

Efecto de sitio en el área urbana de Puerto Plata, República Dominicana

Site effect in the urban area of Puerto Plata, Dominican Republic

Zulima C. Rivera-Alvarez^{1*}, Julio P. Bautista-Apolinar², Yesica H. Pérez-Alejandro² y
María B. Roque-Quezada²

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

²Servicio Geológico Nacional, Santo Domingo, República Dominicana.

*Autor para la correspondencia: zuli@cenais.cu

Resumen

A fin de evaluar la respuesta sísmica de los suelos en la ciudad de Puerto Plata se realizó la descripción litoestratigráfica de 141 sondeos geotécnicos. Se aplicó la técnica de Nakamura o H/V (sísmica pasiva) para calcular, a partir del registro del ruido ambiental de fondo, el registro espectral entre los componentes horizontales y la componente vertical; en siete sitios se determinó la velocidad de la onda de corte (V_s) por el método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) 1D y 2D (sísmica activa). El software PSHAKE se usó para el modelado 1D en 26 modelos estratigráficos. Se obtuvieron factores de amplificación de 0,6 a 2,0 siendo los últimos los que ocupan la mayor parte del área. Las mayores amplificaciones coinciden con la parte urbanizada donde afloran los materiales antrópicos y los sedimentos cuaternarios.

Palabras clave: sísmica; efecto de sitio; velocidad de las ondas de corte; factor de amplificación.

Abstract

In order to evaluate the seismic response of the soils in Puerto Plata city, the lithostratigraphic description of 141 geotechnical surveys was carried out. The Nakamura or H/V (passive seismic) technique was applied to calculate the spectral record between the horizontal components and the vertical by the background environmental noise record. The shear wave velocity (V_s) is determined by the 1D and 2D Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) method (active seismic) at seven sites. PSHAKE software is used

for 1D modeling in 26 stratigraphic models. Amplification factors of 0.6 to 2.0 were obtained, with the latter occupying most of the area. The greatest amplifications match with the urbanized part where anthropic materials and Quaternary sediments emerge.

Keywords: seismic; site effect; shear wave speed; amplification factor.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales fuentes sísmicas en República Dominicana la constituye la interacción de la placa del Caribe con la placa de Norteamérica, especialmente en la parte norte-noreste de la isla, donde se encuentran las fallas Septentrional, Camú y Rio Grande, las cuales definen esa zona como de alto riesgo sísmico, confirmado por la evidencia de varios eventos sísmicos devastadores.

En la región norte la sismicidad es mayor en comparación con las otras regiones del país; los sismos pueden alcanzar magnitudes hasta de 8,6. El 22 de septiembre de 2003 se registró un terremoto de magnitud 6,5 con epicentro a 15 km al sur de la ciudad de Puerto Plata y tuvo más de 200 réplicas.

Según el mapa geológico escala 1:50 000 (Colectivo de autores 2010) de República Dominicana, la zona urbana de Puerto Plata se caracteriza geológicamente por una amplia variedad de unidades geológicas que incluyen suelo aluvial, arcillas, arena, gravas, limos, calizas y calizas arrecifales y rocas volcánicas. Al mismo tiempo, desde el punto de vista demográfico, la zona urbana de Puerto Plata exhibe un crecimiento poblacional no-planificado ni controlado, como consecuencia de la ausencia de políticas de ordenamiento territorial y planificación de desarrollo. Estas condiciones hacen que los centros urbanos estén sobrepoblados lo cual aumenta su vulnerabilidad.

Dadas las condiciones geológicas y geotécnicas del terreno se decidió llevar a cabo estudios detallados para evaluar la respuesta dinámica de los suelos, aspecto esencial para la prevención y reducción del riesgo sísmico a escala urbana. Los resultados de este trabajo tributan al proyecto internacional "Efecto de sitio a partir de la modelación 1D y 2D de suelos en el área urbana de Puerto Plata, para la determinación de la vulnerabilidad en edificios esenciales", el cual se ejecuta con iniciativa del Servicio Geológico Nacional de República Dominicana (SGN) y el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas de Cuba (CENAI), con presupuesto del Fondo Nacional de Innovación y Desarrollo Científico-Tecnológico (FONDOCYT) del Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT) de República Dominicana.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del área de estudio

La geología superficial de Puerto Plata aparece bien explicada en la Memoria Geológica 6075-II de Puerto Plata, del Mapa Geológico de República Dominicana, a escala 1: 50 000 (2010). El área de estudio tiene una gran variedad y composición litológica agrupada en 18 unidades litoestratigráficas que van desde el Cretácico al Cuaternario reciente, agrupados en 12 formaciones que corresponden a suelo y seis a formaciones rocosas.

Afloran rocas volcánicas y plutónicas, cortados en ocasiones por diques intrusivos; además serpentinitas y peridotitas de edad Cretácico Inferior. Pertenecen al Complejo Basal Puerto Plata, el cual por su complejidad se divide en tres subgrupos. También afloran brechas y bloques serpentiniticos, calizas, arcillas, conglomerados, areniscas, limonitas de variada composición pertenecientes al Paleógeno; conglomerados poligénicos, areniscas, arcillas, calizas, margas y calcarenitas del Neógeno, así como materiales más recientes, del Cuaternario, que son los predominantes en el área (Figura 1) y están compuestos de calizas, arenas, gravas, cantos, arcillas y limos.

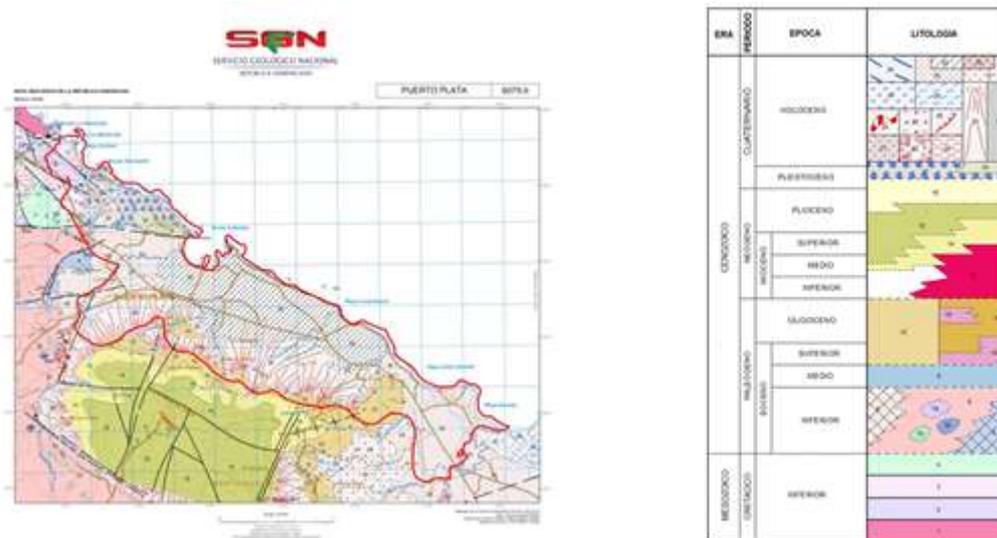


Figura 1. Carta geológica de Puerto Plata (2010).

2.2. Metodología

La información geológica en profundidad fue tomada de 141 sondeos geotécnicos de obras constructivas (datos de archivo), tomados de una base de datos que recoge las coordenadas X y Y, profundidad, nivel freático, inicio, final y espesor de la capa, litología y propiedades físico-mecánicas.

Los trabajos de campo permitieron verificar la geología superficial y seleccionar los lugares propicios para las mediciones geofísicas. La primera campaña geofísica fue de sísmica pasiva con mediciones de ruido ambiental.

Con el equipo triaxial Micromed Tromino 3G se realizaron 47 mediciones de micro vibraciones de 20 minutos de duración cada una, a una tasa de muestreo de 128 Hz. Para tomar datos en terreno el equipo fue orientado según el norte magnético y la ubicación de cada punto fue controlada por un GPS. Para el análisis del efecto de sitio se aplicó la técnica de Nakamura o H/V (Nakamura 1989), la cual posibilita calcular el registro espectral entre los componentes horizontales y la componente vertical, a partir del registro del ruido ambiental de fondo.

De la sismica activa se aplicó el método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) 1D y 2D para determinar la velocidad de la onda de corte (V_s) en siete sitios predeterminados, con el sismógrafo GEODE de 24 canales y geófonos verticales de 4,5 Hz. El espaciamiento entre geófonos fue de 3 m, y la longitud total de tendido de 69 m. La fuente de energía utilizada fueron golpes acumulativos con una mandarria de 20 lb sobre placa de poliuretano. A partir de las mediciones 1D se estableció el modelo de velocidad y el valor V_{s30} , y a partir de las mediciones 2D se determinó la distribución de V_s a lo largo del tendido de investigación.

La V_s se obtuvo mediante las ecuaciones empíricas 1 y 2 de Marto, Soon y Kasim (2013) y Ohta y Goto (1978), respectivamente, a partir del número de golpes (N_g). La segunda ecuación considera, además, el tipo de suelo (basado en la granulometría del material para las arcillas, arenas y gravas), época geológica y profundidad de la capa. Para la modelación 1D de suelos se aplicaron los resultados de la propuesta de Ohta y Goto (1978) en las diferentes capas de los modelos geotécnicos, ya que es una relación multiparamétrica; para el caso de las capas que no tenían el valor de NSPT se utilizaron los valores de V_s estimados por Sadovskii y otros investigadores (1973).

$$V_s = 77.13N^{0.377} \quad (1)$$

$$V_s = 68.79 N^{0.171} \times H^{0.199} (E) (F) \quad (2)$$

Donde: E: edad geológica: aluvio = 1.000 (Holoceno); deluvio=1.303 (Pleistoceno); F: tipo de material: arcilla=1.000; arena fina=1.086; arena media=1.066; arena gruesa=1.135; arena con gravas=1.153; gravas=1.448

El código de cálculo empleado para la modelación del comportamiento dinámico de suelos en la ciudad de Puerto Plata fue el método de análisis 1D lineal equivalente, implementado en el código PSHAKE (Sanó y Pugliese 1991), el cual es una variación del código SHAKE, ampliamente usado para calcular la respuesta no lineal del sitio.

PSHAKE calcula la respuesta sísmica local de una capa en el semiespacio viscoelástico atravesado por las ondas de corte que viajan en dirección

vertical. Esta técnica requiere de la geometría de las diferentes capas del suelo, tipo de material y sus propiedades geotécnicas (V_s , densidad húmeda y amortiguación). El espectro de respuesta de peligro uniforme es uno de los parámetros fundamentales para aplicar los métodos de modelado del movimiento del terreno; se usó el Programa CRISIS (Ordaz *et al.* 2014), donde están definidas por nueve ordenadas espectrales en 0,05; 0,15; 0,3; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 y 3,0 s. Se calculó el PGA para $T=0,01$ s, probabilidad de excedencia en 50 años, con periodo de retorno de 475 años, correspondiendo a un 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 141 sondeos geotécnicos se hizo un resumen por obras, quedando 26 (una fuera del área), de ellas 16 obras están construidas en el núcleo urbano de Puerto Plata sobre material antrópico: mezcla de bloques, cantos, gravas, hormigones, asfalto, etc.; dos obras sobre los materiales de la llanura de inundación, integrados por arcillas y limos; tres obras en la formación de laderas, coluviones y desprendimientos, integrada por bloques, cantos, gravas, arenas y arcillas (todas de edad Holoceno, Cuaternario); una obra perteneciente a la formación Isabela, integrada por dunas eólicas, arenas y calcarenitas; y tres obras pertenecientes a la formación Isabela, integrada por calizas arrecifales, de edad Pleistoceno, Cuaternario (Figura 1). De estos resultaron 26 perfiles estratigráficos.

Del método geofísico de sismica activa MASW en los siete sitios, se obtuvieron valores de V_{s30} de 239 m/s a 694 m/s. Atendiendo al Reglamento de Estudios Geotécnicos para Edificaciones de República Dominicana (MOPC 2011) se definieron las clases de sitio: dos de tipo D y cinco de tipo C.

Los resultados de la aplicación del método de sismica pasiva (Tabla 1) muestran curvas H/V con las siguientes categorías:

- Curva con pico de resonancia muy bien marcado, para una frecuencia mayor a 10,0 Hz.
- Curvas de cocientes H/V de baja amplitud, con picos poco marcados a frecuencias entre 0,3 y 0,6 Hz; también a 2,0 Hz.
- Curvas planas sin pico significativo.

Tabla 1. Frecuencia fundamental (Fo) de espectros de respuestas, de las componentes horizontales (N,E) y vertical (Z) y máximos del cociente H/V en Puerto Plata

puntos	Fo (Hz)			H/V		Geología
	N	E	Z	A	Fo (Hz)	
PP1-SONDEO 6	0,36	0,37	0,49	4,68	17,00	2
PP2	0,37	0,37	0,45	2,85	0,31	3
PP3	0,38	0,40	0,57	3,82	0,36	17
PP4	0,46	0,52	0,57	3,60	0,28	23
PP5	0,47	0,47	0,53	4,00	0,34	17
PP6	2,60	2,61	2,51	3,91	0,33	23
PP7	0,42	0,45	0,68	3,12	0,32	17
PP9	2,43	2,44	2,60	4,10	1,33	32
PP10	2,52	2,63	5,19	5,00	0,28	32
PP12	0,38	0,34	2,46	3,22	0,34	20
PP13	3,18	2,65	8,60	3,10	1,97	23
PP14	0,35	0,35	0,52	4,21	0,31	31
PP15	2,65	2,69	2,51	4,25	2,62	20
PP16	0,44	0,40	0,41	3,21	0,25	20
PP17	0,45	0,42	0,46	3,41	0,21	23
PP18	2,47	2,53	2,40	3,50	0,33	32
PP22	0,52	0,46	0,49	5,80	0,16	32
PP23	2,56	2,84	2,37	3,60	0,27	32
PP24	2,62	2,74	0,58	3,50	0,12	32
PP26	0,47	0,42	0,43	2,52	1,48	20
PP27	0,49	0,45	0,47	3,40	0,31	20
PP28	2,33	2,30	2,42	4,00	0,22	32
PP29	0,60	0,63	0,68	3,42	0,31	32
PP30	0,43	0,49	3,00	3,21	0,41	32
PP32	0,44	0,40	0,47	2,50	0,22	20
PP33	0,45	0,45	0,43	2,82	0,27	20
PP35	0,49	0,40	2,55	3,51	0,36	32
PP36	2,43	2,58	2,46	2,30	0,16	20
PP37	2,44	2,44	2,50	3,12	0,31	20
PP39	2,88	2,37	3,24	2,67	0,28	32

PP40	0,33	0,14	0,58	8,00	0,31	20
PP41	0,54	0,60	0,61	2,40	2,10	20
PP42	11,74	12,13	7,12	2,78	0,19	25
PP43	0,41	0,42	7,97	2,80	3,82	31
PP44	0,40	0,42	0,39	3,00	0,21	12
PP45	0,40	0,41	0,77	2,03	11,77	12
PP46	4,45	4,70	9,26	5,63	4,15	30
PP47	9,43	14,19	11,69	4,70	4,85	23
PP48	4,40	4,41	0,57	5,20	3,56	23
PP49	0,43	0,45	0,40	2,82	15,34	23
PP50	2,34	2,57	4,24	4,31	1,93	23
PP51	0,38	0,45	0,43	4,58	17,80	30
SONDEO 2	0,34	0,35	0,58	3,30	0,31	3
SONDEO 5	12,85	12,60	12,67	2,29	0,32	32
SONDEO 4B	0,45	0,46	6,71	2,79	0,18	25

Los factores de amplificación (FA) a partir del cociente espectral H/V están entre 2,03 y 8,00; con frecuencias fundamentales (f_0) de 0,12 Hz a 17,80 Hz. Los valores de frecuencias espectrales se corresponden con los valores característicos de los suelos que afloran en la región estudiada, sin embargo, en algunos casos se obtienen valores altos de frecuencias espectrales en suelos arcillosos y en otros casos se obtienen valores más bajos que lo que se pudiera esperar en suelos rocosos. La causa de esta aparente contradicción es que las mediciones instrumentales consideran elementos como la presencia de sedimentos sueltos, intemperización de las rocas con degradación del material, humedad y aparición de lentes rocosos, entre otros, que el mapa utilizado, por su escala no tiene en cuenta.

Teniendo en cuenta la descripción que aparece en la Memoria Geológica 6075-II de Puerto Plata, del Mapa Geológico de República Dominicana, Escala 1: 50 000 (2010), fue posible hacer una clasificación de los suelos de forma cualitativa, de acuerdo con las regulaciones del código norteamericano NEHRP (BSSC 2001: *Building Seismic Safety Council*).

Las formaciones geológicas o litologías presentes quedaron clasificadas de la siguiente manera: ocho de clase E, de estas seis pertenecientes al Holoceno, siendo los suelos más jóvenes del Cuaternario, y dos del Pleistoceno; dos de clase D, del Holoceno y Eoceno inferior; dos de clase C del Eoceno superior al Plioceno; cuatro de clase B (1 del Cretácico inferior, dos del Eoceno inferior y medio y uno del Pleistoceno) y dos de clase A del Cretácico inferior. Los FA

van desde 0,8 a 2,5; siendo estos últimos los que ocupan la mayor parte del área de estudio (Tabla 2, Figura 1).

Una vez obtenido los valores de densidad y Vs para cada capa, los 26 perfiles estratigráficos pasaron a ser perfiles geotécnicos. Los valores de Vs obtenidos en las diferentes capas se observan en la Tabla 3.

Tabla 2. Geología presente en la región de estudio. Clasificación según el código norteamericano NEHRP (BSSC 2001)

Periodo	Época	Geología	Descripción	NEHRP	Tipo	
CUATERNARIO	Holoceno	Antrópico (32)	Mezcla de bloques, cantos, gravas, hormigones, asfalto	E	Suelo	
		Fondo de Valle (31)	Arenas con cantos, gravas y arcillas	E	Suelo	
		Playa (30)	Arenas	E	Suelo	
		Manglar (28)	Lutitas con abundante vegetación	D	Suelo	
		Aluvial-Coluvial (25)	Limos con cantos y gravas	E	Suelo	
		Llanura de inundación (23)	Arcillas y limos	E	Suelo	
		Terrazas bajas (22)	Cantos, gravas y arenas	E	Suelo	
		Fm de laderas, coluviones y desprendimientos (20)	Bloques, cantos, gravas, arenas y arcillas	E	Suelo	
		Pleistoceno	Fm Isabela (18)	Dunas eólicas, arenas y calcarenitas	E	Suelo
			Fm Isabela (17)	Calizas arrecifales	B	Roca
NEÓGENO	Plioceno Inferior Mioceno Superior	Fm Villa Trina (14)	Margas y/o areniscas carbonatadas	C	Suelo	
PALEÓGENO	Oligoceno		Alternancia rítmica de arcillas y areniscas finas			
	Eoceno Superior	Fm Luperón (12)	(argilitas, pelitas limosas y argilitas micáceas)	C	Suelo	
	Eoceno	Fm La Isla (9)	Calizas blancas brechificadas, calizas	B	Roca	

	Medio		biodetríticas con fragmentos de rocas básicas		
	Eoceno Inferior	Fm San Marcos (6)	Arcillas trituras azules con bloques y fragmentos de origen diverso	D	Suelo
		Fm San Marcos (5)	Megabrecha y bloques serpentiniticos	B	Roca
CRETÁCICO		Fm Los Caños (4)	Rocas volcánicas con brechas piroclásticas y volcanoclásticas	A	Roca
	Inferior	Complejo Basal Puerto P (3)	Gabros y leucogabros	A	Roca
		Complejo Basal Puerto P (2)	Serpentinitas y peridotitas serpentinizadas	B	Roca

Tabla 3. Principales modelos geotécnicos para la región de estudio: δf (g/cm^3)=densidad húmeda; NSPT=número de golpes; V_s = velocidad de la onda de corte en m/s: V_{s1} acorde a Otha-Goto (1978); V_{s2} acorde a Marto, Soon y Kasim (2013); V_{s3} acorde a Sadovskii y otros investigadores (1973)

Código	Espesor	Suelo	δf	NSPT	V_{s1}	V_{s2}	V_{s3}
	3,6	Limo	1,16	5,0	117	142	---
	1,35	Arcilla	1,30	4,2	121	133	---
P1	0,9	Arena	1,45	7,0	149	162	---
	1,95	Limo	1,16	11,0	119	192	---
	2,25	Arcilla	1,65	5,0	121	14	---
P2	1,8	Tosca	1,80	14,0	224	210	---
	3,15	Arena	1,40	22,6	170	252	---
	2,55	Grava	1,80	12,4	211	201	---
P3	5,8	Caliza	1,80	22,7	277	253	---
	4,95	Arcilla	1,16	11,6	144	195	---
P4	2,05	Conglomerado	1,80	---	---	---	300
	4,95	Arcilla	1,16	25,0	164	262	---
P5	2,05	Arena	1,45	16,0	188	221	---
	4,05	Arena	1,45	25,0	172	262	---
P6	2,95	Caliza	1,80	60,0	296	366	---
	3	Limo	1,16	13,0	133	204	---
	1,8	Arena	1,45	28,0	182	274	---
P7	2,2	Gravas	1,80	---	---	---	300

	25,91	Limo	1,16	4,0	167	130,62	---
P8	5,06	Arcilla	1,65	16,0	220	221,20	---
	3,6	Lutita	1,80	19,0	213	236,13	---
	5,4	Limo	1,16	10,0	158	185,02	---
P9	1,35	Arena	1,45	15,0	190	215,84	---
	3,75	Arcilla	1,16	10,0	133	185,02	---
	1,65	Arenisca	1,60	33,0	191	291,25	---
P10	4,65	Arcilla	1,16	12,0	167	198,30	---
	7,4	Caliche	1,80	8,0	213	169,98	---
P11	2,4	Arcilla	1,16	7,0	152	161,57	---
	3,4	Caliche	1,80	11,0	192	191,85	---
P12	8,8	Arcilla	1,16	10,0	168	185,02	---
P13	8,6	Caliche	1,80	9,0	224	177,76	---
	8	Caliche	1,80	8,0	216	169,98	---
P14	1,2	Arcilla	1,16	5,0	141	142,18	---
	4,5	Bolos	1,80	50,0	263	341,06	---
	4,95	Limo	1,16	2,0	122	100,37	---
P15	12,75	Lutita	1,80	43,0	353	322,06	---
	3,15	Arcilla	1,16	3,0	105	117,09	---
	1	Arena	1,45	2,0	113	100,37	---
P16	6,3	Esquisto	2,60	25,4	277	263,47	---
	7,5	Caliza	1,80	15,0	237	215,84	---
	12	Arcilla	1,16	13,0	193	204,42	---
P17	1,5	Caliza	1,80	25,0	337	297,83	---
P18	6,8	Caliche	1,80	14,0	230	210,26	---
	2,32	Caliche	1,80	---	---	---	300
	8,84	Arcilla	1,65	26,0	195	266	---
P19	1,34	Lutita	1,80	---	---	---	500
	4,57	Arena	1,45	---	---	---	100
P20	3,23	Limo	1,16	---	---	---	200
	6	Arena	1,45	---	---	---	100
P21	1,35	Limo	1,16	---	---	---	200
	9,14	Arcilla	1,16	---	---	---	200
	4,39	Limo	1,16	---	---	---	300
P22	2,96	Lutita	1,80	---	---	---	500
	16,03	Limo	1,16	---	---	---	200
P23	1,34	Lutita	1,80	---	---	---	500

P24	2,7	Arena	1,45	50,0	178	341,06	---
P25	5,85	Arcilla	1,65	22,0	166	249,66	---
P26	5,4	Arena	1,45	---	---	---	100

Los FA a partir de la modelación 1D, para los 26 modelos geotécnicos no rocosos fueron calculados usando el código de cálculo PSHAKE (Sanó y Pugliese 1991). De la modelación se obtuvieron los espectros de respuesta dinámica de los suelos para cada uno de los modelos introducidos al programa. De esta manera es posible establecer el comportamiento dinámico y periodo fundamental (T) en segundos, así como su efecto en las estructuras para cada sección del espectro desde 0,1 s hasta 3,0 s (Tabla 4).

Tabla 4. Periodo fundamental (T) de la curva espectral del suelo para valores medios

Modelo	T (s)	Modelo	T (s)	Modelo	T (s)
P1	0,31	P10	0,32	P19	0,32
P2	0,20	P11	0,48	P20	0,51
P3	0,27	P12	0,43	P21	0,61
P4	0,20	P13	0,41	P22	0,26
P5	0,24	P14	0,42	P23	0,44
P6	0,15	P15	0,64	P24	0,09
P7	0,18	P16	0,35	P25	0,16
P8	1,02	P17	0,57	P26	0,60
P9	0,48	P18	0,29		

Los FA para cada caso fueron estimadas como la razón del espectro de salida de la modelación 1D sobre el espectro de entrada de UHRS, en el rango de periodos de 0,1 a 0,5 s (Tabla 5), según recomendaciones de normativas de cálculo para determinación de riesgo sísmico. Este rango de períodos es apropiado para edificaciones entre uno y cinco pisos.

Tabla 5. Factores de amplificación según modelación 1D

Modelos	FA_superior	FA_medio	FA_bajo
P1	2,040	1,629	1,263
P2	2,452	2,009	1,610
P3	2,448	1,973	1,539
P4	2,241	1,832	1,464
P5	1,851	1,497	1,171
P6	1,959	1,615	1,308
P7	2,198	1,802	1,447

P8	0,751	0,623	0,509
P9	1,063	0,860	0,681
P10	2,241	1,790	1,403
P11	1,383	1,119	0,893
P12	1,758	1,406	1,124
P13	1,707	1,357	1,080
P14	1,639	1,305	1,039
P15	0,792	0,655	0,532
P16	2,301	1,822	1,426
P17	1,031	0,849	0,685
P18	2,042	1,636	1,263
P19	2,029	1,615	1,256
P20	1,119	0,915	0,732
P21	0,888	0,733	0,594
P22	2,263	1,830	1,429
P23	1,426	1,147	0,911
P24	1,628	1,352	1,109
P25	2,078	1,710	1,381
P26	0,881	0,725	0,584

Por la poca densidad de modelos que cubrieran todas las litologías presentes, no fue posible confeccionar un mapa, pero sí se obtuvo un mapa con los factores amplificativos acorde con las disposiciones del código NEHRP (BSSC 2001) y sobre este se plotearon los FA de los 26 modelos (Figura 2b). Se obtuvieron valores de Fa de 0,61 a 2,0 (Figura 2b). El periodo fundamental de los espectros de respuestas está entre 0,16 s y 1,02 s.

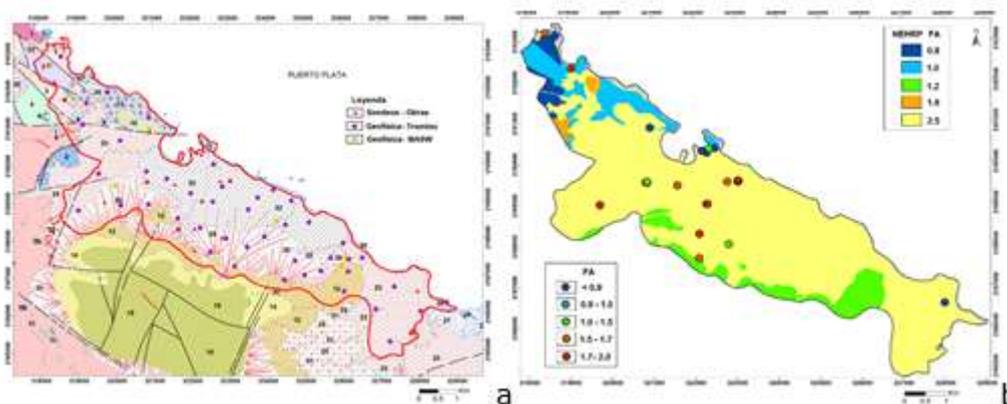


Figura 2. a) Ubicación de sondeos geotécnicos y geofísicos; b) FA acorde al Código NEHRP (BSSC 2001) y modelación 1D

Comparando los resultados, se observa que los FA basados en la modelación 1D muestran mayor variabilidad que los obtenidos por el código NEHRP, coincidiendo los mayores valores de amplificaciones en los sedimentos Neógeno-Cuaternarios mal compactados, que se clasifican como suelos rígidos o blandos (D-E), a excepción de los modelos 8, 20, 21, 23 y 26 y del modelo 16 que a pesar de que está en una formación rocosa, hasta los 10 m aparece arcilla y arena.

Los resultados de FA obtenidos según las disposiciones NEHRP muestran que en las rocas del complejo basal, rocas volcánicas, serpentinitas y calizas no se esperan amplificaciones, estas afloran en la parte noroeste de la ciudad y al noroeste. En pequeños sectores se esperan FA de 1,6; en una franja alargada al sur de la ciudad se esperan FA de 1,2 y coincidiendo con una extensa área de sedimentos cuaternarios se esperan las mayores amplificaciones de 2,5. Mientras que los FA obtenidos a partir de la modelación 1D tienen valores más bajos, no se esperan amplificaciones en los modelos 11 y 20, de amplificaciones en los modelos 8, 9, 15, 17, 21 y 26 y en el resto de los modelos existen amplificaciones entre 1,0 y 2,0.

4. CONCLUSIONES

- Los siete puntos de mediciones geofísicas con el método MASW tienen velocidades de la onda de corte V_{s30} entre 239 m/s y 364 m/s, correspondientes a clases de sitio D y C.
- Los factores de amplificación (FA) obtenidos para las 47 mediciones de micro vibraciones, a partir del cociente espectral H/V, están entre 2,03 y 8,00; con frecuencias fundamentales (f_0) de 0,12 Hz a 17,80 Hz.
- Se obtienen 26 modelos estratigráficos para toda el área de estudio de la ciudad de Puerto Plata, teniendo en cuenta la geología (descripción geológica: edad, descripción litológica, características estratigráficas, espesor de los sedimentos, etc.) e información geotécnica (propiedades físico-mecánicas: densidad-amortiguación). Las propiedades estáticas de los suelos (velocidad de la onda de corte) se definen por datos de prospecciones geofísicas, usando relaciones empíricas y valores tabulados.
- La mayor parte del área que ocupa el centro urbano de Puerto Plata está constituida por sedimentos recientes del Cuaternario, clasificados como E, dos de clase D, dos de clase C, cuatro de clase B y dos de clase A.
- Los FA, acorde con las disposiciones del código NEHRP, van desde 0,8 a 2,5, siendo estos últimos los que ocupan la mayor parte del área de estudio.

- Los FA de la modelación 1D tienen valores desde 0,6 hasta 2,0; coincidiendo las mayores amplificaciones con la parte urbanizada donde afloran los materiales antrópicos y sedimentos cuaternarios.

5. REFERENCIAS

- BSSC (Building Seismic Safety Council). 2001: *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new building and other structures*. Part 1 – Provisions. Washington D.C.: BSSC. 374 p.
- Marto, A.; Soon, T. and Kasim, F. 2013: A correlation of shear wave velocity and standard penetration resistance. *Electron J Geotech Eng (EJGE)*, 18(C): 463–471.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC). 2011: Reglamento para el Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras de la República Dominicana, R-001 y R-024. Decreto No 201-11. Dirección General de Reglamentos y Sistemas.
- Nakamura, Y. 1989: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst.*, 30.
- Ohta, Y. and Goto, N. 1978: Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6: 167-187.
- Ordaz, M.; Martinelli, F.; Aguilar, A.; Arboleda, J.; Meletti, C. and D'Amico, C. 2014: CRISIS 2014 Ver 1.2. Program for computing seismic hazard. Consultado: 24/08/2022. Disponible en: <http://www.iingen.unam.mx>
- República Dominicana. 2010: Mapa Geológico de Puerto Plata Escala 1: 50 000. Memoria Geológica 6075-II.
- Sadovskii, M. A.; Nersesov, I. L.; Medvedev, S. V. and Liamzina, G. A. 1973: Main principles of the seismic microzoning. *Voprosii Inzheniatoi Seismologii*, 15: 3-34.
- Sanó, T. and Pugliese, A. 1991: PSHAKE, Analisi Probabilistica della Propagazione delle Onde Sismiche. Ente per le Nuove Tecnologie, L'Energia e L'Ambiente (ENEA), Direzione Sicurezza e Protezione.

Información adicional

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

ZCRA: procesamiento, análisis e interpretación de las señales, elaboración de bases de datos y mapas, modelación del comportamiento del suelo y efecto de sitio; JPBA: campaña de mediciones geofísicas y procesamiento, análisis e interpretación de las señales; YHPA: campaña de mediciones geofísicas y efecto de sitio; MBRQ: campaña de mediciones geofísicas y efecto de sitio.

ORCID

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

JPBA, <https://orcid.org/0000-0002-1949-9687>

YHPA, <https://orcid.org/0000-0002-1992-2510>

MBRQ, <https://orcid.org/0000-0001-7800-4122>

Recibido: 10/05/2022

Aceptado: 06/01/2023