

Modelación estocástica de la aceleración del terreno para Cuba oriental y la ciudad de Santiago de Cuba

Stochastic modeling of ground acceleration for eastern Cuba and the city of Santiago de Cuba

Bladimir Moreno-Toirán^{1*}, Zulima Caridad Rivera-Álvarez¹, Mathilde Sørensen²

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

²Universidad de Bergen, Noruega.

*Autor para la correspondencia: bladimir@cenais.cu

Resumen

La región suroriental de Cuba constituye la zona de mayor peligrosidad sísmica del país por su cercana ubicación a la frontera de la placa del Caribe con la placa de Norteamérica. Este artículo presenta dos escenarios posibles de terremotos fuertes localizados a unos 30 km al sur de la ciudad de Santiago de Cuba en términos de aceleración pico del terreno (PGA) y aceleración espectral (PSA). Los valores de aceleración se calcularon para la mayoría de los municipios de la región oriental y para varios puntos de la ciudad de Santiago de Cuba. Se modelaron dos terremotos de magnitudes 7.0 y 7.3, con epicentro en la zona de falla Oriente. Fueron investigados parámetros necesarios en los cálculos como la caída de esfuerzos y la función de atenuación de las ondas sísmicas. Los resultados indican aceleraciones en roca significativas en los municipios de Santiago de Cuba y Guamá con valores que superan los 180 cm/s². Se obtiene además un mapa de sacudida para la ciudad de Santiago de Cuba considerando la amplificación espectral del suelo. Los valores máximos de aceleración espectral para periodos de 0.3 s alcanzan los 480 cm/s².

Palabras clave: aceleración pico del terreno; modelación estocástica; mapa de sacudida; aceleración espectral.

Abstract

Two possible scenarios of strong earthquakes located about 30 km south of the city of Santiago de Cuba are presented in terms of peak ground acceleration (PGA) and spectral acceleration (PSA). Acceleration values are calculated for most of the municipalities in the eastern region and for various points in the city of Santiago de Cuba. Two earthquakes of magnitudes 7.0 and 7.3 respectively were modeled with an epicenter in the Oriente fault zone. Several parameters necessary in the calculations were investigated such as the stress drop and the attenuation function of the seismic waves. The results indicate significant rock accelerations in the municipalities of Santiago de Cuba and Guama with values that exceed 180 cm/s^2 . A shake map is also obtained for the city of Santiago de Cuba considering the spectral amplification of the ground. The maximum spectral acceleration values for periods of 0.3 seconds reach 480 cm/s^2 .

Keywords: Peak ground acceleration; stochastic modeling; shakemap; spectral acceleration.

1. INTRODUCCIÓN

La región suroriental de Cuba constituye la zona de mayor peligrosidad sísmica del país (Álvarez, Lindholm y Villalón 2016). Por su ubicación cercana a la frontera de la placa del Caribe con la placa de Norteamérica (Figura 1) ha sido afectada por los terremotos más significativos que han ocurrido en Cuba a lo largo de la historia (Cotilla y Córdova 2010a, 2010b; Cotilla 2003). La sismicidad se concentra a lo largo de la falla Oriente donde principalmente predomina un movimiento lateral de rumbo con transtensión en la cuenca de Cabo Cruz y compresión en el cinturón deformado de Santiago (Moreno, Grandison y Atakan 2002; Calais y Mercier de Lepinay 1991). Esta zona de falla puede generar terremotos de magnitudes superiores a 7, lo cual ha ocurrido en el pasado con al menos 2 terremotos fuertes en 1766 y 1852, ambos ubicado en la vecindad de la ciudad de Santiago de Cuba.



Figura 1. Mapa tectónico del Caribe. NGF:Nipe-Guacanayabo Fault, NHT: North Hispaniola Trench, PRT: Puerto Rico Trench, GMP: Gonave Microplate, HB: Hispaniola Block, MCSC: Mid Cayman Spreading Center, LMT: Los Muertos Trench, SCFB: South Caribbean Fold Belt, SADB: South America Deformed Belt, NPDB: Northern Panama Deformed Belt, MAT: Middle America Trench, SMOB: Santa MartaBucaramanga Fault, BF: Bocono Fault, SPOF: San Sebastian-El Pilar-Oca Fault System, SAR: San Andres Rift, OF: Oriente Fault, CT: Cayman Trough, WF: Walton Fault, EPGF: Enriquillo Plantain Garden Fault, SF: Swan Fault, Y.Basin: Yucatan, C.Basin: Colombia, V.Basin: Venezuela Basin, MPASS: Mona Passage, APASS: Anegada Passage, CF: Camaguey Fault, TF: Trocha Fault, PF: Pinar Fault, PFZ: Pedro Fault Zone.

La simulación del movimiento del terreno provocada por los terremotos es una herramienta muy útil para los ingenieros civiles en el diseño de estructuras sismorresistentes (Sharbati *et al.* 2018; D'Amico *et al.* 2017). Este procedimiento es muy usado en zonas donde no existen o son muy escasos los registros reales de aceleración en el que se puedan caracterizar los parámetros de magnitud, distancia epicentral y respuesta del suelo. El objetivo principal es obtener uno o varios escenarios de la respuesta espectral de la aceleración del terreno para ser usado en los cálculos del riesgo sísmico de una zona o ciudad determinada. Los resultados obtenidos en la modelación del riesgo sísmico en términos de daños materiales y humanos se emplean en la confección de los planes de respuesta a un sismo de gran intensidad.

Este estudio se enfoca en la potencialidad de la zona de falla Oriente para la generación del movimiento del terreno en Cuba oriental y particularmente en la ciudad de Santiago de Cuba. En este caso fue seleccionado un segmento de la falla Oriente cercano a la ciudad de Santiago de Cuba. Los cálculos se realizaron con dos escenarios posibles de terremotos de magnitud 7.0 y 7.3

respectivamente, con lo que se obtuvieron los espectros de aceleración del terreno en varios puntos de Cuba oriental y un mapa de sacudida (ShakeMap) de la ciudad de Santiago de Cuba.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La modelación fue realizada con el programa EXSIM (Motazedian y Atkinson 2005; Boore 2009) con parámetros de entrada tomados de las referencias o calculados con un análisis de los registros de terremotos locales (Tabla 1). Primero se calculó el movimiento del terreno en roca para una malla regular de puntos que cubrían gran parte de la zona oriental de Cuba y luego se aplicó el espectro de amplificación del suelo en varios puntos de la ciudad de Santiago de Cuba (Rivera *et al.* 2015).

Tabla 1. Parámetros de entrada usados para la modelación. Detalles sobre los parámetros y su influencia en la modelación pueden ser encontrados en Motazedian y Atkinson (2005) y la documentación del programa EXSIM

Parámetros	Valor	Referencia
Parámetros de la fuente		
Fault plane origin	19.822N, 75.590W	Calais y Mercier de Lepinay, 1991
Moment magnitude M_w	7.0; 7.3	Este estudio
Fault dimensions	60 x 14 km; 90 x 16 km	Wells y Coppersmith, 1994
Strike	272	Calais y Mercier de Lepinay, 1991
Dip	70	Calais y Mercier de Lepinay, 1991
Subfault size	4 km x 2 km; 5 km x 2 km	Este estudio
Stress drop	35	Este estudio
Kappa	0.03	Este estudio
Parámetros del modelo de corteza		
Average S-wave velocity (β)	3.7	Este estudio
Average crustal density	2.8	Este estudio
Rupture velocity	0.8 β	Este estudio
Frequency dependent attenuation	$Q = 185 \cdot f^{0.5}$	Este estudio

Geometrical spreading model	1/R (R≤40km) 1/R ^{0.5} (R>40km)	Motazedian y Atkinson, 2005.
Duration model	T ₀ +0.05R(km)	Motazedian y Atkinson, 2005.
Otros parámetros		
Taper window	1 0.2 0.2	Motazedian y Atkinson, 2005.
Low-cut filter corner (Hz)	0.05 8	Motazedian y Atkinson, 2005.
Pulsing percent	50	Motazedian y Atkinson, 2005
Sample interval in seismogram (sec)	0.002	Este estudio
Slip distribution	Uniform	Este estudio

Existen dos parámetros de entrada necesarios en el proceso de modelación, (1) la caída de esfuerzos (*stress-drop*) y (2) la relación de atenuación de las ondas sísmicas (Q_0 , Q_{α} y K_{α}). Estos parámetros fueron investigados para el área de estudio como se describe a continuación.

2.1. Caída de esfuerzos y atenuación

Para obtener la caída de esfuerzos se procesaron los espectros de la fuente (Havskov y Ottemoller 2008) de cientos de terremotos locales obteniéndose un promedio de 35 bars. Para comprobar si este valor era adecuado para el área se modeló la aceleración pico (PGA) de seis terremotos de magnitudes mayores a 4 (Tabla 2) y se comparó con la observación real. La estación seleccionada fue Rio Carpintero por ser la más cercana a la ciudad de Santiago de Cuba. El valor de PGA observado es el resultado del promedio de las dos componentes horizontales.

Tabla 2. Sismos usados en la validación de la caída de esfuerzos

Epícentro		Estación (RCC)		Prof. (km)	M _w	Observado PGA(nm/s ²)	Fecha y hora
Longitud	Latitud	Longitud	Latitud				
-77.996	19.505	-75.696	19.995	10	5.1	2392310	2011/09/15 08:43 UTC
-76.435	19.101	-75.696	19.995	12	4.4	4904096	2012/03/10 08:34 UTC
-76.084	19.690	-75.696	19.995	8	4.2	12412910	2013/02/08 17:48 UTC
-77.053	19.741	-75.696	19.995	12	4.2	2315371	2013/12/21 10:53 UTC
-75.890	19.930	-75.696	19.995	13	4.2	96028624	2013/12/22 09:49 UTC
-76.350	19.700	-75.696	19.995	17	4.2	7214969	2014/08/25 23:59 UTC

Los resultados para diferentes valores de caída de esfuerzos usados en la validación se muestran en la Tabla 3 y Figura 2. Es evidente que la modelación con 15 bars subestima los datos observados y la de 50 bars los sobrestima. Note en la Figura 2 que el radio entre el PGA modelado y observado para diferentes distancias debe de estar cerca de 1 para que tengan valores parecidos. En este caso la caída de esfuerzo de 35 bars tiene cocientes cercanos a 1 para casi todas las distancias con excepción del evento más cercano que se encuentra a 25 km aproximadamente de la estación de Rio Carpintero. A esta corta distancia cualquier variación en la profundidad del foco podría variar abruptamente los valores calculados de PGA, por lo que esta incongruencia podría estar asociada a errores de localización del evento.

Tabla 3. Cociente Calculado/Observado de PGA para diferentes caídas de esfuerzos

Distancia Hipocentral (km)	Calculado/Observado PGA			M _w	Fecha y hora
	15 bars	35 bars	50 bars		
246.9	0.61	0.99	1.21	5.1	2011/09/15 08:43
126.6	0.63	1.04	1.28	4.4	2012/03/10 08:34
53.5	0.61	0.99	1.22	4.2	2013/02/08 17:48
145.1	0.57	0.96	1.17	4.2	2013/12/21 10:53
25.1	0.19	0.32	0.40	4.2	2013/12/22 09:49
77.7	0.61	0.99	1.21	4.2	2014/08/25 23:59

La relación de atenuación fue obtenida con el uso de los programas *qlg* y *automag* del paquete SEISAN (Havskov y Ottemoller 2008). Se seleccionaron 24 eventos de magnitudes mayores a 3.5 registrados por más de seis estaciones desde julio 2010 a junio 2014. Todos los eventos están localizados a lo largo de la zona de la falla Oriente. Los resultados para la función de atenuación fueron los siguientes: $Q_0=185$, $Q_{\alpha}=0.5$ y $\kappa=0.03$.

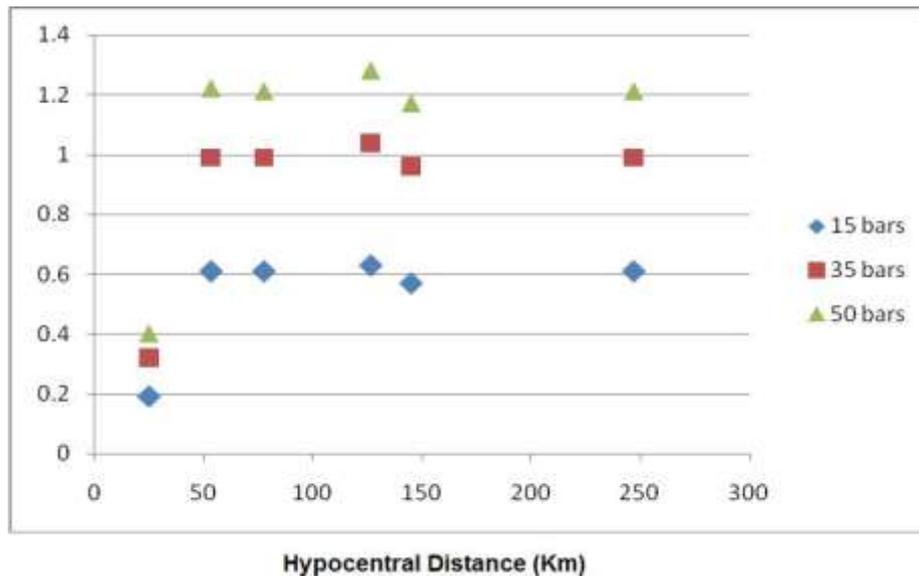


Figura 2. Cociente de PGA Calculado/Observado para diferentes caídas de esfuerzos (*stress-drop*).

3. RESULTADOS

La Figura 3 (A,B) muestra la aceleración pico (PGA) del movimiento simulado del lecho rocoso debido a un terremoto de magnitud $M_w = 7.0$ con caída de esfuerzos de 35 bars. Debido a la ubicación de la ruptura, el valor de aceleración más fuerte ocurre en alta mar. Sin embargo, se espera una sacudida del terreno que excede los 100 cm/s^2 en una gran área del sur de Cuba oriental, principalmente la ciudad de Santiago de Cuba, lo cual puede afectar seriamente las construcciones vulnerables.

Dado que la mayor parte del entorno construido en las ciudades de Cuba oriental son casas y edificios de baja altura, el potencial de daño de los terremotos está controlado en gran medida por la sacudida del terreno a frecuencias mayores a 3.3 Hz o periodos menores a 0.3 segundos. Por lo tanto, se presentó también la distribución de sacudidas del terreno para la aceleración espectral máxima (PSA) a una frecuencia de 3.3 Hz (Figura 3C, 3D). Se encontró que las aceleraciones espectrales en suelo rocoso superan los 200 cm/s^2 en una gran área del sur de Cuba, incluidas partes de la ciudad de Santiago de Cuba.

También se mostró el movimiento simulado del suelo en lecho rocoso debido a un evento $M_w = 7.3$ para caída de esfuerzos de 35 bars (Figura 4). Por el aumento de la longitud de la ruptura, un área más grande se ve afectada por la sacudida fuerte del terreno. Sin embargo, el nivel máximo de PGA en tierra es comparable al encontrado para el evento de magnitud 7.0. Se hace la misma observación para el PSA a una frecuencia de 3.3 Hz (Figura 4C, 4D), aunque para este parámetro de magnitud y sacudida del suelo, hay una débil influencia de directividad de ruptura en la distribución del movimiento del terreno.

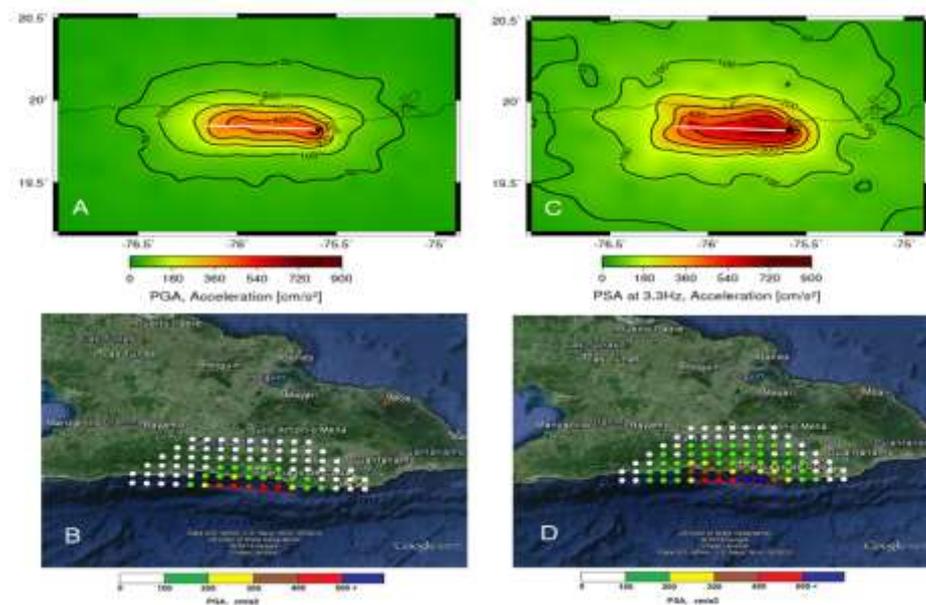


Figura 3. PGA (A,B) y PSA a 3.3 Hz (C,D) para $M_w=7.0$. Mapas inferiores muestran valores de algunos puntos seleccionados.

Se seleccionaron varias localidades (Tabla 4), principalmente municipios en el oriente de Cuba, para calcular la simulación del movimiento del terreno. Los valores para el escenario de dos terremotos, $M7.0$ (Tabla 5) y $M7.3$ (Tabla 6) se muestran en la Figura 5. Los valores más altos de movimiento del terreno corresponden a las localidades de Verraco, Siboney y Santiago de Cuba con PGA entre 100 cm/s^2 y 200 cm/s^2 en el caso de $M7.0$ y entre 150 cm/s^2 y 250 cm/s^2 para $M7.3$. Los valores de PSA a 3.3 Hz para estas localidades se encuentran entre 190 cm/s^2 y 340 cm/s^2 para $M7.0$ y entre 276 cm/s^2 y 358 cm/s^2 en el caso de $M7.3$.

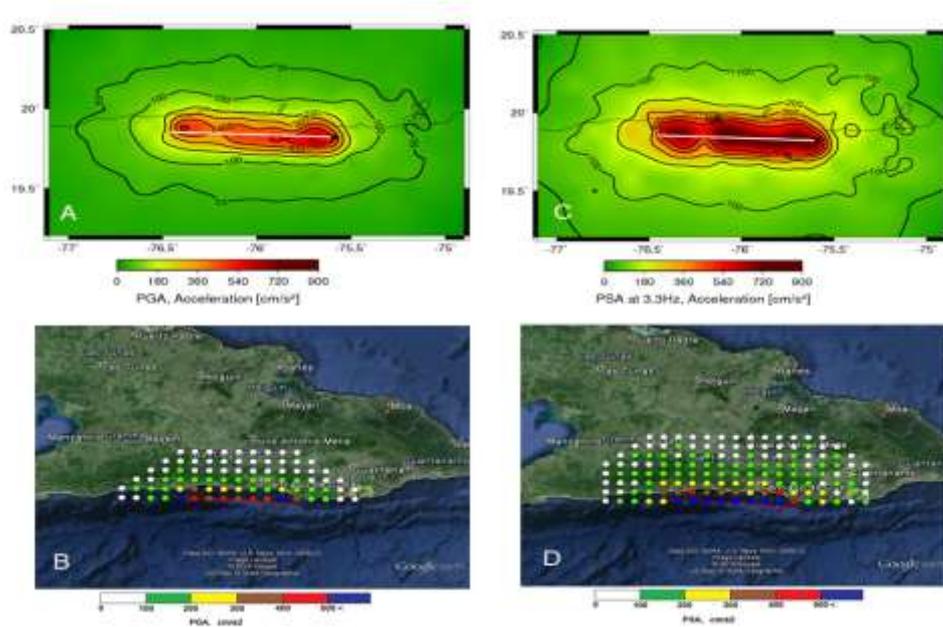


Figure 4. PGA (A,B) y PSA a 3.3 Hz (C,D) para Mw=7.3. Mapas inferiores muestran valores de algunos puntos seleccionados.

Tabla 4. Localidades seleccionadas en Cuba oriental

No.	Localidad	Provincia	Latitud	Longitud
1	Campechuela	Granma	20.2332	-77.2796
2	Media Luna	Granma	20.1444	-77.4362
3	Pilón	Granma	19.9055	-77.3207
4	Cabo Cruz	Granma	19.8421	-77.7278
5	Niquero	Granma	20.0479	-77.5790
6	Marea del Portillo	Granma	19.9165	-77.1906
7	B. Masó	Granma	20.1690	-76.9430
8	Yara	Granma	20.2767	-76.9469
9	Bayamo	Granma	20.3817	-76.6430
10	Manzanillo	Granma	20.3397	-77.1088
11	Guisa	Granma	20.2607	-76.5385
12	Jiguaní	Granma	20.3736	-76.4229
13	Río Cauto	Granma	20.5599	-76.9098
14	Buey Arriba	Granma	20.1754	-76.7557
15	Uvero	Santiago de Cuba	19.9530	-76.5940
16	Chivirico	Santiago de Cuba	19.9784	-76.4072
17	Contramaestre	Santiago de Cuba	20.3003	-76.2510

18	Palma	Santiago de Cuba	20.2136	-75.9922
19	San Luis	Santiago de Cuba	20.1881	-75.8487
20	La Maya	Santiago de Cuba	20.1678	-75.6473
21	Santiago	Santiago de Cuba	20.0169	-75.8305
22	Siboney	Santiago de Cuba	19.9606	-75.7079
23	Verraco	Santiago de Cuba	19.9060	-75.5773
24	Mella	Santiago de Cuba	20.3668	-75.9055
25	Niceto Pérez	Guantánamo	20.1237	-75.3269
26	El Salvador	Guantánamo	20.2096	-75.2231
27	Guantánamo	Guantánamo	20.1367	-75.2139
28	Baracoa	Guantánamo	20.3485	-74.5106
29	La Máquina	Guantánamo	20.1914	-74.2275
30	Imías	Guantánamo	20.0687	-74.6257
31	San A. del Sur	Guantánamo	20.0570	-74.8080
32	Yateritas	Guantánamo	19.9957	-74.9947
33	Manuel Tames	Guantánamo	20.1804	-75.0514
34	Caimanera	Guantánamo	19.9913	-75.1532
35	Moa	Holguín	20.6588	-74.9512
36	Mayari	Holguín	20.6592	-75.6790
37	Banes	Holguín	20.9746	-75.7125
38	Holguín	Holguín	20.8914	-76.2604
39	Las Tunas	Las Tunas	20.9593	-76.9569

Tabla 5. Valores del movimiento del terreno en roca para cada localidad mostrada en Tabla 4. Mw=7.0

No	PGV(cm/s)	PGA(cm/s ²)	PSA(cm/s ²)			
			0.5 Hz	1 Hz	3.3 Hz	5 Hz
1	1.997	10.51	9.284	14.23	22.36	21.67
2	2.019	12.32	9.298	16.10	28.71	28.53
3	2.183	16.14	8.139	19.41	34.71	30.95
4	1.217	7.149	5.724	8.586	16.13	12.78
5	2.027	10.53	9.245	15.91	27.47	19.09

6	2.324	14.74	8.553	22.96	31.79	46.41
7	2.120	19.56	10.19	14.10	27.90	44.72
8	1.977	11.51	8.048	14.60	27.97	31.88
9	4.795	27.30	22.19	21.58	54.45	57.46
10	1.730	8.138	7.457	14.36	20.40	19.27
11	5.705	38.72	20.38	32.34	108.1	99.75
12	3.994	26.77	13.00	25.69	53.75	60.60
13	2.573	14.85	13.85	16.18	37.99	36.49
14	4.391	28.90	22.06	28.24	51.68	68.72
15	2.976	24.98	13.42	25.18	54.77	55.64
16	5.663	68.55	20.01	36.06	89.22	137.8
17	3.349	29.32	14.70	28.17	55.43	78.99
18	5.953	51.53	27.89	56.29	97.27	119.1
19	6.324	59.86	22.32	41.73	104.7	142.8
20	7.095	51.11	23.21	49.00	107.5	143.7
21	12.38	108.1	50.95	105.6	191.7	220.4
22	13.40	167.8	58.27	106.7	341.9	301.3
23	12.22	197.9	50.10	101.8	240.5	416.5
24	4.168	35.84	15.45	33.81	79.96	88.49
25	4.312	47.05	25.31	45.53	100.9	131.3
26	3.937	37.61	15.13	26.36	80.66	82.20
27	4.304	40.41	17.23	28.25	71.00	77.37
28	2.926	12.75	11.91	18.64	32.87	29.44
29	1.847	9.076	9.393	11.84	20.80	14.88
30	2.535	18.99	12.29	21.19	41.28	42.19
31	3.753	22.35	15.13	25.23	45.32	56.89

32	2.628	25.33	11.07	19.82	60.08	58.15
33	3.770	29.57	14.82	24.53	60.64	72.75
34	2.732	22.42	15.35	23.09	43.57	49.58
35	1.849	10.09	7.819	15.74	24.46	23.69
36	2.308	17.87	13.35	24.28	42.59	43.77
37	2.856	13.85	13.04	16.66	31.85	33.96
38	2.409	14.04	11.25	22.78	32.97	30.21
39	2.388	9.997	11.60	17.11	22.14	21.32

Tabla 6. Valores del movimiento del terreno en roca para cada localidad mostrada en Tabla 4. Mw=7.3

No	PGV(cm/s)	PGA(cm/s ²)	PSA(cm/s ²)			
			0.5Hz	1Hz	3.3Hz	5Hz
1	3.192	22.83	9.161	29.21	38.91	43.02
2	2.407	12.73	10.21	13.79	31.96	27.49
3	3.652	28.57	18.83	29.47	57.92	54.90
4	3.711	15.19	12.26	16.61	36.15	33.99
5	2.548	16.68	13.97	21.49	31.99	48.18
6	5.451	34.80	17.62	40.49	70.86	61.75
7	5.999	38.11	31.61	35.34	82.79	85.82
8	3.882	29.60	15.03	32.82	64.30	67.55
9	6.039	40.28	21.52	43.17	83.44	93.52
10	5.378	24.17	19.90	33.99	48.39	55.39
11	6.687	50.65	25.40	43.11	91.49	110.6
12	5.382	44.65	23.83	42.97	92.11	113.4
13	4.231	24.14	15.07	29.98	45.78	48.33
14	5.083	49.32	19.86	48.39	122.6	112.5

15	9.198	115.1	34.75	66.43	193.3	217.3
16	13.42	193.1	35.98	122.9	259.2	409.4
17	7.548	51.87	30.99	44.43	85.17	108.3
18	7.591	60.83	31.44	59.52	117.0	153.7
19	7.000	59.48	30.86	55.21	123.4	120.0
20	8.696	68.28	32.04	63.32	115.3	155.5
21	12.06	161.5	69.88	99.05	276.1	267.8
22	17.82	180.0	59.56	104.5	273.3	415.2
23	20.41	241.6	75.34	151.6	357.9	440.1
24	5.861	42.68	29.42	34.86	96.72	93.63
25	4.514	34.52	18.37	31.38	75.46	82.09
26	3.992	26.86	17.17	23.63	63.13	62.42
27	3.423	25.20	16.12	28.97	51.04	61.21
28	3.160	15.20	11.22	21.95	36.43	37.50
29	2.931	15.30	10.66	19.61	31.60	26.74
30	4.453	21.75	10.75	22.27	41.77	44.04
31	5.130	24.48	16.43	38.97	53.87	60.24
32	3.500	19.17	16.68	21.17	49.17	43.29
33	4.539	32.77	13.71	37.29	77.20	76.47
34	7.157	51.07	28.40	40.42	117.8	102.5
35	3.456	18.39	14.33	21.29	39.09	35.44
36	4.896	23.97	21.02	37.30	56.60	53.27
37	3.037	14.09	13.37	25.29	36.23	34.11
38	3.325	21.58	18.17	22.66	39.98	40.46
39	2.295	13.70	10.10	16.21	29.35	26.78

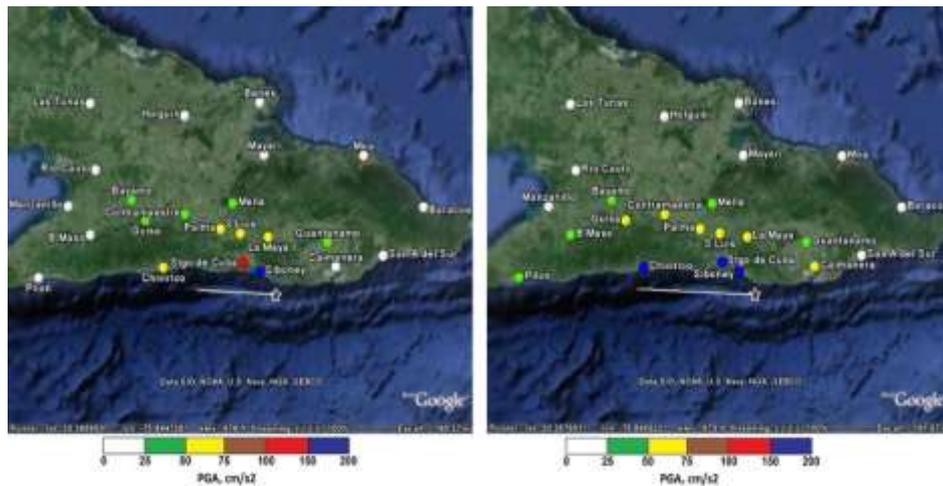


Figura 5. PGA en roca para algunas localidades de Cuba oriental. $M_w=7.0$ (Izquierdo) y $M_w=7.3$ (derecho).

3.1. Mapa de sacudida (*ShakeMap*) de la ciudad de Santiago de Cuba

Los datos de amplificación del sitio están disponibles para una cuadrícula regular que cubre la ciudad de Santiago de Cuba. Los espectros se han derivado de modelos de amplificación de suelo 1D (Sanò y Pugliese 1991) y 2D (Sanò 1996) basados en mapas geológicos regionales, mapas ingenieros geológicos de suelo, perfiles geológicos regionales y datos de pozos profundos (Rivera *et al.* 2015). La información de amplificación espectral del sitio se presenta en la Figura 6 con la amplificación promedio en diferentes bandas de frecuencias. A partir de estas cifras, está claro que se puede esperar una gran amplificación (hasta un factor de 2) en varias partes de la ciudad, especialmente en períodos inferiores a 0,5 segundos.

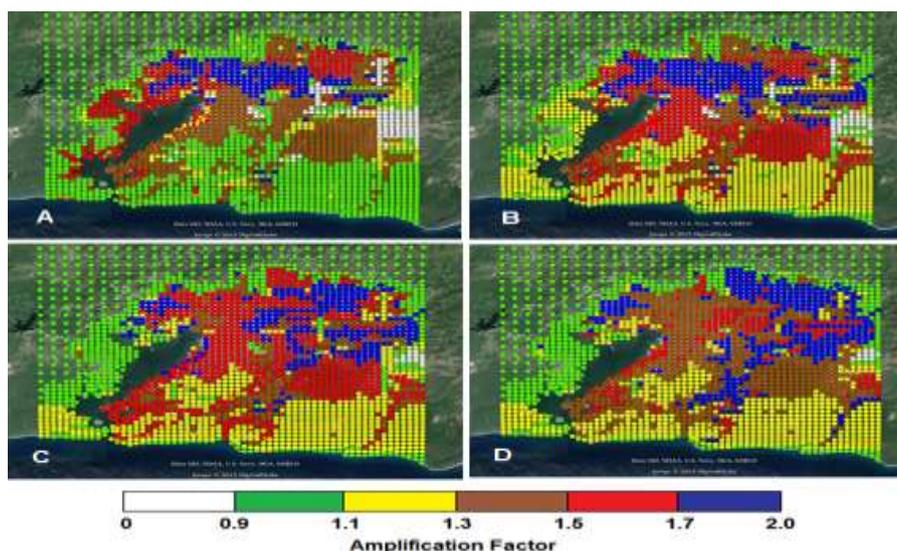


Figura 6. Factor promedio de amplificación espectral del suelo en la ciudad de Santiago de Cuba para diferentes rangos de períodos (segundos): (A) 0.05-0.15, (B) 0.15-0.25, (C) 0.25-0.35, (D) 0.35-0.45.

Para tener referencias de diferentes partes de la ciudad se seleccionaron ocho puntos para calcular el movimiento del terreno en roca para el escenario M7.0 (Tabla 7 y Figura 7). Se observan cambios significativos en los valores del movimiento del terreno al moverse desde puntos cercanos a la línea de costa hasta el centro de la ciudad. Esto indica que los valores de movimiento del suelo podrán cambiar drásticamente a distancias cortas cuando los sitios se encuentran cerca de la fuente del terremoto.

Tabla 7. Valores del movimiento del terreno en roca para magnitud $M_w=7.0$ de algunos puntos de la ciudad de Santiago de Cuba

Sitio	PGA (cm/s^2)	PGV (cm/s)	PSA(cm/s^2)			
			0.5Hz	1.0Hz	3.3Hz	5.0Hz
Centro ciudad	107.5	9.1	36.6	80.3	209.0	272.1
El Morro	182.9	13.2	56.7	90.0	316.6	296.8
Ciudamar	179.5	17.6	62.5	166.4	349.7	341.4
Punta Gorda	124.9	11.5	60.9	104.0	268.0	313.6
Vista Alegre	98.2	7.5	40.4	62.9	235.1	236.9
M7 José Martí	91.7	8.8	44.7	86.4	158.4	217.4
R. Santa María	99.9	9.2	36.8	83.1	213.7	241.1
M2 Abel Sant.	124.2	11.6	39.1	82.6	241.7	271.7

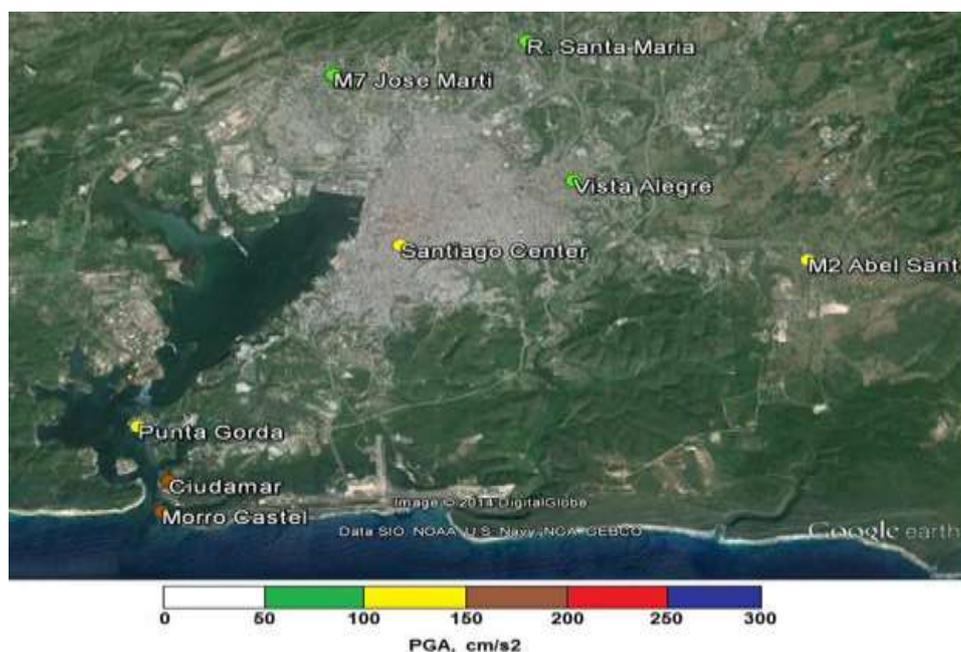


Figura 7. PGA en roca para algunos puntos de la ciudad de Santiago de Cuba. $M_w=7.0$.

Además, se muestran los valores del movimiento del terreno en roca de varios puntos de la ciudad de Santiago de Cuba para el escenario M7.3 (Tabla 8).

Tabla 8. Valores del movimiento del terreno en roca para magnitud $M_w=7.3$ de algunos puntos de la ciudad de Santiago de Cuba

Sitio	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	PSA(cm/s ²)			
			0.5Hz	1.0Hz	3.3Hz	5.0Hz
Centro ciudad	118.0	12.4	53.8	102.5	215.5	308.5
El Morro	189.6	15.4	72.2	123.0	312.7	392.0
Ciudamar	172.9	13.2	55.0	120.6	355.6	368.8
Punta Gorda	154.0	15.1	50.1	121.4	257.5	313.9
Vista Alegre	111.9	10.2	53.2	95.8	204.8	310.5
M7 José Martí	108.3	10.4	44.3	82.8	161.2	267.5
R. Santa María	119.1	14.3	51.5	106.2	201.4	220.8
M2 Abel Sant.	127.2	11.2	62.1	89.7	269.6	286.0

La Figura 8 muestra el escenario del mapa de sacudidas para la ciudad de Santiago de Cuba utilizando los espectros de amplificación del sitio para ambos escenarios de terremotos fuertes. Téngase en cuenta que en el punto definido como centro de Santiago se obtiene un factor de amplificación de aproximadamente 2 (Tabla 9). La mayoría de los valores de PGA (Figura 8A,8B) en el centro de la ciudad están entre 150 cm/s² y 300 cm/s² y los valores en algunos puntos aumentan hasta 400 cm/s². Los valores de PSA a 3,3 Hz o período de 0,3 segundos (Figura 8C,8D) superan los 480 cm/s² en varios puntos de la ciudad para ambos escenarios de terremotos, lo que tiene un efecto significativo en los edificios de baja a mediana altura de la ciudad.

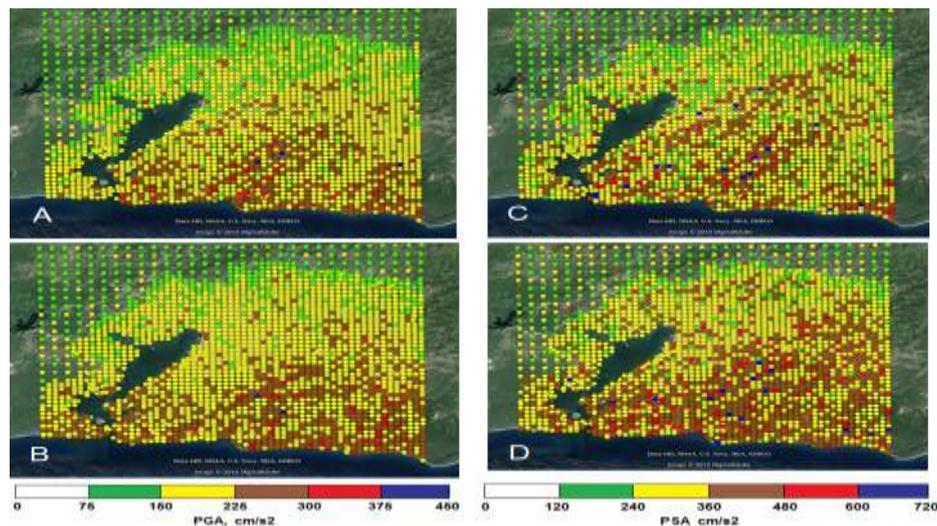


Figura 8. PGA y PSA a 3.3 Hz para la ciudad de Santiago de Cuba usando la amplificación espectral del suelo. $M_w=7.0$ (A,C) y $M_w=7.3$ (B,D).

Tabla 9. PGA para roca y suelo para ambos escenarios considerando la amplificación espectral

Sitio	PGA(cm/s^2) $M_w=7.0$			PGA(cm/s^2) $M_w=7.3$		
	Roca	Suelo	Amp.	Roca	Suelo	Amp.
Centro ciudad	107.5	208.0	1.93	118.0	209.7	1.78
El Morro	182.9	234.3	1.28	189.6	213.4	1.13
Ciudamar	179.5	186.3	1.04	172.9	192.6	1.11
Punta Gorda	124.9	161.2	1.29	154.0	201.9	1.31
Vista Alegre	98.2	192.1	1.96	111.9	172.1	1.54
M7 Jose Marti	91.7	155.8	1.70	108.3	164.8	1.52
R. Santa Maria	99.9	150.5	1.51	119.1	169.0	1.42
M2 Abel Sant.	124.2	114.2	0.92	127.2	107.4	0.84

4. DISCUSIÓN

Realizar un estimado confiable en el parámetro de caída de esfuerzos a utilizar para la modelación de escenario de terremotos fuertes es fundamental debido a que tiene una influencia significativa en los valores del movimiento del terreno que se obtienen. Por ejemplo, en el centro de Santiago de Cuba se observa que los valores de PGA, usando una caída de esfuerzos de 35 bars, aumentan 63 % cuando se usa 70 bars (Tabla 10).

Tabla 10. Aceleración pico en roca (PGA) para diferentes caídas de esfuerzos (stress-drop) en algunos puntos de la ciudad de Santiago de Cuba. No se usó la amplificación espectral del suelo

Sitio	PGA(cm/s ²) Mw=7.0			PGA(cm/s ²) Mw=7.3		
	35 bars	50 bars	70 bars	35 bars	50 bars	70 bars
Centro ciudad	107.5	136.3	170.4	118.0	160.5	200.9
El Morro	182.9	231.9	290.0	189.6	247.7	310.0
Ciudamar	179.5	227.4	284.2	172.9	233.9	292.8
Punta Gorda	124.9	158.8	199.2	154.0	223.5	279.7
Vista Alegre	98.2	124.7	156.2	111.9	157.1	196.8
M7 José Martí	91.7	116.1	145.2	108.3	141.3	176.9
R. Santa María	99.9	129.1	161.5	119.1	136.3	170.6
M2 Abel Sant.	124.2	157.3	196.5	127.2	180.7	226.2

Este tipo de trabajo se considera como un estudio de peligro sísmico determinístico (Mase 2020, Zhang *et al.* 2021) que resulta muy adecuado en zonas de baja actividad sísmica a diferencia de los estudios de peligro sísmico probabilísticos (Candia *et al.* 2019). Estos últimos pueden subestimar los valores de aceleración del terreno esperados debido a la falta de evidencias históricas de terremotos fuertes, ya que los cálculos dependen de lo que ha sucedido en el pasado. Existen zonas en el mundo donde la tasa anual de deformación de la corteza a lo largo de una falla tectónica es muy lenta, por lo que muchas veces no tienen evidencias de terremotos fuertes en un catálogo de 500 años de historia. Pero esto no quiere decir que está exento de un terremoto fuerte, solo que puede haber sucedido cientos de años atrás.

Otra desventaja de los estudios de peligro sísmico probabilísticos es que no tienen en cuenta la influencia del lapso del tiempo ocurrido desde el último terremoto fuerte en una zona determinada. Por ejemplo, luego de que una falla tectónica libera toda la deformación acumulada provocando un terremoto de gran magnitud, necesitaría muchos años en volverse a repetir si se considera una baja tasa de deformación anual. Si un terremoto fuerte en una zona de baja sismicidad ha ocurrido recientemente implica que la probabilidad de que se pueda repetir en el tiempo de vida útil que tiene una edificación específica es muy baja.

5. CONCLUSIONES

- Los dos escenarios de terremotos considerados en este estudio con hipocentro ubicado a unos 30 km al sureste de la ciudad de Santiago de Cuba indican que es posible obtener PGA en suelo rocoso de la

ciudad entre 100 cm/s² y 180 cm/s². Municipios como San Luis, La Maya y Palma, el PGA podrá alcanzar valores entre 50 cm/s² y 75 cm/s². Para el escenario de terremoto de M7.3, el municipio de Guamá (Chivirico) podrá alcanzar valores de PGA de hasta 190 cm/s².

- El mapa de sacudidas para la ciudad de Santiago de Cuba muestra grandes valores de aceleración del terreno en varios puntos de la ciudad cuando se considera la respuesta espectral del suelo, particularmente en el casco histórico, una de las zonas más vulnerables, donde el PGA podrá alcanzar valores de 375 cm/s² para ambos escenarios de terremotos. El PSA a 3.3 Hz podrá afectar a edificios de baja y media altura con valores superiores a 480 cm/s².

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado bajo el financiamiento del Ministerio de Asuntos Exteriores Noruego (MFA), administrado por la Dirección de Protección Civil Noruega (DSB). Agradecemos el apoyo brindado por el Departamento de Geociencias de la Universidad de Bergen y el Instituto NORSAR.

7. REFERENCIAS

- Álvarez, L.; Lindholm, C. y Villalón, M. 2016: Seismic Hazard for Cuba: A New Approach. *Bull. Seism. Soc. Am*, 107(1): 229-239. doi: 10.1785/0120160074.
- Boore, D. M. 2009: Comparing Stochastic Point-Source and Finite-Source Ground-Motion Simulations: SMSIM and EXSIM. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99: 3202-3216.
- Calais, E. y Mercier de Lepinay, B. 1991: From transtension to transpression along the northern Caribbean plate boundary off Cuba: implications for the Recent motion of the Caribbean plate. *Tectonophysics*, 186: 329-350.
- Candia, G.; Macedo, J.; Jaimes, M. A. y Magna, C. 2019: A new State-of-the-Art Platform for Probabilistic and Deterministic Seismic Hazard Assessment. *Seismological Research Letters*, 90(6): 2262-2275.
- Cotilla, M. O. y Córdova, D. 2010a: Notes on three earthquakes in Santiago de Cuba (14.10.1800, 18.09.1826, 07.07.1842). *Russian Geology and Geophysics*, 51: 228-236
- Cotilla, M. O. y Córdova, D. 2010b: The August 20, 1852 earthquake in Santiago de Cuba, *Russian Geology and Geophysics*, 51: 1227-1246
- Cotilla, M. O. 2003: The Santiago de Cuba earthquake of 11 June 1766: Some new insights. *Geofísica Internacional*, 42(4): 589-602.
- D'Amico, M.; Tiberti, M. M.; Russo, E.; Pacor, F. y Basili, R. 2017: Ground-Motion Variability for Single Site and Single Source through Deterministic

- Stochastic Method Simulations: Implications for PSHA. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 107(2): 966-983. DOI: 10.1785/0120150377.
- Havskov, J. y Ottemoller, L. (Eds.) 2008: SEISAN, The earthquake analysis software for Windows, SOLARIS, LINUX and MACKINTOSH Version 8.2. Manual, Department of Earth Science, University of Bergen, Norway.
- Moreno, B.; Grandison, M. y Atakan, K. 2002: Crustal velocity model along the southern Cuba margin: implications for the tectonic regime at an active plate boundary. *Geophys. J. Int.*, 151(2): 632-645.
- Mase, L. Z. 2020: Seismic Hazard Vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, Based on Deterministic Seismic Hazard Analysis. *Geotech Geol Eng* 38, 5433-5455. DOI: 10.1007/s10706-020-01375-6.
- Motazedian, D. y Atkinson G. M. 2005: Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95: 995-1010.
- Rivera, Z. C.; Slejko, D.; Caballero, L. F.; Alvarez, J. L. y Santulin, M. 2015: Soil amplification in Santiago de Cuba. Journal: Atti del 34 Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida. Tema 2: Caratterizzazione sismica del territorio. ISBN: 978-88-940442-6-3.
- Sanò, T. y 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.
- Sanò, T. 1996: BESOIL un programma per il calcolo della propagazione delle onde sismiche. Servizio Sismico Nazionale.
- Sharbati, R.; Khoshnoudian, F.; Ramazi, H. R. y Amindavar, H. R. 2018: Stochastic modeling and simulation of ground motions using complex discrete wavelet transform and Gaussian mixture model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114: 267-280. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.07.003.
- Wells, D. y Coppersmith, K. 1994: New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84: 974-1002.
- Zhang, Y.; Romanelli, F.; Vaccari, F.; Peresan, A.; Jiang, C.; Wu, Z.; Gao, S.; Kossobokov, V. G. y Panza, G. F. 2021: Seismic hazard maps based on Neo-deterministic Seismic Hazard Assessment for China Seismic Experimental Site and adjacent areas. *Engineering Geology*, 291. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106208.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

BMT: procesamiento de todos los datos y redacción, revisión y aprobación final del artículo

ZRA: procesamiento de los datos relacionados a los factores de amplificación del terreno de la ciudad de Santiago de Cuba y redacción del artículo

MS: asesoría en el procesamiento de los datos, redacción del artículo y aprobación de la versión final.

ORCID

BMT, <http://orcid.org/0000-0002-7830-5184>

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

MS, <http://orcid.org/0000-0002-8589-7480>

Recibido: 06/12/2021

Aceptado: 08/07/2022