

Evaluación de escenarios de amenaza sísmica para la selección de acelerogramas en el análisis de estructuras en la región oriental de Cuba

Evaluation of seismic hazard scenarios for selecting accelerograms in the structure's analysis in the eastern region of Cuba

Kenia Mercedes Leyva-Chang^{1*}, Grisel Morejón-Blanco¹, Bladimir Moreno-Toirán¹

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

*Autor para la correspondencia: kenia@cenais.cu

Resumen

La región suroriental de Cuba presenta una elevada amenaza sísmica debido a la interacción de las placas tectónicas de Norteamérica y del Caribe. Este estudio propone una metodología para la definición de escenarios sísmicos representativos y la selección de acelerogramas destinados al Análisis Dinámico No Lineal (ADNL) de estructuras en Cuba. Se desarrollaron tres escenarios basados en fallas activas (Falla Oriente, fallas secundarias inversas y fallas someras), caracterizados por magnitud, mecanismo focal y distancia. Se seleccionaron y procesaron acelerogramas reales (locales e internacionales) mediante el software SeismoSoft, validando su compatibilidad espectral con el Espectro de Peligro Uniforme (EPU) de Santiago de Cuba. Los resultados demuestran la representatividad de los registros en el rango de periodos estructurales clave (0.2–1.12 s), con errores espectrales <24.5%. La metodología propuesta supera la escasez de registros fuertes en Cuba y proporciona un marco robusto para la selección de movimientos sísmicos de entrada, esencial para estudios de ingeniería sísmica y evaluación de la respuesta estructural realista en el contexto cubano.

Palabras clave: amenaza sísmica, escenarios sísmicos, acelerogramas, análisis dinámico no lineal, Espectro de Peligro Uniforme

Abstract

The southeastern region of Cuba exhibits high seismic hazard due to the interaction of the North American and Caribbean tectonic plates. This study

proposes a methodology for defining representative seismic scenarios and selecting accelerograms for Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) of structures in Cuba. Three scenarios were developed based on active faults (Oriente Fault, secondary reverse faults, and shallow faults), characterized by magnitude, focal mechanism, and distance. Real accelerograms (local and international) were selected and processed using SeismoSoft software, validating their spectral compatibility with the Uniform Hazard Spectrum (UHS) of the Cuban NC 46:2017 standard. The results demonstrate the representativeness of the records in the key structural period range (0.2–1.12 s), with spectral errors <24.5%. The proposed methodology overcomes the scarcity of strong ground motion records in Cuba and provides a robust framework for selecting input seismic motions, which is essential for seismic engineering studies and the assessment of realistic structural response in the Cuban context.

Keywords: seismic hazard, seismic scenarios, accelerograms, nonlinear dynamic analysis, Uniform Hazard Spectrum

1. INTRODUCCIÓN

La sismicidad de Cuba está determinada por la interacción de las placas tectónicas de Norteamérica y del Caribe, cuyos límites albergan sistemas de fallas capaces de generar terremotos fuertes. Esta interacción ha originado también estructuras tectónicas secundarias hacia el interior del país con una potencialidad sísmica menor. Así, la sismicidad en el territorio nacional tiene un origen tanto de entre placas (en el límite al sur de Oriente) como intraplaca (hacia el interior), tal como lo establece Arango (2014). La sismicidad de entre placas representa el mayor peligro para la región suroriental, debido a la mayor acumulación de energía y la magnitud de los eventos. La falla Oriente (Bartlett-Caimán) es la estructura más significativa en esta zona, donde históricamente se ha registrado la mayor actividad sísmica del país, con 23 terremotos fuertes reportados (Chuy, 1999, actualizado noviembre, 2024). Esta actividad se confirma con los datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN), que entre enero de 2024 y mayo de 2025 registró 15 548 eventos sísmicos, cuya distribución se muestra en la Figura 1. Los mecanismos focales de los terremotos aquí registrados evidencian este proceso complejo. Investigadores como Álvarez (2016) y Chuy (1999) coinciden en que la magnitud máxima esperable en esta falla es de 7.5 Mw. La tabla 1 detalla los terremotos históricos de mayor intensidad en el área.

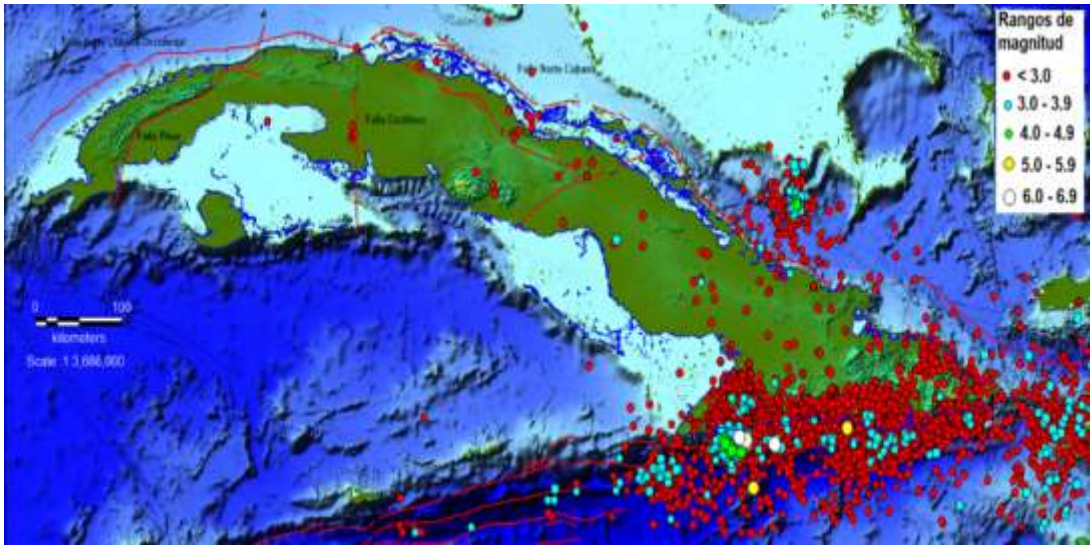


Figura 1. Terremotos registrados por el SSN desde enero 2024 hasta mayo 2025.
Fuente: SSN, 2025.

Tabla 1. Terremotos históricos de mayor intensidad para el área de estudio.
Fuente: Chuy (1999). Actualizado por equipo CENAIIS (Nov 10/2024)

Año	Mes	Día	Hora	Latitud Norte	Longitud. Oeste	Ms	H	I	Localidad
1766	JUN	12	05:14	(19.80)	(76.10)	(7.6)	(35)	9.0	Santiago de Cuba
1852	AGO	20	14:05	(19.77)	(75.35)	(7.3)	(30)	9.0	Santiago de Cuba
1932	FEB	03	06:15	19.80	75.80	6.75	-	8.0	Santiago de Cuba
2024	NOV	10	11.49	19.77	76.99	6.7	10.0	8.0	Granma

Entre los terremotos más significativos se encuentran los de 1932 (Ms=6,75; I=VIII) y 1947 (Ms=6,75; I=VII) en Santiago de Cuba, y los de 1976 (Ms=5,7), 1992 (Ms=7,0) y 2024 (Ms=6,7) en la provincia Granma. La ciudad de Santiago de Cuba ha soportado intensidades de hasta IX grados MSK en eventos de 1766 y 1852. El promedio de recurrencia para estos sismos fuertes es de aproximadamente 85 años.

Dado que han transcurrido más de 90 años desde el último terremoto fuerte del 3 de febrero de 1932, esto muestra la crítica necesidad de realizar estudios de estimación de daños en las edificaciones de ciudades con alta sismicidad para trazar estrategias de mitigación.

El Análisis Dinámico No Lineal (ADNL) constituye en la actualidad una metodología avanzada fundamental para evaluar el comportamiento estructural ante sismos severos, cuya confiabilidad depende críticamente de la selección de acelerogramas que representen de manera fidedigna la amenaza sísmica local, conforme a estándares internacionales como FEMA P-58 (2018) y ASCE 7-22.

No obstante, este proceso se ve particularmente dificultado en contextos como el cubano, donde la escasez de registros de movimientos fuertes obliga a recurrir a registros de otras regiones sísmicas. Dicha limitante hace imperiosa la adopción de una metodología rigurosa que permita seleccionar, adaptar y validar acelerogramas, garantizando no solo su compatibilidad espectral, sino también su representatividad sismotectónica, un desafío ampliamente reconocido en la literatura especializada (Kohrangi, *et al.* 2020; Caicedo, 2023). Por consiguiente, se requiere un marco metodológico robusto que supere estas carencias y asegure que los insumos utilizados en el ADNL reflejen de forma realista las condiciones de peligrosidad sísmica de la región oriental de Cuba.

Esta investigación tiene como objetivo principal presentar una metodología integral para la definición de escenarios de amenaza sísmica y la selección de acelerogramas para el ADNL de estructuras en la región oriental de Cuba. La metodología se basa en criterios sismológicos, geotécnicos y espectrales, alineados con normativas internacionales y adaptados al contexto cubano.

Los resultados validan la representatividad de los acelerogramas seleccionados, proporcionando una base sólida para estudios de ingeniería sísmica en el país.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Contexto sismotectónico y definición de escenarios

El área de estudio se ubica en la región oriental de Cuba, donde la Falla Oriente (límite transformante entre las placas de Norteamérica y del Caribe) representa la fuente sísmica más importante (Figura 2). Se definieron tres escenarios de amenaza basados en fallas activas (Tabla 2), considerando su potencial sismogénico, mecanismos focales y distancia a la ciudad de Santiago de Cuba (Arango, 2014; Cotilla y Córdova, 2010).

Tabla 2. Escenarios de amenaza sísmica definidos para Santiago de Cuba

Escenario	Mecanismo Focal	M _w	Profundidad (km)	Distancia (km)	Registros Análogos
Falla Oriente	Deslizamiento por rumbo	7.2	10 – 15	20 – 40	Kocaeli (1999), Landers
Falla Secundaria	Inverso	6.5	10	< 20	Northridge (1994)
Fallas Someras	Normal	5.8	5 – 10	10 – 20	Lorca (2011), Cuba 2016

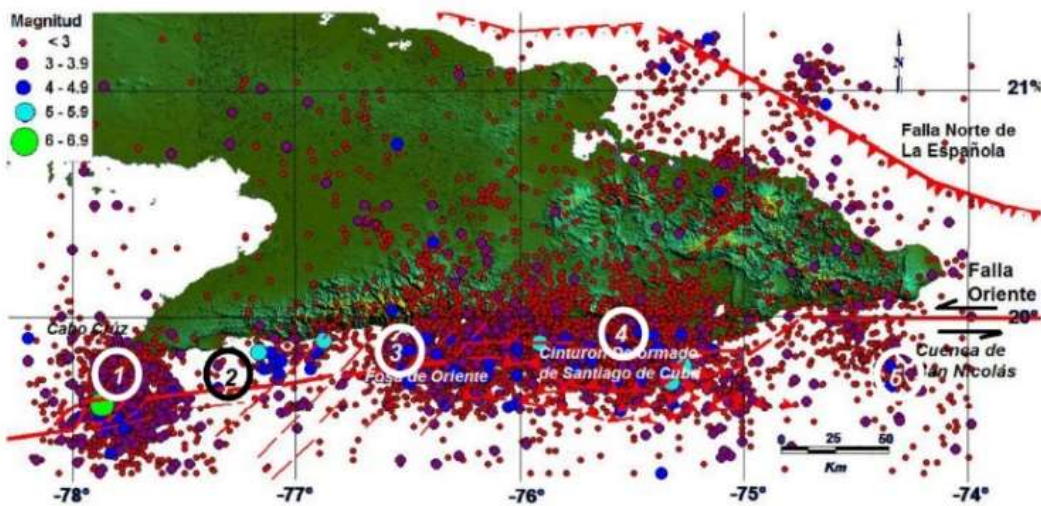


Figura 2. Ubicación de la Falla Oriente. Se señalan con números los principales elementos geodinámicos que caracterizan a la falla Oriente: 1. Transtensión (Cuenca de Cabo Cruz), 2. Deslizamiento puro, 3. Extensión (Fosa de Oriente), 4. Transpresión (Cinturón deformado de Santiago de Cuba). 5. Transtensión (Cuenca de San Nicolás). Fuente: Arango (2014).

2.2. Selección y procesamiento de acelerogramas

La selección de acelerogramas se rigió por criterios estrictos de compatibilidad espectral, condiciones de suelo y parámetros sismológicos (M_w 6.0–7.5, distancia ≤ 50 km). Se utilizaron registros cubanos e internacionales, obtenidos de bases de datos consolidadas (PEER NGA-West2, ESM).

El procesamiento incluyó el escalado espectral mediante el software SeismoMatch, siguiendo metodologías validadas internacionalmente (Manfredi, et al. 2022; Saracho, 2021) y ajustando los registros al Espectro

de Peligro Uniforme (EPU) de Santiago de Cuba para periodos entre $0.1T_1$ y $1.5T_1$, con un error cuadrático medio ≤ 0.30 (Baker, 2011). Se calcularon parámetros clave como PGA, PGV, duración significativa (Ds_{5-95}) e intensidad de Arias.

2.3. Validación de la compatibilidad espectral

La representatividad de los acelerogramas seleccionados se evaluó comparando el espectro promedio de los registros procesados con el EPU de Santiago de Cuba para el periodo de retorno de interés. Esta comparación permitió cuantificar el ajuste espectral en el rango de periodos estructurales que se analizan mediante el cálculo del error relativo.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de los acelerogramas

Los acelerogramas seleccionados mostraron una amplia gama de intensidades (PGA: 0.21–0.84 g; PGV: 33.5–112.4 cm/s) y duraciones significativas (Ds_{5-95} : 14.3–22.5 s), adecuadas para inducir una respuesta no lineal en estructuras. Los parámetros fundamentales de los registros internacionales claves se presentan en la Tabla 3, mientras que los de los sismos cubanos se detallan en la Tabla 4. La diversidad de mecanismos focales (deslizamiento lateral e inverso) asegura la representatividad de las fuentes sismogénicas de la región.

Tabla 3. Parámetros de los acelerogramas internacionales seleccionados

Sismo	Mw	Tipo Falla	Mecanismo	PGA (g)	PGV (cm/s)	Ds ₅₋₉₅ (s)
Kocaeli	7.6	Cortical	Deslizamiento	0.42	56.30	22.50
Landers	7.3	Cortical	Deslizamiento	0.71	98.70	18.70
El Centro	7.3	Inversa	Inverso	0.35	33.50	14.30
Northridge	6.7	Inversa	Inverso	0.84	112.40	16.90

Tabla 4. Parámetros de los acelerogramas cubanos seleccionados

Sismo	Mw	Mecanismo Focal	PGA (g)	PGV (cm/s)	Ds ₅₋₉₅ (s)
20/03/2010	5.7	Inverso	0.605	25.74	5.14
17/01/2016	5.1	Inverso	0.217	8.63	3.34
10/11/2024	6.8	Deslizamiento	0.420	8.39	14.30

PGA: Aceleración máxima del terreno; PGV: Velocidad máxima del terreno; Ds_{5-95} : Duración significativa.

3.2. Compatibilidad espectral

El espectro de respuesta de los registros seleccionados (Figura 3) mostró una cobertura óptima en el rango de periodos estructurales claves. El espectro promedio de los acelerogramas mostró un ajuste satisfactorio con el Espectro de Peligro Uniforme (EPU) de Santiago de Cuba en el rango de periodos estructurales clave (0.2–1.12 s), como se evidencia en la Figura 4 y se cuantifica en la Tabla 5.

Los errores relativos en periodos clave (0.2 s, 0.5 s, 1.12 s) fueron inferiores al 24.5 %, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa ASCE 7-22 ($<30\%$). La dispersión espectral (desviación estándar $\sigma < 0.3g$) estuvo controlada, lo que garantiza que los registros no subestimen ni sobrestimen la demanda sísmica de manera sistemática.

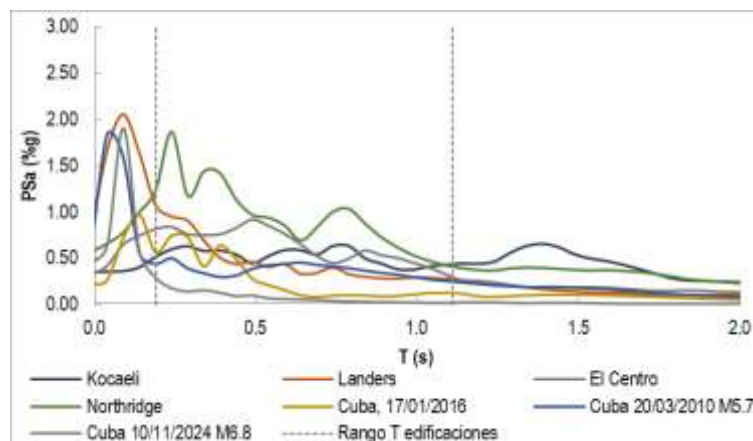


Figura 3. Espectros de respuesta de los sismos seleccionados. Las líneas discontinuas representan el rango de periodos de las edificaciones.

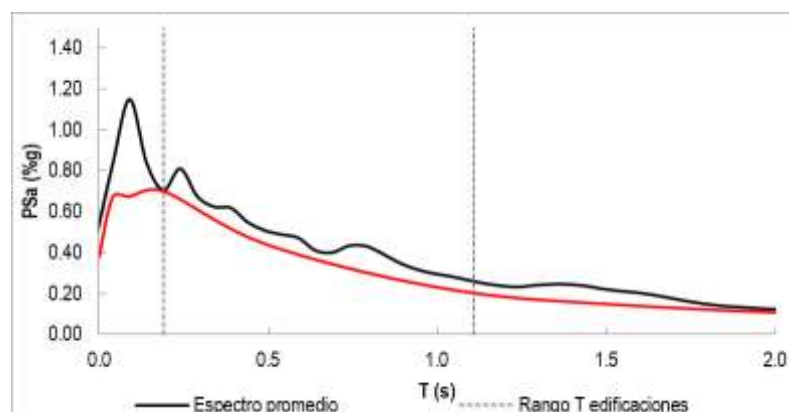


Figura 4. Comparación entre el espectro promedio de respuesta de los sismos seleccionados y el espectro de peligro uniforme para Santiago de Cuba. Las líneas discontinuas representan el rango de periodos de las edificaciones.

Tabla 5. Comparación espectral entre el promedio de registros y el EPU

Periodo (s)	EPU (g)	Espectro Promedio (g)	Error Relativo (%)
0.20	0.70	0.68	2.86
0.50	0.44	0.49	11.36
1.12	0.28	0.33	24.50

4. DISCUSIÓN

La metodología propuesta permite superar la escasez de registros sísmicos fuertes en Cuba mediante la integración de registros locales e internacionales representativos. La selección basada en escenarios sismotectónicamente justificados asegura que los acelerogramas replican las características esenciales de la amenaza sísmica regional.

La compatibilidad espectral obtenida valida la utilidad de los registros seleccionados para el ADNL, asegurando que las demandas de energía y frecuencia en el rango de periodos estructurales críticos sean representativas de la amenaza local. El error espectral máximo del 24.5% se considera aceptable para estudios de ingeniería práctica, especialmente en el contexto de la disponibilidad limitada de datos.

Limitaciones del estudio incluyen la dependencia de registros internacionales escalados y la necesidad de ampliar la base de datos de acelerogramas cubanos. Futuras investigaciones deberían incorporar efectos de sitio más detallados y validar la metodología con un mayor número de registros locales recientes.

5. CONCLUSIONES

- Se desarrolló una metodología robusta para la definición de escenarios de amenaza sísmica y selección de acelerogramas, específica para el contexto de la región oriental de Cuba, basada en criterios sismotectónicos y espectrales.
- Los acelerogramas seleccionados y procesados muestran una compatibilidad espectral satisfactoria con el Espectro de Peligro Uniforme, validando su uso para Análisis Dinámico No Lineal.
- La metodología constituye una herramienta esencial para la selección de movimientos sísmicos de entrada en estudios de ingeniería, contribuyendo a una evaluación más realista de la respuesta estructural en Cuba.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más sincero agradecimiento al DrC. Ing. Enrique Diego Arango Arias por su invaluable asesoría y sus contribuciones fundamentales al conocimiento de la sismotectónica cubana, las cuales constituyeron la base científica para el desarrollo de este trabajo.

7. REFERENCIAS

- Álvarez, L., Lindholm, C., y Villalón, M. (2016). Seismic Hazard for Cuba: A New Approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107 (1): 1-11, doi: 10.1785/0120160074.
- Arango, E. (2014). *Análisis sismotectónico del territorio oriental de Cuba a partir de la integración del modelo de corteza 3D de datos gravimétricos con datos sismológicos y geodésicos*. [Tesis doctoral, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. México].
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2022). ASCE/SEI 7-22: Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers Reston, Virginia.
- Baker, J. W. (2011). *Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection*. *Journal of Structural Engineering*, 137(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000215).
- Caicedo, D., Karimzadeh, S., Bernardo, V., & Lourenco, P. B. (2023). Selection and Scaling Approaches of Earthquake Time-Series for Structural Engineering Applications: A State-of-the-Art Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11831-023-10025-y>.
- Chuy-Rodríguez, T.J. (1999). *Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de la Habana].
- Cotilla, R. y Córdoba, D. (2010). *Notes on three earthquakes in Santiago de Cuba (14.10.1800, 18.09.1826, 07.07.1842)*. *Russian Geology and Geophysics*, 51: 228-236.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2018). *Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1 – Methodology*. Second Edition. Fema P-58-1. (December 2018), 340. <https://femap58.atcouncil.org/%0Ahttps://www.fema.gov/media-library/assets/documents/90380>.
- Kohrangi, M., Vamvatsikos, D., & Bazzurro, P. (2020). Multi-level conditional spectrum-based record selection for IDA. *Earthquake Spectra*, 36(4), 1819–1843. <https://doi.org/10.1177/8755293020919425>.
- Manfredi, V., Masi, A., Özcebe, A. G., Paolucci, R., & Smerzini, C. (2022). Selection and spectral matching of recorded ground motions for seismic

fragility analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(10), 4961–4987. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01393-0>.

Saracho, J. A., Perez, G. A., & Dip, O. (2021). Procedimiento para selección de acelerogramas para estudios de fragilidad en puentes típicos de Argentina [Procedure for selection of accelerograms for fragility studies in typical bridges of Argentina]. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (106), 76–111. <https://doi.org/10.18867/ris.106.553>.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

KMLC y GMB: concepción del estudio, análisis de datos, validación de resultados, redacción del original, revisión, corrección y aprobación de la versión final. BMT: responsable principal de la definición y justificación de los escenarios sísmicos. Revisión y aprobación de la versión final del artículo.

ORCID

KMLC, <https://orcid.org/0000-0002-7092-9179>

GMB, <https://orcid.org/0000-0001-7772-876X>

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

Recibido:14/09/2025

Aceptado:14/10/2025