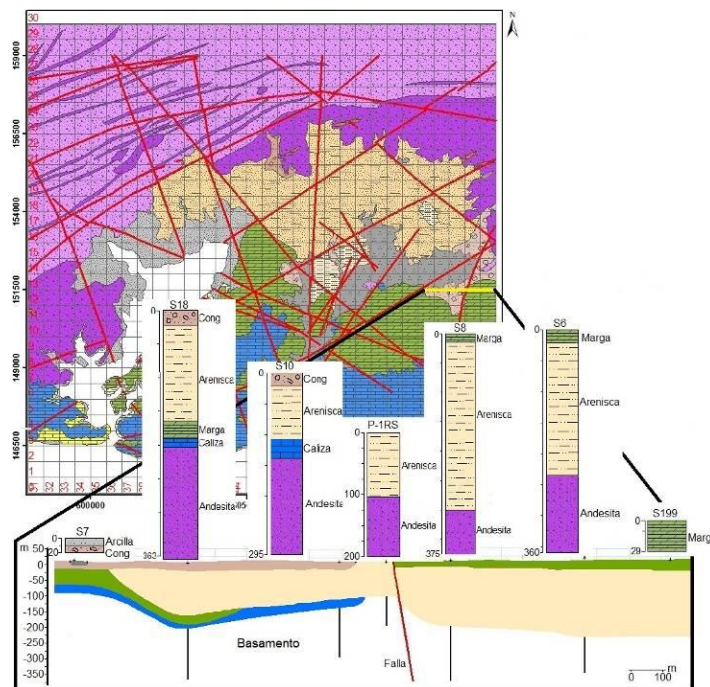


Figura 4. Interpretación de una sección del perfil 13, y las columnas estratigráficas de los pozos cortados por el perfil en el tramo analizado.

Se plotearon 21 fallas bien documentadas por trabajos de campo, fotointerpretación y geofísica, según Medina *et al.* (1999), analizando cómo pueden modificar el comportamiento de los diferentes estratos en profundidad.

La interpretación de cada perfil se hizo mediante ArcGis 10, en un radio de 250 m, quedando de esta manera georeferenciado. Algunos de los estratos se reagruparon según sus características, sus propiedades geotécnicas y la composición litológica, es decir, se hizo una agrupación estratigráfica y no litológica. La variación del corte geológico de un perfil a otro se ajustó lo más posible a la realidad.

4. DISCUSIÓN

Con las descripciones litológicas de las formaciones geológicas y la información geotécnica de calas y pozos se obtuvo una descripción detallada

de la litología y propiedades físico-mecánicas por estratos, muy importante para poder confeccionar los modelos de suelo o cortes geológicos en profundidad y obtener una robusta estimación de los efectos locales. A partir de estos datos quedaron definidos los siguientes tipos litológicos:

- Arenas arcillosas con contenido de gravas
- Arcillas y arcillas limo arenosas
- Margas arcillosas y arcillas margosas
- Conglomerados
- Gravas
- Aleurolitas y argilitas
- Areniscas y calcarenitas
- Calizas margosas altamente degradables
- Calizas coralinas
- Rocas vulcanógenas.

De los 61 perfiles se interpretaron 52, porque el resto cortaban roca y para este estudio era fundamental precisar la variación de los estratos de suelos sedimentarios.

La tomografía eléctrica dio valores de resistividad eléctrica en suelos y rocas. Los primeros estratos se corresponden con suelos arenosos, arcillosos y gravas, en ocasiones conglomerados. Por la poca profundidad alcanzada con este método no se detectó el basamento, aunque sí aparecieron en algunos lugares intercalaciones de rocas o roca caliza en la base del corte. Por las anomalías, o en algunos casos las bajas resistividades, se puede determinar la presencia de agua y agrietamientos o fallas; esto se corresponde con las descripciones de las calas y con el mapa geólogo-tectónico.

Mientras que la sísmica de refracción define tres capas en la mayoría de los casos, según sus valores de V_p , los dos primeros estratos se corresponden con suelos, sin embargo, en casi todos los casos la tercera capa caracteriza suelos rocosos, lo cual no siempre es real dada la poca profundidad alcanzada por el método, por esto se decidió despreciar esta capa, ya que este método fue aplicado fundamentalmente para conocer los valores de V_p y V_s en los sedimentos sueltos en las capas superficiales, tales como arena, arcillas, margas y gravas.

La ubicación de las fallas activas en los perfiles permitió analizar el desplazamiento que podían sufrir los estratos, apreciando que existen áreas anómalas donde el espesor de los sedimentos recientes varía considerablemente, respecto a los otros materiales depositados en áreas contiguas, lo que está condicionado por los esfuerzos tectónicos ocurridos en la zona. La dirección de los esfuerzos de las fallas predominantes durante el Paleógeno es NW-SE, mientras que los esfuerzos de las fallas principales, a partir del Neógeno, tienen dirección NE-SW (Medina *et al.* 1999).

Estas fallas no son capaces de generar terremotos de mediana o gran intensidad, pues tienen poco desplazamiento y hasta la actualidad no existe ningún reporte de eventos sísmicos en sus cercanías, no obstante, juegan un rol importante en las características de la amplificación local del suelo debido a que estas modifican los estratos.

La interpretación de los perfiles geológicos permitió aclarar los contactos geológicos establecidos en superficie, teniendo en cuenta que en algunas áreas no coincidía el material aflorante que se describe en el mapa geológico de Medina y otros investigadores (1999) con el estrato superficial descrito en las calas ubicadas en el área.

La interpretación de los perfiles geológicos arrojó los siguientes datos:

- En la parte norte de la ciudad predominan las rocas vulcanógeno-sedimentarias del Gp El Cobre, muy agrietadas, fracturadas y plegadas (Figura 5).



Figura 5. Afloramiento de tobas plegadas formando un sinclinal.

- En algunos sectores las rocas vulcanógeno-sedimentarias del Gp El Cobre están altamente meteorizadas e intemperizadas, degradadas a un suelo arenoso arcilloso con gravas o clastos de variada granulometría, con potencias que pueden sobrepasar los 10 m.
- Todo el extremo sur de la ciudad está formado por una franja de calizas duras pertenecientes a la Fm. Jaimanitas, con un espesor máximo

de 12 m y, por debajo de ellas, aparecen sedimentos terrígenos carbonatados semicompactos de consistencia blanda a dura de la Fm. La Cruz (Figura 6).



Figura 6. Afloramiento de calizas, depositadas sobre una capa fina de conglomerados de clastos gruesos y debajo margas arcillosas con alto contenido calcáreo, muy erosionada por el oleaje del mar.

- A ambos lados de la bahía existen sedimentos cuaternarios, estos se distribuyen fundamentalmente en el lóbulo interior al norte, este y oeste. No son de origen completamente marino, el mayor porcentaje es terrígeno, ya que el oleaje dentro de la bahía es muy débil y el mayor aporte es por los ríos, con desembocadura hacia el norte y oeste de la bahía. Se puede agregar, además, que la corriente que sale de la bahía es de mayor velocidad que la que entra y la pendiente del fondo es hacia afuera.
- Los mayores espesores de los sedimentos están al noroeste, asociado a una zona baja y pantanosa y a la desembocadura de los ríos, en esta parte los espesores son superiores a los 12 m.
- Al suroeste de la bahía predominan los afloramientos de rocas calizas y rocas vulcanógenas sedimentarias pertenecientes al Grupo El Cobre; los sedimentos cuaternarios que afloran son de poco espesor (entre 1 m y 5 m) depositados, fundamentalmente, sobre las rocas vulcanógenas sedimentarias.
- El lado centro-este de la bahía tiene un comportamiento diferente, la deposición de sedimentos fue mayor, por lo que hay zonas en que aparecen estratos potentes de sedimentos areno-arcillosos que en ocasiones pasan los 100 m de espesor y, por tanto, la profundidad a la

que se encuentra el basamento es mayor que en la parte oeste y al norte de la ciudad.

- Tanto las margas como las calizas de la Fm. La Cruz tienen intercalaciones de otros materiales (Figura 7).



Figura 7. Afloramiento de margas, en la parte baja conglomerado calcáreo mal estratificado, granulometría variada.

- Las rocas calizas pertenecientes a la Fm. La Cruz son altamente margosas (Figura 8) y en casi toda el área aparecen intercaladas con arcillas margosas o arcillas arenosas y margas. Estas calizas son de dureza media, poco resistentes y consistencia débil, deleznales al tacto, en muchos sectores se degradan en gravas o en arcilla-arenosa.



Figura 8. Calizas de la Fm La Cruz.

- El tipo de deposición de los sedimentos, la variada granulometría y composición de los clastos, así como la intercalación de areniscas, gravas y conglomerados da indicios de una cuenca restringida donde

había poca circulación, en ocasiones con movimientos rápidos de ascenso y descenso o procesos de transgresión y regresión.

Se recomienda que en las zonas donde el comportamiento del terreno es homogéneo en profundidad, o sea, estratos planos paralelos, es más factible aplicar una modelación monodimensional para un análisis lineal equivalente; sin embargo, donde existen variaciones geométricas y estratigráficas considerables o hay contactos tectónicos grandes es necesario aplicar el método de modelación bidimensional basado en la técnica de los elementos de contorno.

5. CONCLUSIONES

- La amplia información geológica, geotécnica, morfológica, geofísica, tectónica y sísmica obtenida y calibrada por 61 perfiles geológicos a datos de un gran número de pozos soportan la modelación geológica 2D de la ciudad de Santiago de Cuba y sus áreas adyacentes.
- Por primera vez se obtienen valores de V_p y V_s representativos de los materiales predominantes en los estratos superficiales de toda la ciudad.
- Se establecieron contactos geológicos en superficie distintos a los señalados en el mapa geológico a escala 1:25 000 de Medina y demás colaboradores (1999), por lo cual este resultado es útil para la corrección del mapa a una escala más detallada.
- El extremo sur de la ciudad está formado por una franja de calizas duras, con presencia de carso, subyacida por sedimentos terrígenos carbonatados semicompactos de consistencia desde blanda hasta dura, mientras que en la parte norte y noroeste predominan las rocas vulcanógenas sedimentarias.
- Las calizas de la Fm. La Cruz (Icz) son de dureza media, poco resistentes y de consistencia débil, deleznales al tacto, incluso a profundidades considerables, en muchos sectores se degradan en gravas o en arcilla-arenosa, por lo cual deben ser consideradas como suelo duro.
- Los mayores espesores de sedimentos blandos y en algunos casos con alta humedad se encuentran al extremo centro-este de la bahía.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la realización de este trabajo al Programa TRIL-ICTP-OGS del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, Italia, por financiar las

actividades y a todos los colegas del Observatorio Geofísico Experimental de Trieste por su hospitalidad y sugerencias

7. REFERENCIAS

- Álvarez, L.; García, J.; Vaccari, F.; Panza, G. F.; González, B.; Reyes, C.; Fernández, B.; Pico, R.; Zapata, J. and Arango, E. 2004: Ground motion zoning of Santiago de Cuba: an approach by SH waves modelling. *Pure and Applied Geophysics*, 161: 1041-1059.
- Álvarez, J. L.; Rodríguez, L.; Grandison, M.; Alvarado, L.; Rivera, Z.; Velesvilla, T. y Schmidt, V. 2013: Microzonificación sísmica de ciudades de América Latina. Resultados del Proyecto 487 del PICG. En: V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS '2013. Memorias. La Habana, Cuba. ISSN: 2307-499X.
- Arango, E.; Vega, N.; Ríos, Y.; Escobar, E. y Rivera, Z. 2009: Análisis geodinámico y sismotectónico del extremo nororiental de Cuba. *ACTA GGM DEBRECINA*, 4: 43-52. ISSN 1788-4497.
- Biescas, B.; Rivera, Z. C. y Zapata, J. A. 2005: Seismic attenuation of coda waves in the eastern region of Cuba. *Tectonophysics*, 429(1-2): 99-109. ISSN: 0040-1951.
- Cabrera, M.; García, D.; Rojas, Y.; Reyes, C. y Rivera, Z. 2003: Depósitos Pliocuaternarios al Sur de la Sierra Maestra. En: V Congreso Cubano de Geología y Minería. GEOMIN' 2003. Memorias. La Habana, Cuba. ISBN 959-7117-11-8.
- Colectivo de autores. 2010: *Modelo de elevación del terreno de la provincia de Santiago de Cuba*. La Habana: Agencia de Medio Ambiente.
- Colectivo de autores. 2013: *Léxico Estratigráfico de Cuba*. Editorial Centro Nacional de Información Geológica: La Habana. ISBN: 978-959-7117-58-2.
- Díaz, A.; Pérez, J. y Polo, F. 1998: *Derrotero de las costas de Cuba*. Tomo II. La Habana: Editorial Científico Técnica.
- Das, B. M. 2001: *Principios de ingeniería de cimentaciones*. México, D.F.: International Thomson Editores, S.A. de C.V. ISBN: 970-686- 035-5.
- Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) 2012: Calas ingeniero geológicas de la ciudad de Santiago de Cuba. Santiago de Cuba.
- Fernández, B.; Rivera, Z.; Reyes, C. y Zapata, J. 2000: Los fenómenos físico geológicos secundarios en la ciudad de Santiago de Cuba. *Minería y Geología*, XVII(2): 11-13. ISSN 0258 5979.
- García, J. 2007: *Estimados de peligrosidad sísmica con el error asociado para Cuba, y cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba usando técnicas SIG*. Tesis doctoral. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas del CITMA. 188 p.

- González, B. 1997: Research problems concerning seismic microzonation of megacities in Cuba: the cases of Santiago de Cuba and Havana. *Research Reports on Earthquake Engineering*, 62. Tokyo Institute of Technology, Japan.
- Loke, M. H. 2004: Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Consulta: 15/07/2018. Disponible en: https://www.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/223/loke_course_notes.pdf
- Medina, A.; Escobar, E.; Ortiz, G.; Ramírez, M.; Díaz, L.; Móndeño, F.; Montejo, N.; Rodríguez, H.; Guevara, T. y Acosta, J. 1999: Reconocimiento geólogo-geofísico de la cuenca de Santiago de Cuba, con fines de Riesgo Sísmico. Empresa Geominera de Oriente, Santiago de Cuba. 32 p.
- Méndez, I.; Ortiz, G.; Aguller, M.; Rodríguez, E.; Llull, E.; Guevara, T.; López, T.; Guilart, M.; Mustelier, M.; Gentoiu, M. y Lay, M. 2001: Base de datos digital de los levantamientos regionales de Cuba Oriental. Empresa Geólogo-Minera de Oriente (E.G.M.O.) y Oficina Nacional de Recursos Minerales (O.N.R.M).
- Moreno, B.; Grandison, M. and Atakan, K. 2002: Crustal velocity model along the southern Cuban margin: implications for the tectonic regime at an active plate boundary. *Geophysical Journal International*, 151(2): 632-645..
- Nagy, E.; Brezsnysanski, K.; Brito, A.; Coutín, D.; Formell, F.; Franco, G.; Gyarmati, P.; Jakus, P. y Radocz GY.; 1976: *Texto explicativo del mapa geológico de la provincia de Oriente a escala 1: 250 000*. La Habana: Archivos del Instituto Geología y Paleontología, Academia de Ciencias.
- Nagy, E.; Bresznyánzsky, K.; Brito, A.; Coutín, D.; Formell, F.; Franco, G.; Gyarmati, P.; Jakus, P. y Radócz, G. 1983: *Contribución a la Geología de Cuba Oriental*. La Habana: Editorial Científico Técnica. 273 p.
- NAVFAC (Naval Facility Engineering Command) 1982: *Maximum density of the compacted materials. Microzonazione sismica. Procedure per elaborare una carta di pericolosità sismica*. ISBN: 978-88-7758-797-8.
- Orellana, E. 1982: *Prospección Geoeléctrica Continua*. Editorial Paraninfo.
- Pérez, C.; García, D. y Cañete, C. 1994: *Tectónica de la Sierra Maestra y Áreas Adyacentes*. Instituto de Geología y Paleontología. La Habana.
- Redpath, B. 1973: *Seismics refraction exploration for engineering site investigations*. Technical Report E-73-4. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Explosive Excavation Research Laboratory. California. 51 p.
- Rivera, Z. 2000: *Microzonificación sísmica de la ciudad de Bayamo*. Red de Estaciones Sismológicas en Cuba. La Habana: Editorial Academia.

- Rivera, Z. C.; Slejko, D.; Garcia, J.; Peruzza, L.; Rebez, A. and Santulin, M. 2004: Seismic hazard of the Bayamo region (eastern Cuba) considering local soil typologies. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 45(1-2): 15-33.
- Sadovskii, M. A.; Nersesov, I. L.; Medvedev, S. V. and Liamzina, G. A. 1973: Main principles of the seismic microzoning. *Voprosii Inzheniernoii Seismologii*, Moscow, 15: 3-34.
- Zapata, J. 2000: *Utilización de variantes metodológicas de microzonificación sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba*. La Habana: Editorial Academia.

Recibido: 03/05/2019

Aceptado: 17/09/2019