Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2023 Vol.23, No. 1, pp. 11-23 ISSN 1729-3790

Caracterización de los registros acelerográficos obtenidos por la red del Servicio Sismológico Nacional de Cuba

Oscar Alejandro Sánchez-Sánchez, Ernesto Alejandro Piloto-Zaldívar y Omar González-Trujillo

Instituto de Geofísica y Astronomía, Departamento de Geofísica Espacial, Cuba;
E:mail: ssaoscar13@gmail.com, ernestoalejandropiloto@gmail.com, *ORCID: 0000-0003-0162-7529.*
omarito@iga.cu, ORCID: 0000-0001-8811-1394

Recibido: noviembre 2022	Aceptado: diciembre 2022

Resumen

La caracterización de los registros acelerográficos permite determinar los parámetros del movimiento fuerte del suelo. Este trabajo fue llevado a cabo con los datos de la red acelerográfica del Servicio Sismológico Nacional de Cuba, se recopilaron 17 terremotos fuertes y moderados desde 2017 hasta octubre de 2021. Estos registros se procesaron en el programa SeismoSignal y se obtuvieron los parámetros: PGA, PGV, PGD, Intensidad de Arias, período predominante, duración efectiva, entre otros. Los mayores valores de estos parámetros se alcanzaron en la componente vertical para los terremotos fuertes, en los que las componentes horizontales no tuvieron variaciones significativas en los valores registrados. Al comparar los acelerogramas en función de la distancia epicentral fue posible identificar la marcada influencia del efecto de sitio sobre los valores de aceleración independientemente de la distancia e identificar el efecto de direccionalidad de la fuente sísmica en el caso de los terremotos fuertes distantes.

Palabras clave: duración efectiva, Intensidad de Arias, parámetros del movimiento fuerte del suelo, período predominante, registros acelerográficos.

Characterization of accelerographic recordings obtenied for the network of the Cuban National Seismological service

Abstract

The characterization of accelerographic recordings allows to determine strong ground motion parameters. This work was carried out using data from the accelerographic network of the Cuban National Seismological Service, 17 moderate and strong earthquakes were collected between 2017 and October 2021. These records were processed with the program SeismoSignal, which made possible to obtain parameters such as PGA, PGV, PGD, Arias Intensity, predominant period, effective duration, among others. The maximum values of such parameters were reached in the vertical components of the strong earthquake records whereas no significant variations were observed in the horizontal components. When the accelerograms were compared as a function of epicentral distance it allowed to identify the strong influence of site effects on acceleration values regardless of the distance as well as source directivity effect in case of strong distant events.

Keywords: accelerographic records, Arias Intensity, effective durations, ground strong motion parameters, predominant period.

1. Introducción

La medición, interpretación y estimación de los movimientos fuertes del suelo generados por terremotos potencialmente dañinos constituyen una rama importante de la Sismología. Estos datos permiten comprender la naturaleza de los procesos de ruptura sísmica en la corteza y de la radiación sísmica desde la fuente. Son usados para desarrollar descripciones empíricas de las características del movimiento fuerte del suelo, relaciones de atenuación, para conocer qué efectos producen en las estructuras, para mejorar los códigos de construcción en zonas sísmicas y estudiar el riesgo sísmico (Atkinson and Boore 2003; Abrahamson and Silva 2008; Zonno and Montaldo 2002; Ambraseys et al 2005; Mezcua et al 2008; Perrault and Gueguen 2015). Estos estudios contribuyen a mejorar el conocimiento científico de los procesos físicos que controlan el movimiento fuerte del suelo y a desarrollar estimados confiables de la peligrosidad sísmica para la reducción de las pérdidas a través de mejoras en el diseño sismorresistentes y la rehabilitación.

En la práctica de la observación sismológica las redes de estaciones poseen sismómetros con una alta sensibilidad, capaces de registrar terremotos cercanos y distantes a partir de magnitudes muy bajas. Sin embargo, estos registros se saturan cuando ocurren terremotos fuertes muy cercanos a ellos haciéndolos inutilizables. Es por ello que se han instalado las redes acelerográficas, cuyos instrumentos poseen la capacidad de registrar estos terremotos fuertes sin saturarse, permitiendo medir la aceleración sísmica, como uno de los parámetros de mayor interés (Tsai and Huang 2000; Schmidt y Quirós 2007; Ameri et al 2009).

En Cuba, el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIS) posee una red de estaciones para el monitoreo de la actividad sísmica y se encuentra en la implementación de una red acelerográfica para el estudio de los terremotos fuertes en el área de Cuba. Esta última red ha registrado un número significativo de terremotos tanto débiles ($M<4$) como moderados ($M\geq 4$) y fuertes ($M\geq 6$), aunque estos últimos fueron sentidos en el país no generaron daños debido a que ocurrieron a más de 100 km de distancia. Estos registros constituyen una base de datos relevante para nuevas investigaciones en el campo de la ingeniería sísmica y la sismología. Por lo tanto, se hace necesario caracterizar los parámetros del movimiento del suelo causados por estos terremotos como punto de partida para estas investigaciones.

Los estudios del movimiento fuerte del suelo registrados por esta red son incipientes y escasos. Algunas investigaciones son Márquez et al (2002) en la se realizó un análisis de los primeros acelerogramas obtenidos en Cuba por la Red Acelerográfica del CENAIS. Este trabajo constituye una de las investigaciones pioneras sobre el tema, su objetivo fue obtener información sobre los parámetros ingenieriles fundamentales: amplitudes máximas en cada componente, período o frecuencia fundamental en las diferentes componentes, duración del registro y determinación de la magnitud a partir de la aceleración máxima, con fines de Ingeniería Sísmica. En Rosabal et al (2020) se realiza un esquema de isoaceleraciones producidas por un terremoto, estableciendo correlaciones con la geología local, la microzonación y las intensidades sísmicas reportadas. Villalón et al (2020) analizaron el terremoto del 28 de enero de 2020 con Mw 7,7 y presentaron una caracterización de los parámetros del movimiento fuerte del suelo: aceleración pico, Intensidad de Arias, así como los parámetros espectrales de dicho terremoto en los diferentes sitios de registro. Ambas investigaciones se limitan al estudio de terremotos individuales y no al conjunto de terremotos registrados por la red acelerográfica.

La sismicidad de Cuba está determinada por la interacción de las placas tectónicas de Norteamérica y del Caribe, en cuyos límites se encuentran sistemas de fallas tectónicas capaces de generar terremotos fuertes; donde se ha registrado históricamente la mayor sismicidad y peligrosidad sísmica del país, vinculada a la falla Oriente (Bartlett – Caimán). Es esta estructura tectónica la que tiene mayor potencialidad de producir daños en la infraestructura, edificaciones y elementos expuestos en el territorio suroriental de Cuba. En esta región se han reportado 22 terremotos fuertes (Chuy Rodríguez 1999). Por ello se hace imprescindible continuar con las investigaciones relacionadas con los registros acelerográficos para ampliar los datos sobre el comportamiento de los parámetros de los terremotos registrados, y poder en lo posible estimar el impacto de futuros terremotos fuertes.

El objetivo de este trabajo es caracterizar los registros acelerográficos de los terremotos moderados y fuertes registrados por la red acelerográfica cubana, los resultados podrán ser empleados para calibrar los modelos de atenuación empleados, para estudiar la posible dependencia de la forma de la respuesta espectral en función de las condiciones litológicas del sitio, entre otras investigaciones en el campo de la sismología.

También podrán ser empleados en investigaciones de ingeniería sísmica para realizar análisis dinámicos lineales y no lineales ya que una caracterización adecuada de los registros acelerográficos permite elegir señales que, según las características de la edificación, incidan en la aparición de daños.

Esta investigación es actual ya que se inserta dentro de los objetivos de trabajo del Programa DISA – "Desarrollo de Investigaciones Sismológicas Aplicadas en Cuba" del CENAIS que apunta a desarrollar un sistema de investigaciones sismológicas básicas y aplicadas que garantice elevar el nivel científico – técnico en el país, para asegurar los planes inversionistas y de desarrollo, así como, el fortalecimiento del sistema de prevención de desastres sísmicos en la República de Cuba. Es una contribución a los resultados del proyecto de investigación aplicada "Determinación del efecto de sitio en la ciudad de Santiago de Cuba utilizando registros acelerográficos" que se ejecuta en el CENAIS.

Entre los resultados se observó que el efecto de direccionalidad de la fuente sísmica fue identificado al analizar los acelerogramas del terremoto fuerte de Mw7,2, para el cual la componente vertical registró los mayores valores de PGA, Intensidad de Arias, amplitud de Fourier y duración efectiva, siendo estos de 112,722 cm/s^2; 0,8 m/s, 458,694 y 89,090 s respectivamente. Debido a estos resultados se llegó a la conclusión que la distancia epicentral generó poca influencia en los registros de aceleración, en los que los efectos de sitio, dígase condiciones geológicas del lugar de emplazamiento, y los efectos direccionales de la fuente sísmica tuvieron una mayor significación.

2. Materiales y métodos

Para la investigación se utilizaron los métodos empíricos: observación y experimentación, el primero se pone de manifiesto en todo el proceso investigativo y el segundo se evidencia en el trabajo con los datos de los registros acelerográficos. También se emplean los métodos teóricos: analítico-sintético, notorio en la revisión bibliográfica, y el hipotético-deductivo que se hace evidente en la formulación de la hipótesis.

Se tuvieron en cuenta los terremotos de moderados (M≥ 4) a fuertes (M≥ 6) registrados por la red acelerográfica del CENAIS en la etapa de 2017 a octubre de 2021. Fueron registrados un total de 17 sismos, de ellos, dos con magnitud mayor que 7 (Figura 1), donde destacan el evento del 28 de enero de 2020 con la mayor magnitud registrada 7,7, a 123 km de Cabo Cruz, provincia Granma y que reportó perceptibilidad en todo el país y el terremoto de Haití del 14 de agosto de 2021, con magnitud 7,2, perceptible en la región oriental.

Se utilizaron las herramientas informáticas proporcionadas por el programa informático SeismoSignal con el que se obtuvieron las características de amplitud, frecuencia y parámetros espectrales de los terremotos registrados en las estaciones acelerográficas. Se emplearon además los Sistemas de Información Geográfica ArcGIS y Quantum GIS (QGIS) para ubicar los epicentros de los terremotos estudiados, y el tabulador Excel con el que se tabularon los resultados obtenidos y se confeccionaron los gráficos de los parámetros del movimiento fuerte del suelo.

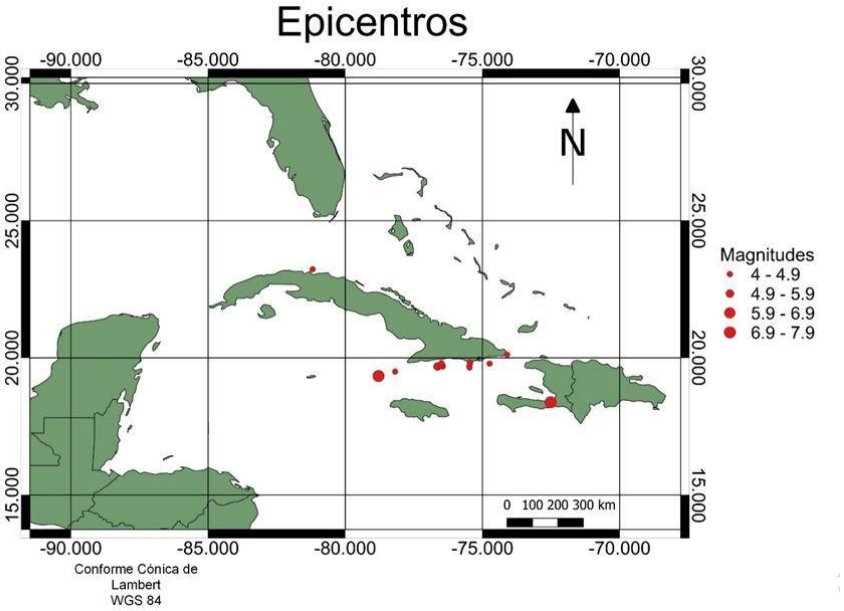


Fig. 1 *Ubicación espacial de los terremotos estudiados.*

3. Discusión y resultados

El procesamiento realizado a los registros acelerográficos de los terremotos seleccionados permitió analizar 45 acelerogramas, cada uno con tres componentes (NS, EW y Z), para un total de 135 formas de onda. A continuación, se muestran los terremotos con los que se realizó este análisis.

Tabla I. Terremotos analizados en la presente investigación

No.	Fecha	Hora local	Latitud Norte	Longitud Oeste	Profundidad (en Km)	Magnitud de Momento Mw	Localidad
1	03/08/17	02:58 pm	19,810	-75,450	46,1	4,0	Este de Santiago de Cuba.
2	28/01/20	02:10 pm	19,340	-78,790	20,0	7,7	Oeste de Cabo Cruz, Granma.
3	27/04/20	05:50 pm	19,836	-75,459	20,0	4,0	Baconao, Santiago de Cuba.
4	17/05/20	04:47 pm	19,728	-76,460	5,0	4,6	Santiago de Cuba.
5	18/05/20	03:18 am	19,689	-76,447	5,0	4,4	Chivirico, Santiago de Cuba.
6	14/08/21	08:29 am	18,383	-72,515	10,0	7,2	33 km al suroeste de Puerto Príncipe, Haití.

3.1 Descripción de los parámetros del movimiento fuerte del suelo.

Los mayores valores de aceleración pico (PGA) calculados corresponden a los terremotos más fuertes registrados por la red acelerográfica, el 14 de agosto de 2021 y el 28 de enero de 2020. Estos sismos ocurrieron a distancias regionales, entre 313 y 340 km de la ciudad de Santiago de Cuba, respectivamente.

En la figura 2 se observa el gráfico de aceleración correspondiente a la componente E-W de la estación AARA perteneciente al sismo de Mw7,7 del 28 de enero de 2020. En el registro se aprecia la naturaleza ondulatoria en casi toda su extensión que caracteriza a los terremotos originados interplacas (Barbagelata et al 2018), dicha estación registró el mayor valor de PGA de 105 cm/s^2 para dicha componente. Se encuentra a una distancia epicentral de 340 km y sobre un perfil de suelo tipo C (roca blanda), margas del miembro Tejar pertenecientes a la formación La Cruz.

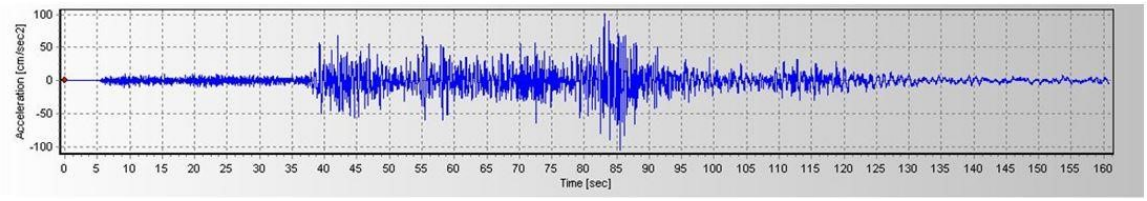


Fig. 2 *Gráfico de aceleración de la estación AARA componente E-W, sismo de M 7,7 del 28 de enero de 2020*

Por otro lado, en la figura 3 se tiene el gráfico correspondiente a la misma componente y evento sísmico, pero en este caso de la estación acelerográfica LMGC que se encuentra en la estación sismológica de Las Mercedes, Granma. La misma fue la estación más cercana al epicentro, a 210 km y está ubicada sobre roca dura. Su valor de PGA fue 99,901 cm/s^2. De manera similar a la figura anterior, se pone de manifiesto el carácter ondulatorio típico de este tipo de evento sísmico. Es significativo que siendo esta la estación más cercana registró un valor más bajo de aceleración en comparación con la estación AARA, lo cual está determinado por la influencia del sitio al estar asentada en roca dura. Se puede observar también en el acelerograma que el contenido de frecuencias es mayor en esta estación debido a la distancia epicentral menor.

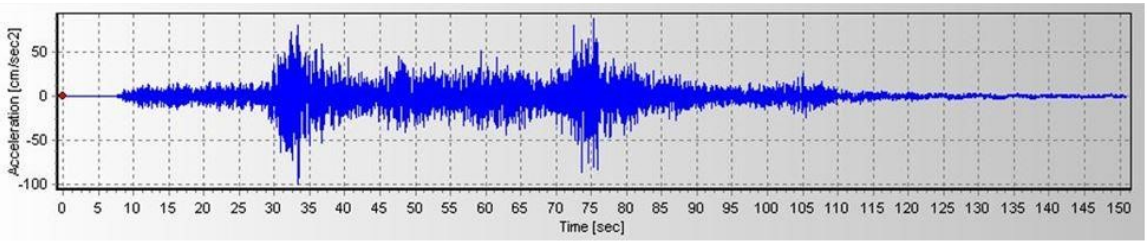


Fig. 3 *Gráfico de aceleración de la estación LMGC componente E-W, sismo de M7,7 del 28 de enero de 2020*

Además de los rasgos de la falla causante y la trayectoria de propagación a través del medio a distancias largas, las acciones sísmicas son afectadas por el efecto de sitio, que puede resultar en amplificación o atenuación de las amplitudes de las ondas sísmicas. Las frecuencias y amplitudes típicas de las ondas sísmicas varían en dependencia del tipo de suelo. Medios rígidos, tales como suelos rocosos y duros, no amplifican el movimiento sísmico, mientras que los suelos blandos amplifican las frecuencias específicas en dependencia de las características del suelo (Pinzón et al 2019). La figura 4 muestra los gráficos de Amplitud de Fourier de las estaciones anteriormente señaladas. En la misma destaca como las mayores amplitudes para la estación AARA (izquierda) se observan entre los 2 y 7 Hz, registrando una amplitud máxima de 211,838 a una frecuencia de 2,63 Hz; sin embargo, para la estación LMGC (derecha) se encuentran por encima de los 10 Hz y registra un valor máximo de amplitud, mucho menor, de 78,542 a 12,99 Hz.

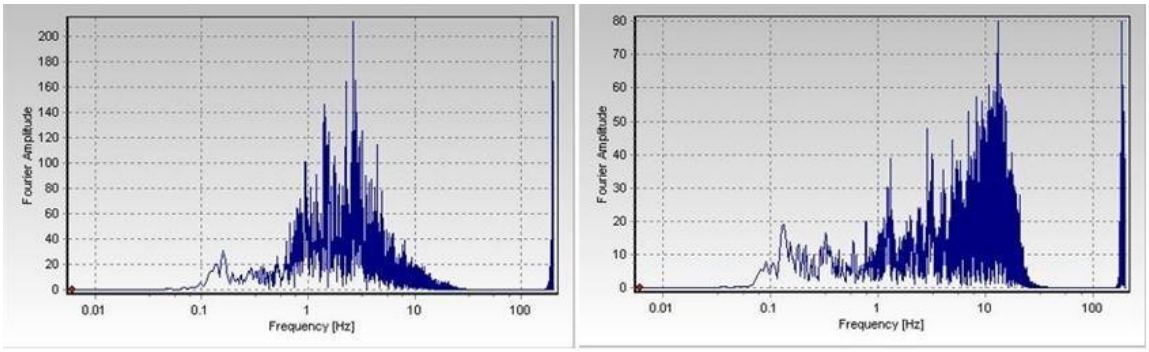


Fig. 4 *Amplitud de Fourier entre las estaciones AARA (izquierda) y LMGC (derecha) para la componente E-W del sismo de M7.7 del 28 de enero de 2020*

Como se expresa en Pinzón et al (2018) "*las características del sitio afectan el contenido de frecuencias y duración de los movimientos del suelo"*. Esto se pone de manifiesto en las comparaciones realizadas anteriormente. Teniendo en cuenta que la estación LMGC se encuentra a una distancia epicentral menor que la estación AARA, el efecto de filtrado de las altas frecuencias en las ondas sísmicas durante su trayectoria por el terreno es menor, tal y como se aprecia en el análisis de la figura 4. Por otro lado, las características del suelo, donde la roca blanda presente en la estación AARA produce un efecto de amplificación de las ondas sísmicas, que en la estación LMGC no ocurre debido a que se localiza sobre roca dura y lo que ocurre es lo contrario, una atenuación de las amplitudes.

3.1.1 Comparación entre terremotos fuertes

Según redes sismológicas internacionales (USG, GFZ) y el SSN, el sismo registrado el sábado 14 de agosto de 2021 a las 8h29m (tiempo local), de magnitud 7,2 (Mw, magnitud de momento), a 10 km de profundidad, fue resultado del desplazamiento de una falla con un mecanismo inverso oblicuo, en el borde entre las placas tectónicas de Norteamérica y El Caribe. En el caso del sismo registrado el martes 28 de enero de 2020 a las 2h10m (tiempo local), de magnitud 7,7 (Mw, magnitud de momento), a 20 km de profundidad, fue resultado del desplazamiento en un sector de la Falla Oriente con un mecanismo de falla rumbo deslizante, en el borde entre las placas tectónicas de Norteamérica y El Caribe. Las soluciones al mecanismo focal determinadas por estas redes internacionales indicaron que el deslizamiento ocurrió producto del movimiento lateral izquierdo en una falla con buzamiento inclinado.

Para realizar la comparación entre los terremotos del 14 de agosto y del 28 de enero se han tenido en cuenta las características distintivas antes mencionadas entre ambos terremotos fuertes, que puedan explicar el comportamiento de los parámetros analizados. Presentan mecanismos focales distintos, profundidad de 10 y 20 km, magnitud de 7,2 y 7,7 y distancia epicentral similar con relación a la ciudad de Santiago de Cuba donde se ubican las estaciones acelerográficas de 313 y 340 km, respectivamente. Las figuras 5 y 6 reflejan los valores de PGA para estos terremotos.



Fig. 5 *Gráfico de valores de PGA en las diez estaciones que registraron el sismo del 28 de enero de 2020*



Fig. 6 *Gráfico de valores de PGA en las diez estaciones que registraron el sismo del 14 de agosto de 2021*

Como se puede observar, los valores de PGA no presentan una variación considerable en las componentes horizontales, lo que no ocurre en la componente vertical, donde se pueden observar grandes variaciones entre un evento y otro. Las estaciones AECE, AKEN y ARAF fueron las únicas que registraron ambos eventos. Los valores de la componente vertical en las estaciones AKEN y ARAF del día 14 constituyen los máximos valores registrados en las tres componentes para estas estaciones en ambos eventos, lo que no sucede igual para el evento del día 28 donde estas dos estaciones registran los valores más bajos conjuntamente con ACLI (25,115 cm/s^2), ACAN (23,465 cm/s^2) y AYEL (36,324 cm/s^2). Según Pinzón et al (2018) "*los movimientos del suelo se pueden polarizar de modo que la intensidad en una dirección específica puede ser significativamente mayor"*, por lo que esta variación en los valores de la componente vertical, como también refieren Ameri et al (2009), puede estar ocasionada por el efecto de la fuente sísmica (efectos direccionales), por la distancia epicentral y las diferentes propiedades de atenuación del medio en la corteza durante la propagación de las ondas sísmicas.

Considerando todas las estaciones el mayor valor de PGA registrada es de 112,722 cm/s^2 y se obtuvo en la componente vertical de la estación APTO para el sismo del día 14 de agosto. Teniendo en cuenta lo planteado por Salinas y Lázares (2005) las aceleraciones que generaron ambos eventos se consideran como aceleraciones de sismos moderados debido a que son mayores que 50 cm/s^2 pero menores que 200 cm/s^2.

Los valores de PGV son menores para el terremoto del día 28, estos se encuentran entre 1,35 cm/s y 8,385 cm/s, los del día 14 van desde 4,05 cm/s hasta 51,495 cm/s. Esto ocurre también para los valores de PGD, este último evento registró valores entre 1,227 cm y 7,978 cm, que en comparación con los registrados por el primero son mucho menores, de 0,097 cm a 5,666 cm.

La Intensidad de Arias (I_A) refleja la energía total contenida en un acelerograma. La figura 7 representa los gráficos de I_A de la componente E-W en la estación ARAF para los dos eventos señalados. Los valores para esta componente son 0,177 m/s y 0,252 m/s respectivamente. Se aprecia que el sismo de Mw7,7 describe una pendiente un poco más suave, sin embargo, el segundo tiene una pendiente más abrupta. Similar comportamiento describen los gráficos en las otras dos componentes y estaciones. En el caso del terremoto de Mw7,7 con una pendiente suave en el gráfico de I_A, que además refleja cambios en forma de escalón muestra la complejidad del proceso de ruptura de este terremoto.

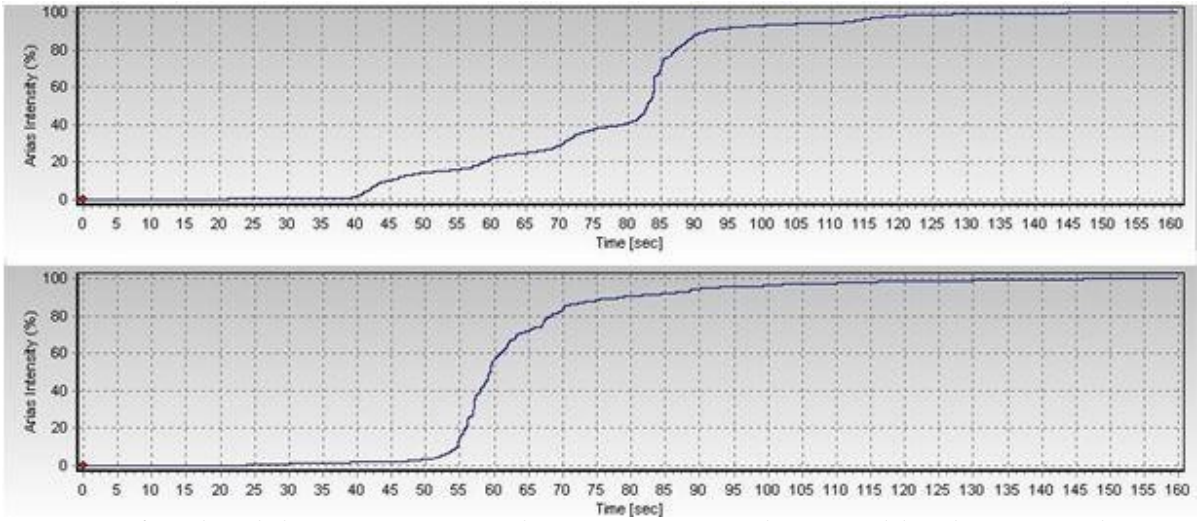


Fig. 7 *Gráficos de I_A de la componente E-W en la estación ARAF para los sismos del 28 de enero y 14 de agosto respectivamente*

Al analizar los valores de Intensidad de Arias para cada estación y componente, el terremoto del 28 de enero posee mayores valores en la mayoría de las estaciones para las componentes horizontales en comparación con el del 14 de agosto (figuras 8 y 9). Esto es consistente con la mayor magnitud del terremoto del 28 de enero. No obstante, el mayor valor de I_A, 0,8 m/s, se obtuvo en la estación ARAF en la componente Z. El 88,3 % de los valores de Intensidad de Arias registrados para ambos sismos son mayores que 0,135 m/s, valor que Schmidt y Quirós (2007) señalan es significativo para determinar posibles daños en estructuras sometidas a acciones sísmicas.

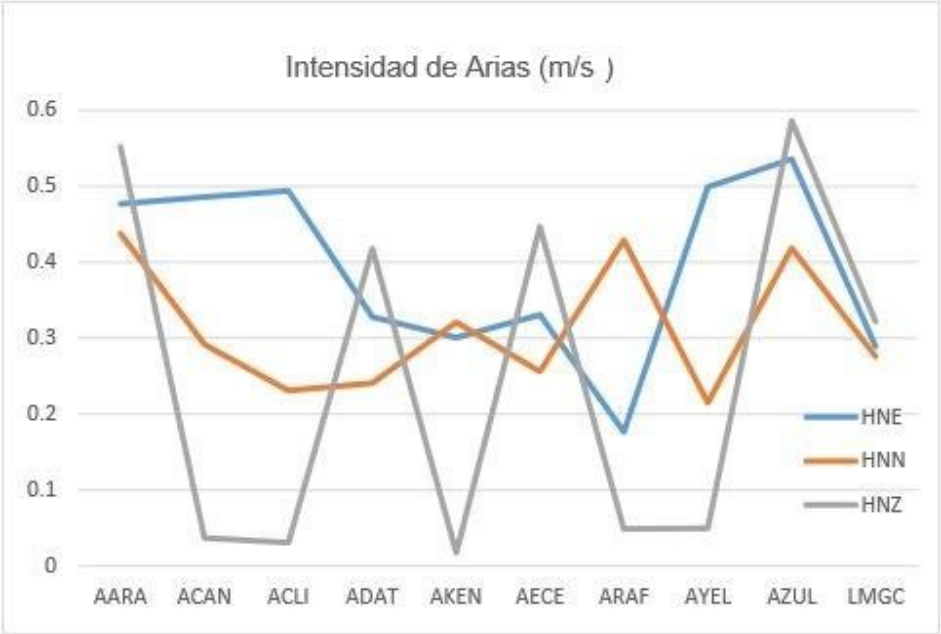


Fig. 8 *Gráfico de Intensidad de Arias para el terremoto del día 28 de enero de 2020*

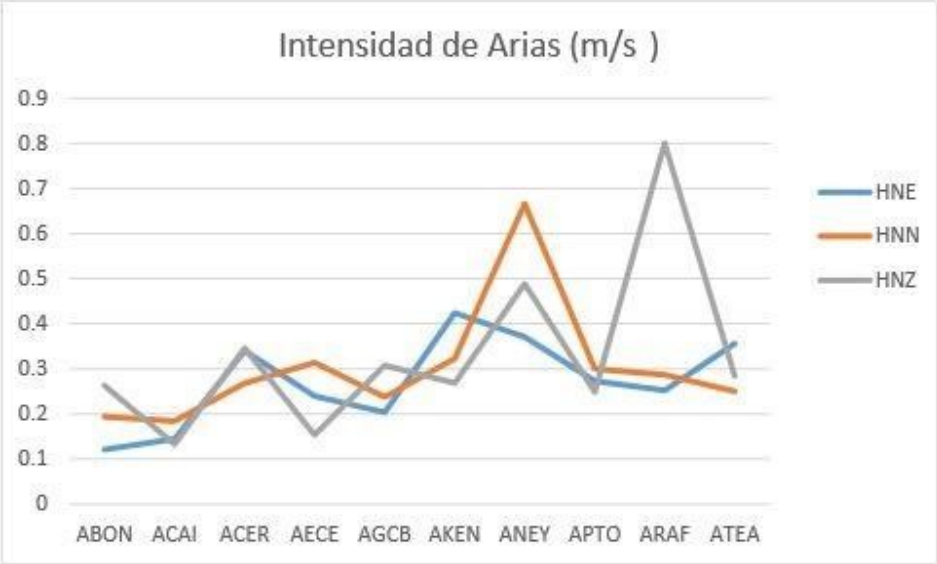


Fig. 9 *Gráfico de Intensidad de Arias para el terremoto del día 14 de agosto de 2021*

Para conocer la influencia de las condiciones geológicas del sitio en los registros acelerográficos se toma en cuenta las frecuencias a las que se registran los valores máximos de amplitud de Fourier para los tres tipos de suelos presentes en las estaciones situadas en la ciudad de Santiago de Cuba. Estas se denominan frecuencias o periodos predominantes.

Se obtuvieron los valores de amplitud de Fourier de la componente E-W para el terremoto del 28 de enero en las estaciones ACAN, AECE y AKEN, de perfiles de suelo tipo E, D y C respectivamente. Sus valores máximos son ACAN: 212,554; AECE: 156,706 y AKEN: 153,759; estos valores se obtuvieron para las frecuencias 2,802 Hz; 6,226 Hz y 2,545 Hz respectivamente. El perfil de suelo tipo E sobre el que se encuentra la estación ACAN es el que produce mayor amplificación. Esta estación se localiza sobre

sedimentos del Cuaternario, mientras que AECE yace sobre argilitas del miembro Santiago y AKEN se ubica sobre margas del miembro Tejar, ambos pertenecientes a la formación La Cruz. Desde el punto de vista geológico los sedimentos del Cuaternario conformados por depósitos marinos y arenas tienen menor grado de consolidación que las litologías neógenas de la formación La Cruz por lo cual producen mayores valores de amplificación de las ondas sísmicas.

En el caso del sismo del día 14 de agosto no se tiene registro de ninguna de las estaciones que se encuentran sobre suelo tipo E, por lo que se realiza el análsis solamente en AECE y AKEN para la misma componente E-W, en estas se obtuvieron valores máximos de Amplitud de Fourier de 115,957 y 170,849 para frecuencias de 3,687 Hz y 1,331 Hz respectivamente. Estos valores de amplitud son más altos que en otras estaciones que se encuentran sobre tipos de suelo similares, lo que puede estar dado por la precisión de los trabajos para la clasificación de los suelos debido a la ausencia de estudios geotécnicos, en particular cuando se consideran las carácterísticas generales de las formaciones geológicas y no las propiedades físico-mecánicas de los tipos litológicos.

El mayor valor de Amplitud de Fourier del día 28 es 321,09 para una frecuencia de 1,563 Hz (estación AZUL) y el del día 14 es 458,694 para una frecuencia de 0,94 Hz (estación ARAF), ambos valores se obtuvieron en la componente vertical.

El período predominante es un parámetro muy empleado en la Ingeniería Civil para el diseño de estructuras sismorresistentes. Los valores para el sismo del día 28 se encuentran entre los 0,06 y 0,64 s, las componentes horizontales tienen valores entre 0,08 y 0,38 s. Los valores del evento del día 14 son mayores, se encuentran entre 0,1 y 1,08 s, aunque las componentes horizontales al igual que para el anterior no muestran mucha variación, se encuentran entre 0,16 y 0,36 s.

Las duraciones efectivas para estos sismos tienen en común que los mayores valores se registran en la componente vertical, entre los 52 y 70 s para el terremoto del día 28 y para el terremoto del día 14, entre 68 y 89 s. En las componentes horizontales también son mayores los valores para los registros del día 14 de agosto, por lo que este terremoto tuvo una mayor duración de la fase fuerte.

3.1.2 Comparación entre terremotos moderados

Los terremotos moderados del 3 de agosto de 2017 y 27 de abril de 2020 registraron una magnitud de 4,0, el primero ocurrió a una profundidad de 46,1 km mientras el segundo tuvo un origen menos profundo a 20 km, las distancias epicentrales en relación a las estaciones acelerográficas de la ciudad de Santiago de Cuba son 43,3 y 45,7 km respectivamente. Las estaciones ACAN y AECE registraron ambos eventos. Los valores de PGA en estas estaciones no presentan gran variación, se encuentran entre 4 y 10 cm/s^2 a excepción del valor de la estación ACAN en la componente E-W de 15,938 cm/s^2. Sin embargo, en el terremoto del 27 de abril la estación AYEL registró valores en sus tres componentes de 55,081 cm/s^2; 42,415 cm/s^2 y 39,235 cm/s^2 respectivamente, los que constituyen los mayores valores registrados para ambos eventos sísmicos. Estos máximos en esta estación pueden ser producto a efectos de amplificación debido a que la estación se encuentra sobre sedimentos del Cuaternario conformados por limos arenosos y arcillas arenosas y su tipo de perfil de suelo es E. En Rosabal et al (2020) también se obtuvieron valores máximos para la estación AYEL en el análisis de las aceleraciones del terremoto de Mw 3,9 del 27 de febrero del 2018.

A excepción del mencionado valor en la estación AYEL, los valores de PGA para ambos terremotos son inferiores a 50 cm/s^2, lo que según Salinas y Lázares (2005) constituyen valores de aceleración para terremotos leves.

Los valores de PGV del terremoto del día 3 se encuentran entre 0,048 cm/s y 21,79 cm/s y resultan superiores a los del día 27 que van desde 0,078 cm/s hasta 1,106 cm/s. Por otro lado, los valores de PGD no muestran mucha diferencia entre un evento y otro, siendo ligeramente mayores para el evento del día 27 que registró valores entre 0,003 cm y 0,037 cm.

Las estaciones no registraron valores de Intensidad de Arias superiores a 0,135 m/s para ninguno de estos sismos y los valores registrados son inferiores a 0,006 m/s.

Las amplitudes de Fourier presentan valores muy bajos, en el sismo del día 3 los máximos son inferiores a 4 y para el evento sísmico del día 27 a excepción de la estación AYEL con máximos de 10,502; 9,971 y 10,201 para las componentes E-W, N-S y Z respectivamente, los valores están por debajo de 5.

Los períodos predominantes para estos terremotos no presentan mucha variación, el del día 3 de agosto tiene valores entre 0,04 y 0,22 s y el del día 27 entre 0,04 y 0,18 s.

Ambos terremotos no registraron valores de duración efectiva, lo que guarda relación con los mínimos valores de Intensidad de Arias registrados, ya que para esta duración los valores de inicio y final de la fase fuerte se definen cuando se alcanzan valores entre 0,01 m/s y 0,135 m/s (Villalón, 2021).

3.2 Características generales de los terremotos analizados

Al comparar los acelerogramas de los terremotos analizados en función de la distancia epicentral fue posible identificar la influencia del efecto de sitio ya que las estaciones en roca registraron los menores valores de aceleración, independientemente de la distancia, mientras que las estaciones ubicadas en roca blanda y suelos registraron valores mayores de este parámetro.

El efecto de direccionalidad de la fuente sísmica fue identificado al analizar los acelerogramas del terremoto fuerte de Mw7,2, para el cual la componente vertical registró los mayores valores de PGA, Intensidad de Arias, amplitud de Fourier y duración efectiva, siendo estos de 112,722 cm/s^2; 0,8 m/s, 458,694 y 89,090 s respectivamente.

La Intensidad de Arias para los terremotos moderados no fue significativa, obteniendo para algunos valores muy cercanos a 0, no siendo así para el caso de los terremotos fuertes donde el 88% de los valores estuvo por encima de 0,135 m/s. Por ende, los terremotos moderados no tienen duración efectiva y los valores para los terremotos fuertes están entre 18 y 90 s. Los períodos predominantes para los eventos sísmicos moderados están entre 0,004 y 0,38 s, y para los terremotos fuertes 0,08 y 1,08 s.

Conclusiones

- Los aspectos fundamentales que permiten caracterizar los registros acelerográficos son: la amplitud espectral y la frecuencia o período predominante, los parámetros del movimiento del suelo como valores picos de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento, la Intensidad de Arias y la duración de la fase fuerte.
- Los parámetros del movimiento del suelo: PGA, Intensidad de Arias, amplitud de Fourier, período predominante y duración efectiva registraron máximos valores en la componente vertical y poca variación en las componentes horizontal es para el terremoto fuerte del 14 de agosto sugiriendo un efecto de directividad de la fuente sísmica.
- La distancia epicentral generó poca influencia en los registros de aceleración, en los que los efectos de sitio, dígase condiciones geológicas del lugar de emplazamiento, y los efectos direccionales de la fuente sísmica tuvieron una mayor significación.
- Al comparar los acelerogramas de los terremotos analizados en función de la distancia epicentral fue posible identificar la influencia del efecto de sitio ya que las estaciones en roca registraron los menores valores de aceleración, independientemente de la distancia, mientras que las estaciones ubicadas en roca blanda y suelos registraron valores mayores de este parámetro.

Recomendaciones

▪ Crear una base de datos donde se puedan obtener con facilidad los registros de la red acelerográfica del Servicio Sismológico Nacional de Cuba (SSNC).
▪ Actualizar la página web del SSNC con las estaciones acelerográficas que se encuentran actualmente en funcionamiento.
▪ Densificar la red acelerográfica nacional de manera que se muestreen todos los tipos de suelos que se clasifican en la Norma Sísmica vigente, NC 46: 2017.

▪ Fomentar el empleo de los registros acelerográficos en los estudios a fines a la Ingeniería Sismológica e Ingeniería Civil.

Referencias bibliográficas

Abrahamson, N. A. and Silva, W. J. 2008. Abrahamson & Silva NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. *Earthquake Spectra,* 24 (1): 67-97.

Ambraseys, N. N.; Douglas, J.; Sarma, S. K.; Smith, P. M. 2005. Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Vertical peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering* 3 (1): 1-53.

Ameri, G.; Massa, M.; Bindi, D.; D'Alema, E.; Gorini, A.; Luzi, L.; Marzorati, S.; Pacor, F.; Paolucci, R.; Puglia, R. and Smerzini, C. 2009. The 6 april 2009 Mw 6.3 L'Aquila (Central Italy) earthquake: strong-motion Observations. *Seismological Research Letters* 80 (6): 951-966.

Atkinson, G. M. and Boore, D. M. 2003. Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America* 93 (4):1703-1729.

Barbagelata, J. M.; Iannizzotto, R.; Mingorance, F. 2018. Análisis preliminar de registros de aceleración de dos eventos de subducción en las estaciones acelerográficas del Sitio Capdeville, norte de Mendoza. *I Jornada de Divulgación de la Carrera de Ingeniería Civil*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo. Disponible: https://bdigital.uncu.edu.ar- [Consultado 10 de diciembre de 2021].

Chuy Rodríguez, T. J. 1999. *Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica*. Doctorado, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas CENAIS, Santiago de Cuba.

Márquez Mercerón, P. I; Oliva Álvarez, R.; Morejón Blanco, G.; Artímez Numas, J. A. 2002. Análisis de los primeros acelerogramas obtenidos en Cuba con fines de Ingeniería Sísmica. Fondos CENAIS.

Mezcua, J.; García Blanco, R. M. and Rueda, J. 2008. On the Strong Ground Motion Attenuation in Spain. *Bulletin of the Seismological Society of America* 98 (3): 1343-1353.

Perrault, M. and Gueguen, P. 2015. Correlation between ground motion and building response using Californian earthquake records. *Earthquake Spectra*.

Pinzón, L.A.; Pujades, L.G.; Diaz, S.A.; Alva, R.E. 2018. Do Directionally Effects Influence Expected Damage? A Case Study of the 2017 Central Mexico Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 108, 2543-2555

Pinzón, L.A.; Pujades, L.G.; Macau, A.; Figueras, S. 2019. Increased seismic hazard in Barcelona (Spain) due to soil-building resonance effects. *Soil Dynamic Earthquake Eng* 117, 245–250.

Rosabal Domínguez, S. Y.; Palau Clares, R.; Cutié Mustelier, M.; Oliva Álvarez, R.; Rivera Álvarez, Z.; Villalón Semanat, M. 2020. Aceleraciones del terremoto del 27 de febrero de 2018, obtenidas por la red acelerográfica de la ciudad de Santiago de Cuba. Comunicación personal.

Salinas R. y Lázares F. 2005. Influencia del acimut y la distancia epicentral en los acelerogramas registrados en Lima obtenidos con la red acelerográfica del CISMID. Disponible: https://www.academia.edu- [Consultado 15 de diciembre de 2021]

Schmidt Díaz, V. y Quirós Serrano, C. 2007. Caracterización de los registros acelerográficos obtenidos en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica. *Ingeniería* 17 (1): 27-41.

SeismoSoft (2013). "SeismoSignal v5.1"- A computer program for signal processing of strong-motion data. Disponible: https://www.seismosoft.com

Tsai, Y. B. and Huang, M. W. 2000. Strong ground motion characteristics of the Chi-Chi, Taiwan earthquake of September 21, 1999. *Earthquake Eng. &Eng. Seism* (2): 1-21.

Villalón Semanat, M.; Candebat Sánchez, D.; Rivera Álvarez, Z.; Sánchez Arce, J. 2020. Análisis de los valores de amplitud, frecuencia y espectros del terremoto de Cabo Cruz Mw7.7 a partir de los registros de la red acelerográfica de Santiago de Cuba y de la Estación de las Mercedes. Salida Parcial del Proyecto Determinación del efecto de sitio en la ciudad de Santiago de Cuba utilizando registros acelerográficos. PROGRAMA: "DISA-Desarrollo de Investigaciones Sismológicas Aplicadas en la República de Cuba". Fondos del CENAIS.

Villalón Semanat, M. 2021. Procedimiento para el análisis de los registros acelerográficos con SeismoSignal. Informe parcial del Proyecto "Determinación del efecto de sitio en la ciudad de Santiago de Cuba

utilizando registros acelerográficos". PROGRAMA: "DISA-Desarrollo de Investigaciones Sismológicas Aplicadas en la República de Cuba". Fondos del CENAIS.

Zonno, G. and Montaldo, V. 2002. Analysis of strong ground motions to evaluate regional attenuation relationships. *Annals of Geophysics* 45 (3/4): 439-454.

Acerca de los autores

Oscar Alejandro Sánchez Sánchez: Graduado de Ingeniero Geofísico en la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (2022). Actualmente trabajando en el Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) donde ejerce el puesto de Adiestrado. Ha participado en eventos científicos nacionales, proyectos y servicios del instituto, así como en cursos de Astronomía. Número de ORCID: 0000-0002-3653-4368.

Ernesto Alejandro Piloto Zaldívar: Graduado de Ingeniero Geofísico en la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (2022). Actualmente trabajando en el Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) donde ejerce el puesto de Adiestrado. Ha participado en eventos científicos nacionales, proyectos y servicios del instituto, así como en cursos de Astronomía. Número de ORCID: 0000-0003-0162-7529.

Omar González Trujillo: Graduado de Ingeniero Geofísico en la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (2019). Actualmente trabajando en el Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) donde ejerció el puesto de Especialista en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente y posteriormente fue ascendido a Jefe de Departamento de Geofísica Espacial. Cuenta con 3 años de experiencia laboral y ha participado en eventos nacionales e internacionales relacionados con temas de su especialidad. Número de ORCID: 0000-0001-8811-1394.