

Zonas sismogénicas generadoras de tsunami en el Caribe

Seismogenic zones generating tsunamis in the Caribbean

DOI: 10.26640/22159045.2020.517

Fecha de recepción: 2019/08/27 Fecha de aceptación: 2019/11/07

Paola Andrea Quintero Rodríguez¹; Ronald Efrén Sánchez Escobar²

CITAR COMO:

Quintero Rodríguez, P. A.; Sánchez Escobar, R. E. (2020). Zonas sismogénicas generadoras de tsunami en el Caribe. *Bol. Cient. CIOH*; 39(1):15-23. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.2020.517

RESUMEN

Este estudio se enfocó en definir zonas tsunamigénicas en el Caribe teniendo en cuenta a los sismos como la principal fuente generadora. El análisis partió de la relación entre el registro histórico de tsunamis, sismos y el comportamiento de las fallas en los límites geotécnicos que rodean la placa Caribe. Se estableció el potencial tsunamigénico para cada zona de acuerdo a la relación estadística entre los sismos ocurridos con magnitud >6.0 Mw y profundidad <160 km, y el número de eventos de tsunami que se han registrado desde 1900 hasta el 2018, obteniendo un valor cuantitativo convencionalmente llamado coeficiente de eficiencia de tsunami (TE). En total se definieron siete zonas tsunamigénicas sobre límites geotectónicos de la placa Caribe y se establece con el nivel más alto de potencial generador de tsunami a la zona de las Antillas Menores.

PALABRAS CLAVE: sismogénica, sismo, tsunamigénica, tsunami, Caribe.

ABSTRACT

This study focused on define tsunamigenic zones in the Caribbean with earthquakes as the main generating resource. The analysis started from the relation between the historical tsunami records, earthquakes, and the behavior of the faults on the geotechnical boundaries that surround the Caribbean plate. The Tsunamigenic potential for each zone was established according to the statistical relation between the earthquakes with magnitude >6.0 Mw and depth <160 km and the number of earthquakes registered from 1900 to 2018. Quantitative value conventionally called Tsunami Efficiency (TE). Seven tsunamigenic zones were defined in total on geotectonic boundaries of the Caribbean Plate and the Antillas Menores zone was establish with the highest level of Tsunami generator potential.

KEYWORDS: Seismogenic, earthquake, tsunamigenic, tsunami, Caribbean.

¹ Orcid: 0000-0002-4559-2375. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Capitanía de Puerto de Tumaco, Vía El Morro, Tumaco, Nariño. Correo electrónico: pquintero@dimar.mil.co

² Orcid: 0000-0003-1452-4553. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Capitanía de Puerto de Tumaco, Vía El Morro, Tumaco, Nariño. Correo electrónico: rsanchez@dimar.mil.co

INTRODUCCIÓN

La generación de tsunamis se encuentra asociada a procesos geológicos, tales como sismos, explosiones de volcanes y deslizamientos submarinos o costeros. Es por esta razón que se define el tsunami como una perturbación en el océano o columna de agua que genera una serie de ondas, con alturas de olas y velocidades variadas, dependiendo del evento generador y su ubicación, ya que en el océano profundo estas olas pueden viajar a velocidades desde 500 km/h a 1 000 km/h, con altura máximo de 1 m, pero cerca de la costa puede disminuir su velocidad y crecer hasta decenas de metros de altura (IOC, 2016), provocando daños importantes como pérdida parcial o total de estructuras costeras, pérdidas humanas y contaminación ambiental.

La investigación de tsunamis a nivel global se ha enfocado principalmente en el océano Pacífico, puesto que la mayoría y los más grandes de estos fenómenos ocurren en este lugar (Correa, 2013). En el mar Caribe la frecuencia y magnitud de estos eventos es menor en comparación con el océano Pacífico, sin embargo, puede llegar a tener una estimación de daño significativo en las costas caribeñas, teniendo en cuenta la infraestructura presente y la densidad poblacional en el Caribe. De acuerdo al histórico de tsunamis en el Caribe, la principal fuente generadora de estos eventos son los sismos y volcanes, seguidos de deslizamientos submarinos y tsunamis de fuentes remotas (teletsunami) (Lander, Whiteside y Lockridge, 2002). Este potencial tsunamigénico se debe a la configuración tectónica de la placa del Caribe, la cual desde un punto de vista tectónico es el resultado de la interacción de las placas limítrofes Nazca, Cocos, Norteamericana, Suramericana, el bloque de Panamá y el bloque Norte de los Andes (Corbeau *et al.*, 2016; Pérez, Wesnousky, De la Rosa y Márquez, 2018) desde el Mesozoico hasta el presente, evolución asociada a un proceso cinemático continuo en la historia del océano Atlántico (Giunta *et al.*, 1996). La relación entre los procesos geológicos, las zonas donde ocurren y su potencial tsunamigénico en el Caribe es el principal interés de esta investigación, ya que permite identificar los tipos de contactos entre placas tectónicas con mayor o menor potencial tsunamigénico en el Caribe, con el propósito de

brindar conocimiento base en el campo de la amenaza por tsunami.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica sobre la placa Caribe, con una superficie aproximada de 3.2 millones de km², incluyendo una parte continental de América Central y el fondo marino del norte de América del Sur. Ubicada entre las latitudes 6° N - 21° N y longitudes de 60° W a 95° W, alcanzando profundidades hasta de 7 686 m en la fosa de las Caimán. Dentro de su configuración tectónica es de especial interés los límites de la placa, debido al movimiento constante entre ellas como generador de sismos, volcanes y deslizamientos de terreno. La placa Caribe limita al norte con la placa Norteamericana, al sureste con la placa Suramericana y al suroeste con las placas de Cocos y Nazca (Cotilla y Udías, 1999).

METODOLOGÍA

La identificación de zonas con potencial tsunamigénico inició con la recopilación de información tectónica, geológica y sísmica en el Caribe. El histórico de tsunamis se obtuvo de la base de datos del Centro Nacional de Información Ambiental (NCEI, anteriormente NGDC), de acuerdo con los principios establecidos por el Sistema Mundial de Datos (WDS) para geofísica, en el cual compilan un conjunto único de productos relacionados con tsunamis, como parte de un programa continuo para apoyar los intereses de los centros de alerta de tsunamis, ingenieros, oceanógrafos, sismólogos y el público en general (NCEI y WDS, 2019). La base de datos fue construida a partir de fuentes científicas y académicas, catálogos regionales aguas profundas, informes de eventos individuales y trabajos no publicados. Cada evento fue reportado por una o varias fuentes, y dependiendo de la congruencia de la información se determina la incertidumbre de los eventos denominada como "validación de la información", la cual esta categorizada en tres partes: definitiva, probable y cuestionable, de menor a mayor incertidumbre (NCEI y WDS, 2019). Además, los eventos de tsunami reportados en la base de datos empiezan desde el año 2000 a.C. hasta el presente en los océanos Atlántico, Índico y Pacífico, y los mares Mediterráneo y Caribe; sin embargo, para el

área de estudio se utilizaron 35 eventos desde 1900 hasta el 2018 con validación definitiva y probable. Con base en la información, tectónica,

geológica y sísmica, recopilada y procesada, y el histórico de tsunamis, se determinaron siete zonas tsunamigénicas para el Caribe (Figura 1).

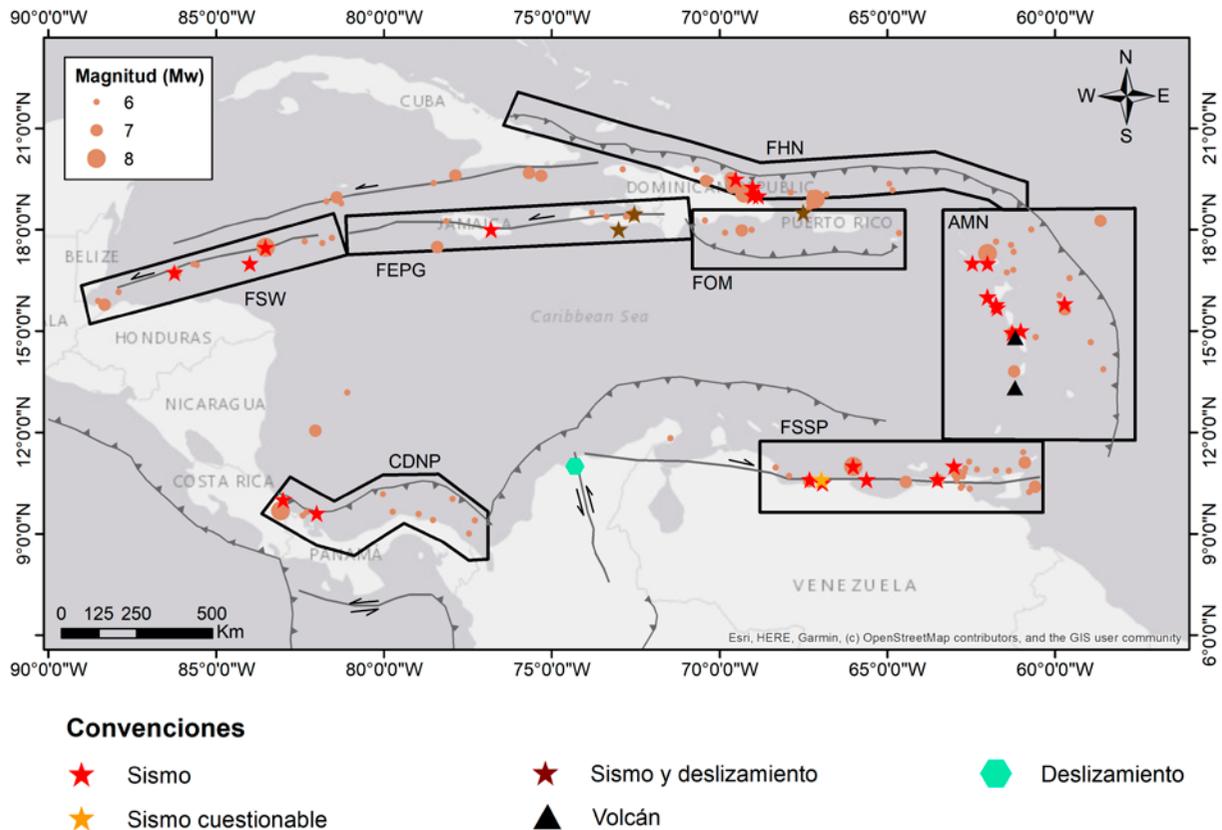


Figura 1. Zonas tsunamigénicas en el Caribe. Los círculos muestran la posición de los sismos submarinos y costeros. Las estrellas, triángulos y hexágonos muestran la posición de los eventos que generaron tsunamis, como sismos, volcanes y deslizamientos, respectivamente.

Adicionalmente, para cada zona se determinó un valor cuantitativo convencionalmente llamado coeficiente de eficiencia de tsunamis (TE), basados en la metodología propuesta por Gusiakov (2005), la cual se adaptó para el Caribe. Los valores de magnitud y profundidad se modificaron respecto a la propuesta de Gusiakov (2005), debido a que en el Caribe han ocurrido sismos generadores de tsunami con profundidades entre 100 km y 160 km, con magnitudes entre 6.0 Mw y 7.0 Mw, razón por la cual el coeficiente TE fue calculado como la relación entre el número de tsunamis (NT) de origen tectónico, deslizamiento de terreno y desconocido y el número total de sismos (NS) costeros y submarinos con magnitud Mw >6.0 y profundidad máxima de 160 km, que ocurrieron

durante los últimos 118 años (de 1900 a 2018) (Ec. 1). El término costero significa que también se tienen en cuenta los sismos ubicados a menos de 100 km de la línea de costa con magnitud entre 7.0 Mw y 8.0 Mw, y a 200 km de la línea de costa para eventos mayores a 8.0 Mw de magnitud. La base de datos de sismos se adquirió del Catálogo Comprensivo de Sismos de ANSS (ComCat). Catálogo conformado por sismos detectados en la red de sismógrafos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y la contribución de agencias internacionales (USGS, 2019).

$$TE = NT/NS * 100 \quad (1)$$

De acuerdo con la relación del coeficiente TE para cada zona tsunamigénica, se agruparon

las zonas en tres categorías, denominadas condicionalmente rojo, verde y azul, correspondiendo aproximadamente a un nivel alto (>60 %), medio (40 % - 60 %) y bajo (<40 %) (Gusiakov, 2005), en comparación con el promedio de todo el Caribe. Posteriormente, se correlacionaron los resultados con la configuración tectónica de cada zona, y de esta manera comprender el potencial de las zonas tsunamigénicas en el Caribe.

RESULTADOS

El marco tectónico de la región Caribe se caracteriza por la interacción entre las placas Caribe, Norteamericana, Suramericana, Nazca, Cocos, el bloque de Panamá y el bloque Norte de los Andes. Por definición, todo el contorno de la placa Caribe es tectónicamente activo, con sistemas de fallamiento lateral y convergente (Caicedo, Martinelli, Meyer y Steer, 1996). Al este de la placa Caribe se ubica el arco volcánico activo de las Antillas Menores y el arco remanente de Aves Swell, el cual se extiende desde el margen continental de América del Sur hasta las Antillas Mayores (Puerto Rico e Islas Vírgenes), producto de la subducción de la antigua corteza oceánica del océano Atlántico, con un plano de inclinación hacia el oeste (Audemard, 2014). En el segmento norte de este arco, nombrado como Antillas Mayores, desde Islas Vírgenes hasta República Dominicana, el proceso es doble: el primero localizado al sur de estas islas en el cual se encuentra una zona de subducción llamado fosa de los Muertos, caracterizado por sistemas de fallas inversas (Audemard y Castilla, 2016), también denominado como una zona de retroarco inverso (Bruña *et al.*, 2010); y el segundo proceso ubicado al norte de las islas, con un estilo estructural de subducción oblicua (Styron, García-Pelaez y Pagani, 2020), conocida como la trinchera de Puerto Rico (Laó-Dávila, 2014; Audemard y Castilla, 2016).

Otra zona de compresión se ubica desde el NE de Colombia hasta Costa Rica, conformado por la interacción entre la placa Caribe, el bloque de Panamá y el bloque Norte de los Andes. La placa Caribe subduce a ambos bloques y además el bloque de Panamá colisiona activamente con el bloque Norte de los Andes, provocando un movimiento paralelo sobre el margen continental

hacia el Caribe (Kellogg, Franco y Mora-Páez, 2019). Esta interacción genera deformaciones y prismas de acreción, nombradas de este a oeste como el cinturón Deformado del Caribe Sur (CDCS), cinturón Plegado y fallado de Sinú y cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) (Giunta *et al.*, 1996; Cerón, 2008).

Además de los sistemas convergentes, la placa Caribe tiene dos zonas con sistemas de fallamiento lateral: al noroeste en contacto con la placa Norteamericana presenta un movimiento de tipo transformante (Álvarez, 2009), conformado por el sistema de fallas Enriquillo-Platain-Garden, falla Swan, falla Walton y falla Oriente (Pindell y Kennan, 2009; Corbeau *et al.*, 2016); al sureste se da una unión triple entre la placa Caribe, Suramericana y el bloque Norte de los Andes, con un movimiento de cizallamiento principalmente lateral derecho (Pérez *et al.*, 2018). El contacto entre la placa Caribe con el bloque Norte de los Andes y la placa Suramericana está representado por la falla Morrocoy y San Sebastián, respectivamente, con un estilo estructural *strike-slip* lateral derecho y transtensional (Audemard y Castilla, 2016; Pérez *et al.*, 2018). Por otra parte, el contacto entre el bloque Norte de los Andes y la placa Suramericana tiene el mismo movimiento *strike-slip* lateral derecho, pero transpresivo, producto del movimiento hacia el noreste del bloque Norte de los Andes.

Adicional al comportamiento geotéctonico del Caribe se representaron espacialmente mediante el uso de un sistema de información geográfica los tsunamis históricos reportados por el NCEI, categorizados de acuerdo al tipo de fuente generadora del tsunami como sismo, sismo y deslizamiento, volcán, deslizamiento y sismo cuestionable; este último hace referencia a los casos que tienen incertidumbre en su información. Se obtuvieron en total 34 eventos de tsunami, relacionados con alguna zona tectónicamente importante (Figura 1). Producto de esta relación se identificaron siete principales zonas tsunamigénicas. Estas regiones son cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), falla Swan (FSW), fallas Enriquillo-Platain-Garden (FEPG), fosa de los Muertos (FOM), falla Norte de Hispaniola (FNH), Antillas Menores (AMN) y fallas San Sebastián y el Pilar (FSSP) (1).

Los resultados de los cálculos del coeficiente

TE para las siete principales zonas tsunamigénicas se resumen en la Tabla 1, donde las zonas se enumeran en orden decreciente respecto a su actividad de tsunami, es decir, el número de tsunamis que ocurrieron durante el periodo de tiempo de estudio dentro de cada zona. Como era de esperar, la región de las Antillas Menores está

en la parte superior de esta lista, lo que puede explicarse por las diferentes fuentes de tsunami, ya que se han reportado tsunamis producto de la actividad sísmica y erupciones de volcanes. Los datos presentados en la Tabla 1 también se muestran en la Figura 2, como un diagrama donde cada columna corresponde a una zona particular.

Tabla 1. Número de tsunamis y sismos que ocurrieron en las zonas tsunamigénicas del Caribe y su respectivo ET.

Región tsunamigénica	Cantidad de sismos	Cantidad de tsunamis	ET (%)
AMN	19	14	74
FSSP	23	7	30
FHN	15	4	27
FEPG	6	3	50
FSW	10	3	30
CDNP	10	2	20
FOM	5	1	20

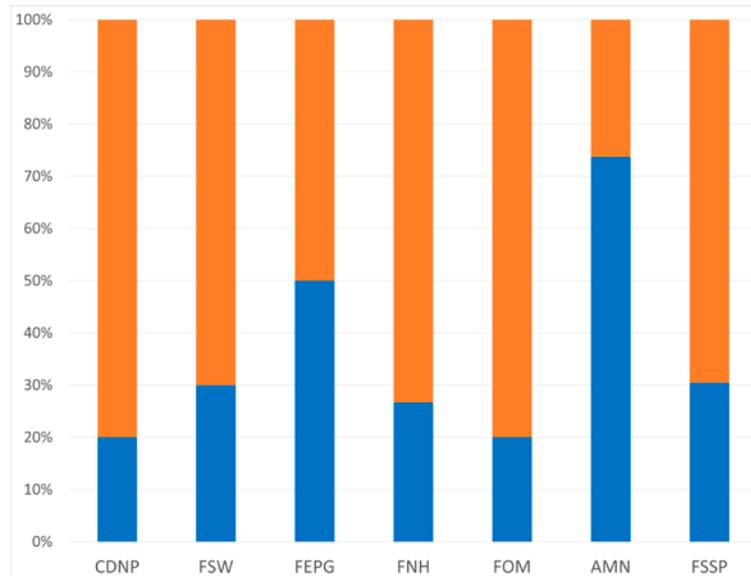


Figura 2. Diagrama que muestra la fracción de los eventos tsunamigénicos (color azul) en relación al total de sismos submarinos y costeros (color naranja) que ocurrieron desde 1900 hasta el 2018, con magnitudes mayores a 6.0 Mw y máxima profundidad de 160 km.

Finalmente, la Figura 3 muestra la comparación del coeficiente TE en las zonas tsunamigénicas del Caribe. Se obtuvieron seis zonas en nivel

bajo, una en nivel medio (zona FEPG) y una en nivel alto (zona AMN), de acuerdo con los rangos propuestos por Gusiakov (2005).

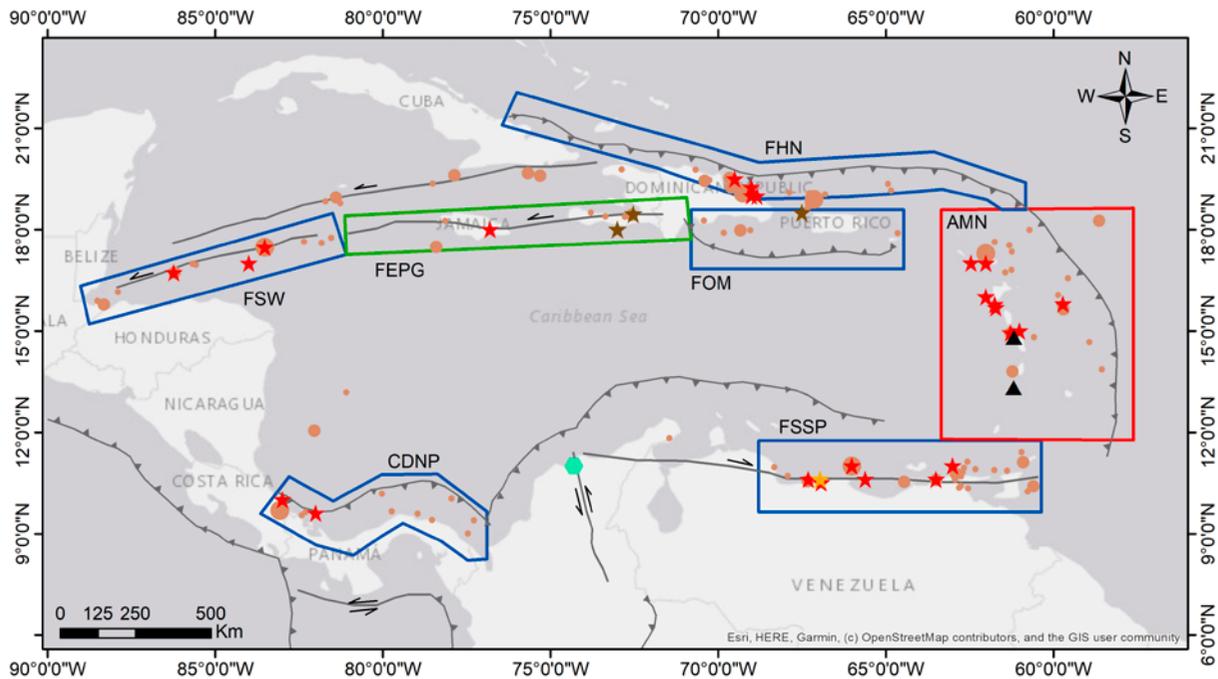


Figura 3. Categorización de las zonas tsunamigénicas en el Caribe respecto a su coeficiente TE. Rojo es nivel alto, verde nivel medio y azul nivel bajo.

DISCUSIÓN

Los estudios para definir y caracterizar fuentes tsunamigénicas en el Caribe se han enfocado en recopilar los eventos históricos generadores de tsunami, como es el caso de las bases de datos del NCEI o algunas investigaciones como Lander (1997); Lander *et al.* (2002); Correa (2013). El siguiente paso en la investigación se ha basado en la simulación de estos eventos históricos por medio de diferentes códigos numéricos con el propósito de realizar una aproximación de la generación, propagación y altura de tsunami en las costas, por ejemplo, el evento de 1882 y 1991 en el CDNP (Yandar y De la Cruz, 2015; Denyer, Arias y Personius, 2011; Goes, Velasco, Schwartz y Lay, 1993); el evento del 12 de enero de 2010, en Haití con magnitud 7.0 Mw, que causó más de 200 000 muertos y 8 billones de dólares en pérdidas (Calais *et al.*, 2010), o en la región de las Antillas Menores donde ocurrió un sismo en Guadalupe de magnitud 8.3 Mw en 1843 (Harbitz *et al.*, 2012). Otros estudios como el de Harbitz *et al.*, (2012) y Correa (2013) han utilizado los mecanismos focales de los sismos tsunamigénicos para calcular un peor escenario posible y simular

la propagación de onda de tsunami, sin embargo, pocos estudios se han enfocado en identificar y/o calcular el potencial tsunamigénico de zonas específicas en la placa Caribe o definir su capacidad en comparación a otras áreas.

El presente estudio logró relacionar el comportamiento geotectónico con el coeficiente de ET, y de esta manera dividir el Caribe en siete zonas con potencial tsunamigénico, concluyendo que el sector de las Antillas Menores tienen el mayor potencial generador de tsunami en comparación con las otras zonas del Caribe. Resultados que coinciden con el cálculo de probabilidad de tsunami de Parsons y Geist (2009), donde definen las Antillas Menores con la mayor probabilidad de tsunami asociada a la subducción activa de la Placa Caribe y en Jamaica con probabilidad relativamente alta a causa de límite transformante entre la Placa Caribe y Norteamericana; sin embargo, Parsons y Geist (2009) también catalogan como probabilidad relativamente alta a las islas más orientales de las Antillas Mayores (Islas Vírgenes, Puerto Rico y La Española) debido su proximidad al límite de subducción de la placa del Caribe y

América del Norte, pero de acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, el potencial tsunamigénico en esta zona es bajo. Dicha diferencia de los resultados en las Antillas Mayores está directamente relacionado al tipo de información utilizado en cada estudio, ya que Parsons y Geist (2009) se basan en las alturas de tsunami y el presente estudio en la cantidad de registros sísmicos y de tsunami, permitiendo definir como probabilidad alta zonas con pocos eventos de tsunami, pero con una altura de tsunami alta en comparación con otras registradas en el Caribe.

Otra investigación enfocada en estimar el potencial tsunamigénico en el Caribe es la realizada por McCann (2006), la cual define en niveles de alto, medio y bajo potencial. McCann (2006) clasifica la zona norte de las Antillas Menores de la misma manera como en la presente investigación (potencial alto), pero hay cierta divergencia en las zonas del CDNP, la FOM y un sector de la FHN, ya que varían de potencial alto a bajo. Diferencia probablemente relacionada a la información utilizada por McCann (2006), ya que se basó en el ángulo de falla, la dirección del *slip* (que varía de vertical a horizontal), la simplicidad del margen y la historia de terremotos y de tsunami, haciendo más robusto el análisis y los resultados obtenidos en comparación con el presente.

CONCLUSIONES

La principal conclusión de este estudio es la correlación entre el comportamiento tectónico y la actividad sísmica con capacidad para generar un tsunami. Las zonas con mayor registro sísmico son FSSP y AMN, sin embargo, solo la zona de las AMN tienen un nivel alto de potencial tsunamigénico. Esta diferencia se asocia a su configuración tectónica, ya que pertenece a una zona de convergencia entre placas tectónicas con comportamientos inversos en los sistemas de fallas, existiendo una mayor posibilidad de generar desplazamientos verticales en el terreno, que provocan mayor perturbación en la capa de agua. Caso contrario ocurre en la zona FSSP, que tiene el número más alto de sismos ocurridos entre las zonas definidas, pero bajo nivel de potencial tsunamigénico, debido a que las fallas son principalmente de tipo *strike-slip*, lo

que indica un movimiento constante del terreno, pero con comportamiento lateral y no vertical, disminuyendo así su potencial tsunamigénico.

La zona de FEPG, con nivel medio de coeficiente TE y comportamiento de falla tipo *strike-slip* lateral izquierdo, puede generar incoherencia en los resultados, porque en este caso se esperarían niveles bajos del coeficiente TE debido al tipo de comportamiento tectónico. Es por esta razón, que se continuará la investigación enfocada en los sismos históricos generadores de tsunami, teniendo en cuenta los mecanismos focales y un mayor detalle de los rasgos estructurales con capacidad tsunamigénica.

De acuerdo al alcance de esta investigación, se comparó estadísticamente la capacidad tsunamigénica de cada zona, sin embargo, se hace necesario evaluar a futuro el comportamiento geodinámico del Caribe y proponer modelos de fuentes sísmicas, con el fin de analizar la amenaza por inundación de tsunami en las costas colombianas.

REFERENCIAS

- Álvarez, J. (2009). *Tectónica activa y geodinámica en el Norte de Centroamérica*. [Tesis de doctorado]. Universidad Complutense de Madrid. Repositorio de la producción académica en abierto de la UCM. <https://eprints.ucm.es/30783/>
- Audemard, F. (2014). Active block tectonics in and around the Caribbean: A review. In Schmitz, M., Audemard, F. y Urbani, F. (eds.). *The northeastern limit of the South American Plate: Lithospheric structures from surface to the mantle*. (pp. 29-78). Editorial Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería-Universidad Central de Venezuela/ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Funvisis).
- Audemard, F.; Castilla, R. (2016). Present-day stress tensors along the southern Caribbean plate boundary zone from inversión of focal mechanism solutions: A successful trial. *Journal of South American Earth Sciences*, 71:309-319. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.06.005>
- Bruña, J. L.; Muñoz-Martín, A.; Brink, U. S.; Carbó-Gorosabel, A.; LLanes, P.; Martín-Dávila, J.; Córdoba-Bar A., D.; Catalán, M. (2010).

- Gravity modeling of the Muertos Trough and tectonic implications (north-eastern Caribbean). *Mar. Geophys Res.*, 31, 263-283. <https://doi.org/10.1007/s11001-010-9107-8>
- Caicedo, J. H.; Martinelli, B.; Meyer, H.; Steer, R. (1996). *Efecto de tsunami del mar Caribe en la costa de Colombia*. [ponencia]. X Seminario Nacional de Ciencia y Tecnologías del Mar, Comisión Colombiana de Oceanografía y Colciencias, Bogotá.
- Calais, E.; Freed, A.; Mattioli, G.; Amelung, F.; Jónsson, S.; Jansma, P.; Moplaisir, R. (2010). Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake. *Nat. Geosci*, 3 (11):794-799. <https://doi.org/10.1038/ngeo992>
- Cerón Abril, J. F. (2008). *Crustal Structure of the Colombian Caribbean Basin and Margins*. [Geology PhD Thesis, University of Southern California]. <https://pqdtopen.proquest.com/doc/304458886.html?FMT=ABS>
- Corbeau, J.; Rolandone, F.; Leroy, S.; Mercier de Lépinay, B.; Meyer, B. (2016). The northern Caribbean plate boundary in the Jamaica Passage: Structure and seismic stratigraphy. *Tectonophysics Journal*, 675, 209 - 226. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.022>
- Correa, R. (2013). *Evaluación de la peligrosidad debido al impacto de tsunamis de origen tectónico en el litoral y área insular del Caribe colombiano*. [Tesis de Maestría en Física Aplicada, Universidad del Norte].
- Cotilla, M.; Udías, A. (1999). Geodinámica del límite Caribe-Norteamérica. *Rev. Soc. Geol. de España*, 12(2):175-186.
- Denyer, P.; Arias, O.; Personius, S. (2011). Efecto tectónico del terremoto de Limón. *Revista Geológica América Central*. Vol. Especial: 39-52. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.13394>
- Giunta, G.; Navarro, E.; Beccaluca, L.; Bellia, S.; Comin-Chiaramonti, P.; Dengo, G.; Montero, W.; Urbani, F.; Carnemolla, S. (1996). Geología de las márgenes de la Placa Caribe: Generalidades en Guatemala, Costa Rica, La Española y resultados preliminares del análisis de una transversal en la cordillera de la costa de Venezuela. *Rev. Geolo. Amér. Central*. 19(20), 7-28. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i19-20.8623>
- Goes, S.; Velasco, A.; Schwartz, S.; Lay, T. (1993). The April 22, Valle de la Estrella, Costa, Costa Rica (Mw = 7.7) Earthquake and Its Tectonic Implications: A Broadband Seismic Study. *Journal of Geophysical Research*, 98:8127-8142. <https://doi.org/10.1029/93JB00019>
- Gusiakov, V. K. (2005). Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific. *Marine Geology*, 215, 3-9. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.05.033>
- Harbitz, C. B.; Glimsdal, S.; Bazin, S.; Zamora, N.; Løvholt, F.; Bungum, H.; Smebye, H.; Gauer, P.; Kjekstad, O. (2012). Tsunami hazard in the Caribbean: Regional exposure derived from credible worst case scenarios. *Continental Shelf Research*, 8, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.02.006>
- Intergovernmental Oceanographic Commission. (2016). Tsunami Glossary [Third Edition, UNESCO. IOC. *IOC Technical Series*, 85. (English, French, Spanish, Arabic, Chinese)]. http://itic.iocunesco.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1328&Itemid=1142&lang=en
- Kellogg, J.; Franco, G. B.; Mora-Páez, H. (2019). Cenozoic tectonic evolution of the North Andes with constraints from volcanic ages, seismic reflection, and satellite geodesy. *Andean Tectonics*, 69-102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816009-1.00006-X>
- Lander, J. F. (1997, 11-13 June). *Caribbean Tsunamis: An initial history*. [ponencia]. Caribbean Tsunami Workshop. Sea Grant College Program, University of Puerto Rico.
- Lander, J.; Whiteside, L.; Lockridge, P. A. (2002). A Brief History of Tsunamis in the Caribbean Sea. *Science of Tsunami Hazards*, 20(2):57-94.
- Laó-Dávila, D. (2014). Collisional zones in Puerto Rico and the northern Caribbean. *J. South Am. Earth Sci*, 54,1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.04.009>

- Mccann, W. R. (2006). Estimating the threat of tsunamigenic earthquakes and earthquake induced-landslide tsunami in the caribbean. En A. Mercado-Irizarry y P. Liu (Eds.), *Caribbean. Tsunami Hazard* (43-65 pp.). World Scientific. https://doi.org/10.1142/9789812774613_0002
- National Centers for Environmental Information y World Data Center. (2019). *Global Historical Tsunami Database*. [base de datos]. Centros Nacionales de NOAA para Información Ambiental. NCEI y WDS. <https://doi.org/10.7289/V5PN93H7>. Consultado el 15 de febrero del 2019 https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml
- Parsons, T.; Geist E. L. (2009). Tsunami probability in the Caribbean región. *Pure Appl Geopgys*, 165(11):2089-2116. https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0057-6_7
- Pérez, O. J.; Wesnousky, S. G.; De la Rosa, R.; Márquez, J. W. (2018). On the interaction of the orth Andes plate with the Caribbean and South American plates in northwestern South America from GPS geodesy and seismic data. *Geophysical Journal International*, 214(3):1986-2001. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy230>
- Pindell, J. L.; Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: An update. *Geological Society, London. Special Publications*, 328(1), 1-55. <https://doi.org/10.1144/SP328.1>
- Styron, R.; García-Pelaez, J.; Pagani, M. (2020). CCAF-DB: The Caribbean y Central American Active Fault Database. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20:831-857. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-831-2020>
- US Geological Survey. (2019). *Earthquake Catalog* [base de datos]. US Geological Survey. Consultado el 15 de febrero del 2019. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Yandar, M. A.; De la Cruz, R. A. (2015). Aproximación numérica a la propagación de ondas de tsunami y caso de estudio en la costa Caribe Colombiana. *Boletín de Matemáticas*, 22(2):135-149.