

Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

MAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANA

SEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

ROSARIO MICHEL, Gregorio Antonio
Defensa Civil, República Dominicana

Autor corresponsal: gregorio.michel@gmail.com

GUZMÁN JAVIER, Vladimir E.
Servicio Geológico Nacional, República Dominicana
vguzman@sgn.gob.do

Recibido: 18-01-2022; **Aceptado:** 05-05-2022

Resumen

La Bahía de Ocoa se encuentra expuesta a la ocurrencia de eventos sísmicos generadores de tsunamis, eventos que han ocurrido en el pasado, como el del 18 de octubre de 1751 y el del 11 de mayo de 1910 lo que constituye claros ejemplos del potencial destructivo de los eventos tsunamigénicos que pueden ocurrir en el área de estudio. En años recientes se ha incrementado el crecimiento económico de la región como resultado de la exploración de

VLADIMIR E. GUZMÁN, J., & ROSARIO MICHEL, G. A. (2022). MAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANA. *Latitude*, 2(16), 17-43.
<https://doi.org/10.55946/latitude.v2i16.193>

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-Compartir igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0) [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

hidrocarburos, actividad minera, así como la actividad turística, entre otros, lo cual ha ocasionado el aumento de la población y el incremento en la infraestructura de servicios, transporte, energía, etc.; lo cual origina una concentración de activos expuestos a la ocurrencia de un evento tsunamigénico con el potencial de ocasionar daños severos. Ante este escenario, es indispensable la identificación de las zonas de peligro por inundación ante la ocurrencia de tsunamis que potencialmente puedan ocurrir, lo cual es posible representar a partir de mapas de peligro de inundación por tsunami para diferentes periodos de retorno, así como para eventos que potencialmente puedan ocurrir en el área de estudio o ante la simulación de un evento con características históricas excepcionales. Para la identificación de las zonas potencialmente peligrosas se seleccionaron datos sísmicos del área para la elaboración de un modelo de amenaza sísmico local. En base a este modelo se creó un catálogo sísmico de la zona de estudio y se caracterizaron las fuentes sísmicas generadoras de tsunamis. Asimismo, se presentó un mapa de la sismicidad distribuida de Bahía de Ocoa, considerando las estructuras geológicas y la tectónica local.

Palabras clave: Tsunami, catálogo sísmico, mapa, fuente sísmica, Bahía de Ocoa.

Abstract

The Ocoa Bay is exposed to the occurrence of seismic events, that generate tsunamis. Tsunamis events that have occurred in the past, such as October 18, 1751 and May 11, 1910, are clear examples of the destructive potential of tsunamigenic events in the study area. In recent years, economic growth in the region has increased as a result of hydrocarbon exploration, mining, and tourism activities, among others, which has led to an increase in population, infrastructure for services, transportation, energy, etc. This causes a concentration of exposed assets to the occurrence of a tsunamigenic events with the potential to cause severe damage. Given this scenario, it is essential to identify flood-hazard zones in case of tsunamis occurrences, which can be represented by tsunami flood hazard maps for different return periods, including events which could potentially occur in the study area or in the simulation of an event with exceptional historical characteristics. For the identification of potentially dangerous zones, seismic data were selected for the elaboration of a local seismic hazard model. Based on this model, an earthquake catalogue of the study area was created and the seismic sources generating tsunamis were characterized according to a seismic zonation classification. Likewise, a map of the distributed seismicity of Ocoa Bay was presented considering the geological structures and local tectonics.

Key words: *Tsunami, earthquake catalogue, maps, seismic source, Ocoa Bay.*

Introducción

Los tsunamis son peligros naturales poco frecuentes, pero de alto impacto. Su potencial de destrucción ha sido evidente en eventos recientes, como por ejemplo el tsunami de Indonesia en septiembre de 2018 que destruyó la ciudad de Palu y, yendo un poco más atrás, el tsunami de

Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalSEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

Tohoku (Japón) en 2011 con pérdidas superiores a 210 billones de dólares o el tsunami del Océano Índico en 2004, con más de 220,000 muertes en más de 15 países.

Debido a su baja frecuencia de ocurrencia, la cuantificación del peligro y riesgo por tsunami requieren el desarrollo de modelos avanzados que den cuenta no solo de las características del evento detonante (generalmente un terremoto de gran magnitud) sino de la propagación de la ola desde el foco de este y su llegada a las zonas costeras a partir de modelos numéricos complejos.

En la historia reciente del Mar Caribe, se tiene conocimiento de que los diferentes territorios insulares han sido afectados por tsunamis en diferentes periodos y magnitudes (Joseph, 2011). Es el tsunami de Lisboa en 1755 el evento más conocido, sin embargo, éste fue un evento lejano y, por lo tanto, la Región del Caribe resultó poco afectado. Para este evento se tienen registros de daños, basados en reportes históricos (Roger, 2010), ocurridos en las Antillas Menores (Saba, Antigua, Dominica, Guadalupe, Martinica). Sin embargo, el NGDC y la NOAA poseen una base de datos para registros de tsunamis en la Cuenca del Caribe, la cual incluye las siguientes variables: punto de generación y génesis, altura máxima registrada, depósitos y paleo-depósitos; además de las boyas de la Comisión Oceanográfica Internacional.

En la República Dominicana, el 18 de Octubre de 1751, la Provincia de Azua fue devastada por un gran terremoto ($MMI \approx VIII$) y abrumado por la resultante de un tsunami que cubrió completamente la ciudad. Este tsunami destruyó todas las casas que se habían reconstruido desde 1691. Este evento ocurrió a las 03:30 P.M. en el punto de coordenada 18.5N, 70.7W. Según Taber (1922), la situación de Azua a la entrada de la Bahía de Ocoa incrementó el grado de destructividad del tsunami. Finalmente, Azua fue abandonado y reconstruido en una zona más al interior de la región.

El 11 de Mayo de 1910 se produjo un terremoto con una distribución de intensidades que indicaba un origen a lo largo de las fallas entrelazadas al Canal de Jamaica, la misma zona de falla que produjo el tsunami que azotó a Azua en octubre de 1751, con epicentro en el punto de coordenada 18.3N, 70.7W. Scherer informó que “el impacto fue más fuerte en la Bahía de Ocoa ($MMI \approx VII$), donde el dique de la zona quedó destruido. Debido a la situación geofísica en la bahía reportada por Taber para 1751, y la severidad del terremoto, se pudo haber generado un tsunami con las mismas condiciones que el presentado en 1751.

Latitude:

**Multidisciplinary
Research Journal**MAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

De allí la importancia de obtener mapas de peligro de inundación por tsunami, debido al peligro potencial de que ocurra un evento de tsunami con la capacidad de afectar la Bahía de Ocoa. El análisis de las fuentes sísmicas con el potencial de ocasionar eventos tsunamigénicos, mediante el uso de modelos de estado del arte en la modelación de esta amenaza de origen natural contribuye

a proponer las herramientas de prevención para las mejores opciones de planificación y delimitación del uso del suelo.

En este trabajo, mediante la elaboración de un modelo de amenaza y la caracterización de fuentes sísmicas a partir de la selección de datos sísmicos, se verifica la sismicidad distribuida en la Bahía de Ocoa, provincia de Azua en República Dominicana.

Situación en República Dominicana

La Provincia de Azua forma parte de uno de los nueve polos turísticos de la República Dominicana para la promoción de desarrollo turístico. El Decreto n.º 196-99 del gobierno dominicano establece que, todo el litoral marino de la provincia Azua, zona de estudio, forma parte de las demarcaciones turísticas para la consolidación de la industria del turismo del área (Boletín del Observatorio de Políticas Sociales y Desarrollo, 2019).

La población de la provincia Azua ha sido estimada en 214, 311 habitantes, de acuerdo con la Oficina Nacional de Estadística (ONE, 2010) mientras que el número de turistas por año es de 1 655 (Tercera Comunicación Nacional de República Dominicana para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2014-2017).

Las demarcaciones territoriales expuestas a fenómenos de inundación por tsunamis a ser consideradas en la zona de estudio corresponden a los municipios de Azua, Las Charcas, Sabana Yegua, Pueblo Viejo y Estebanía. Estos municipios se han tomado en cuenta, ya que se encuentran ubicados en el perímetro cercano a la Bahía de Ocoa, en la provincia de Azua. (Tabla 1).

Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

Tabla 1

Población expuesta en área de Bahía de Ocoa

Municipios	Distritos municipales	2010	Variación
Azua	Azua	59 319	27.68%
	Barrio Arriba	5 262	2.46%
	Las Barías-la Estancia	6 882	3.21%
	Los Jovillos	5 962	2.78%
	Puerto Viejo	2 194	1.02%
	Barreras	2 364	1.10%
	Doña Emma Balaguer		
	Viuda Vallejo	2 759	1.29%
	Clavellina	2 672	1.25%
Las Lomas	3 931	1.83%	
Las Charcas	Las Charcas	8 191	3.82%
	Palmar de Ocoa	3 052	1.42%
Sabana Yegua	Sabana Yegua	10 313	4.81%
	Proyecto 4	3 584	1.67%
	Ganadero	2 240	1.05%
	Proyecto 2-C	2 883	1.35%
Pueblo Viejo	Pueblo Viejo	7 191	3.36%
	El Rosario	4044	1.89%
Estebanía	Estebanía	5 640	2.63%
Total		138483	64.62%

Nota. ONE, tomado de la Oficina Nacional de Estadística 2010

Se resalta de esto que la mayor parte de la población de Azua (64.62%) se encuentran ubicada próximo a zonas expuestas a eventos tsunamigénicos, por lo que el riesgo aumenta por igual.

La Bahía de Ocoa ha presentado eventos relevantes de tsunami de origen local que ocasionaron la reubicación de algunos poblados. Sin embargo, no existen evidencias de la ocurrencia de eventos tsunamigénicos de origen lejano que se hayan atribuido a la zona de estudio.

En años recientes la Bahía de Ocoa ha presentado un crecimiento poblacional y económico importante observándose una reducción de un 61.0% en 2002 a un 53.8% en 2011, como resultado de la exploración de hidrocarburos, actividad minera con la presencia de explotación de una serie de canteras, así como la actividad turística, entre otros (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2013); todo esto ha ocasionado el aumento de la población, y a su vez un incremento en la infraestructura de servicios, transporte, energía, etc. Este aumento proporcional ha originado una concentración de activos expuestos, los cuales podrían verse afectados en caso de que ocurra un tsunami que inunde las zonas propensas a mayor peligro. Por lo anterior, es necesario contar con estudios que permitan identificar las zonas dentro de la Bahía de Ocoa que presenten la mayor amenaza por inundación de tsunami, ya que esto permitirá que los planes y programas de crecimiento urbano y aprovechamiento de suelo prioricen el desarrollo de infraestructura en la bahía hacia zonas seguras.

MÉTODOS

Identificación de Terremotos

La identificación de terremotos a través de un catálogo histórico permite el procesado y desarrollo de modelos de recurrencias, así como la entrada de parámetros de las fuentes sísmicas en programas computacionales. Por ello, se realizó una selección de los datos sísmicos registrados en la zona de estudio.

Estos datos se obtuvieron de las siguientes bases de datos para la República Dominicana:

- USGS-NEIC (Servicio Geológico de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés)
- ISC-GEM (Centro Internacional de Sismología, por sus siglas en inglés)
- CNS-UASD (Centro Nacional de Sismología de la UASD)
- OSPL (Observatorio Sismológico Politécnico Loyola)
- SGN (Servicio Geológico Nacional)

Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

La Tabla 2 muestra las coordenadas de los vértices del polígono correspondiente al área de estudio en la Bahía de Ocoa:

Tabla 2

Vértices del área de estudio en la Bahía de Ocoa

Vértices Área de Estudio	
X	Y
X1: 387 453.868	Y1: 1 991 142.074
X2: 386 756.336	Y2: 1 997 261.195
X3: 320 637.984	Y3: 1 918 040.081
X4: 252 222.412	Y4: 2 002 297.352
X5: 325 332.891	Y5: 2 067 288.917

Nota. Elaboración propia por el grupo de investigación

La Tabla 3 resume los resultados de la compilación de informaciones sísmicas, almacenadas en una base de datos de 704 epicentros, localizados en la Bahía de Ocoa y su entorno, en la ventana temporal de este estudio. Los datos mostrados están actualizados hasta el 31 de diciembre de 2019.

Tabla 3

Número de registros sísmicos para el período de estudio

Período	Número de Sismos
1900-1981	13
1982-2006	51
2007-2017	536
2018-2019	104
TOTAL	704

Nota. Elaboración propia por el grupo de investigación

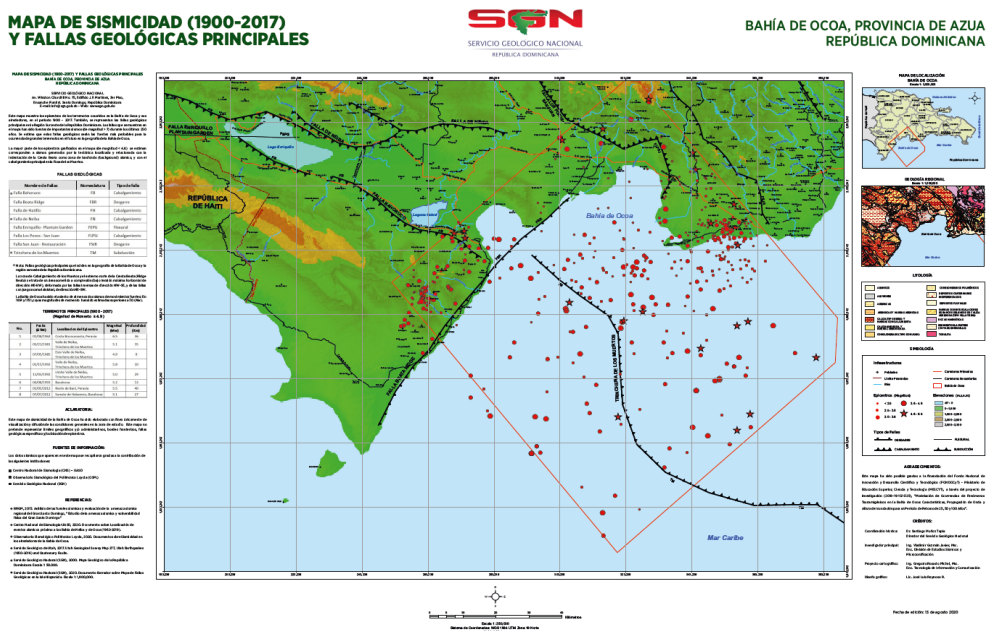
La Tabla 3 muestra los terremotos ocurridos desde el período de tiempo de 1900 hasta 2019. De este catálogo preliminar de eventos, un 76% corresponden a sismos posteriores al año 2006.

Mapa de Sismicidad

Se elaboró un mapa de sismicidad, escala 1: 250,000 con fines únicamente de visualización y difusión de las condiciones generales en la zona de estudio. Este mapa muestra los epicentros de los terremotos ocurridos en la Bahía de Ocoa y sus alrededores, en el período 1900-2017. De forma particular, para este mapa se seleccionó los registros sísmicos hasta el 2017 por poseer el mayor número de eventos como se describe en la Tabla 3. También, se representan las fallas geológicas principales en la Región Suroeste de la República Dominicana. En la Figura 1 se puede visualizar el mapa propuesto por este grupo de investigación.

Figura 1

Mapa de Sismicidad (1900-2017) y Fallas Geológicas Principales Bahía de Ocoa, Provincia de Azua, República Dominicana. Escala 1: 250,000.



Nota: elaboración propia por el equipo de investigación

Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

Elaboración del Catálogo Sísmico

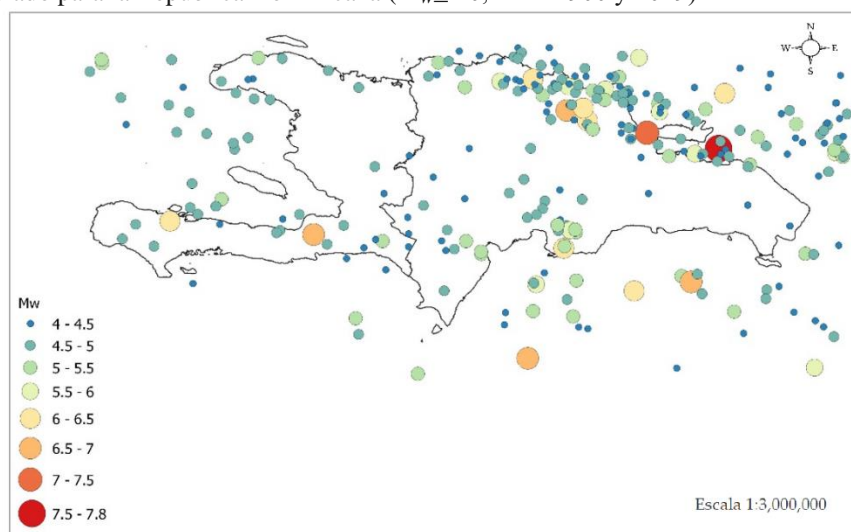
El catálogo histórico utilizado en este estudio contiene información de distintas fuentes nacionales, como el CNS-UASD, OSPL y el SGN e internacionales, como el USGS-NEIC y la v7.0 del catálogo instrumental global ISC-GEM (Storchak et al., 2013). Para fines de validación y verificación de eventos particulares, se utilizaron otras fuentes de datos (por ejemplo, Engdahl y Villaseñor, 2002). El catálogo solo toma en cuenta la sismicidad instrumental y cubre el período entre el 1 de enero de 1900 al 31 de diciembre de 2019, con una magnitud umbral igual a $M_w 4.0$.

En el catálogo se realizó una remoción de réplicas para cumplir con los requisitos de un proceso de Poisson. Este proceso se caracterizó por seguir un procedimiento dependiente de la magnitud que define las ventanas de tiempo y distancia, similar al propuesto por Gardner y Knopoff (1974). Esto con el propósito de presentar exclusivamente los sismos principales en la versión final del catálogo de terremotos.

Asimismo, se utilizaron las relaciones globales de Scordilis (2006) con el objetivo de realizar una homogeneización de las magnitudes a la magnitud de momento (M_w) para eventos con magnitudes originales reportadas en M_s y/o M_b . La Figura 2 muestra el catálogo de estudio depurado con la actividad sísmica registrada entre 1900 y 2019.

Figura 2

Catálogo depurado para la República Dominicana ($M_w \geq 4.0$, entre 1900 y 2019).



Nota: Elaboración propia por el grupo de investigación

Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

Posteriormente, se realizó un proceso de verificación de completitud para diferentes valores de magnitud (por ejemplo, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7.0), siguiendo el procedimiento propuesto por Tinti y Mulargia (1985). La Figura 3 muestra gráficamente la verificación de completitud para diferentes valores de M_w realizada para el catálogo de trabajo del presente estudio.

Figura 3

Chequeo de completitud para el catálogo de estudio para diferentes valores de M_w .

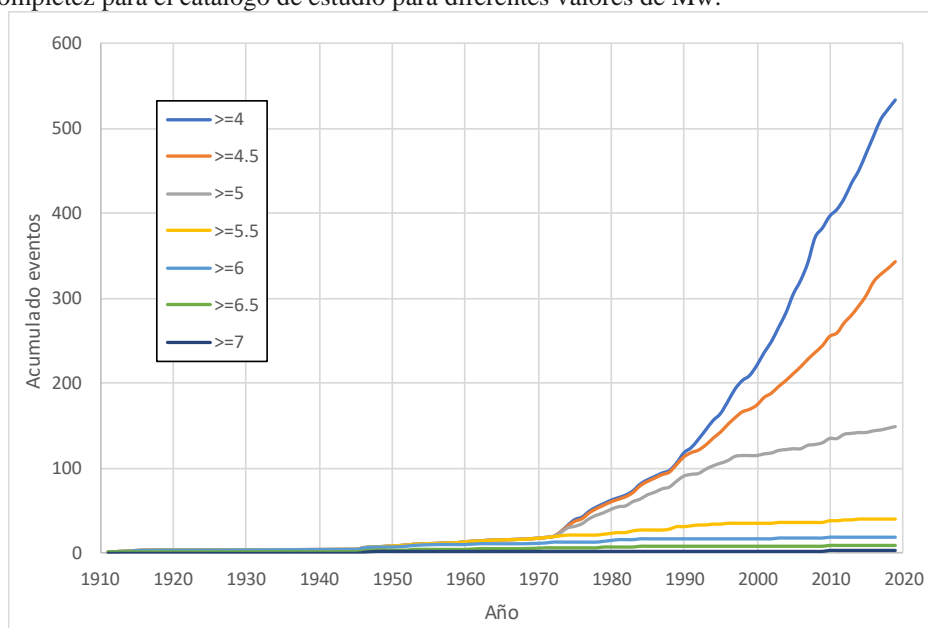


Tabla 4

Períodos de Completitud para catálogo de estudio

Período de Completitud	$M_w \geq$
1911-2019	7.0
1946-2019	5.5
1973-2019	4.5
1990-2019	4.0

Nota. Elaboración propia por el grupo de investigación

Aunque para la región existen registros históricos desde 1520, debido a las incertidumbres asociadas a su magnitud, localización y magnitud, para la estimación de los parámetros de sismicidad (parámetros a y b) de las fuentes sísmicas, únicamente se consideraron los terremotos registrados a partir de 1900.

No obstante, tanto la información sísmica histórica como instrumental para el área de estudio ha sido revisada y tomada en cuenta como indicador para la asignación de los valores de la magnitud última (M_u) a todas las fuentes sísmicas modeladas.

Esta investigación se centra en la elaboración de un catálogo de terremotos que dé cuenta de todos los eventos que pueden llegar a ocurrir, durante una ventana de observación suficientemente larga. Y, en consecuencia, identificar aquellos que tienen las características necesarias para ser considerados de interés en la generación de tsunamis.

Caracterización de las Fuentes Sísmicas

Para caracterizar las fuentes sismogénicas en el área de estudio se asignaron a dichas fuentes cada uno de los eventos identificados en el catálogo histórico a través de la implementación de una combinación de distintas metodologías. Dentro de estas metodologías, el primer paso a realizar consistió en representar gráficamente los epicentros que se muestran en la Figura 2 para identificar las áreas en donde se concentra la sismicidad, seguido de una revisión de las zonificaciones sísmicas realizadas anteriormente en la región del estudio (ejemplo, ECHO et al., 2004; Bertil et al., 2010; 2015).

La geometría y las características del proceso de subducción fueron asumidas, cuando fue posible, a partir del conjunto de datos Slab v2 Hayes et al. (2018) que contiene, entre otra información, una serie de curvas de nivel que dan cuenta de la variación en profundidad de los procesos de subducción y valores típicos de la orientación de las rupturas, entre otros de la región, aunque no presenta detalles para la zona de la Fosa de los Muertos. En consecuencia, se utilizaron las secciones transversales incluidas en el trabajo de Rodríguez-Zurrunero et al. (2020) como se indica en la Figura 4.

Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

Figura 4

Izq. Secciones transversales de subducción para la República Dominicana. Der. Variación en profundidad (km) de las secciones B-B y C-C de Rodríguez-Zurrutero et al. (2020).

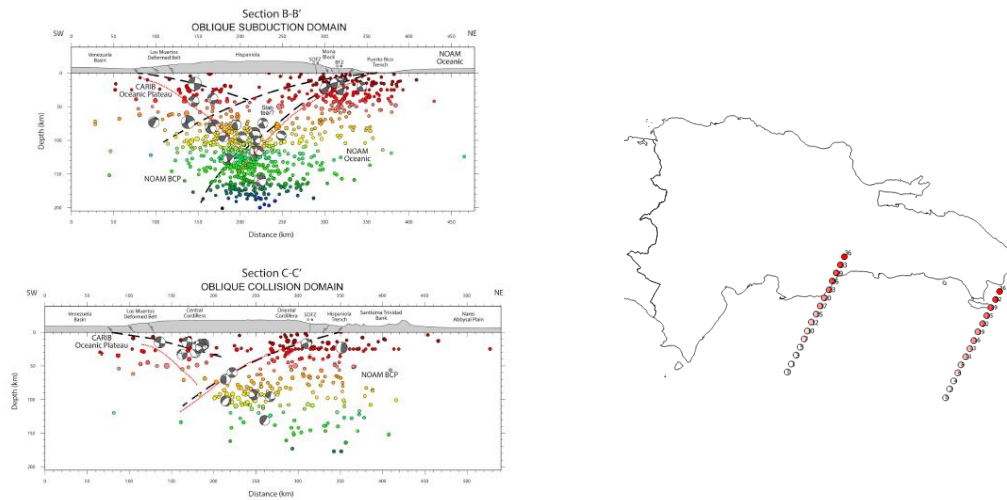
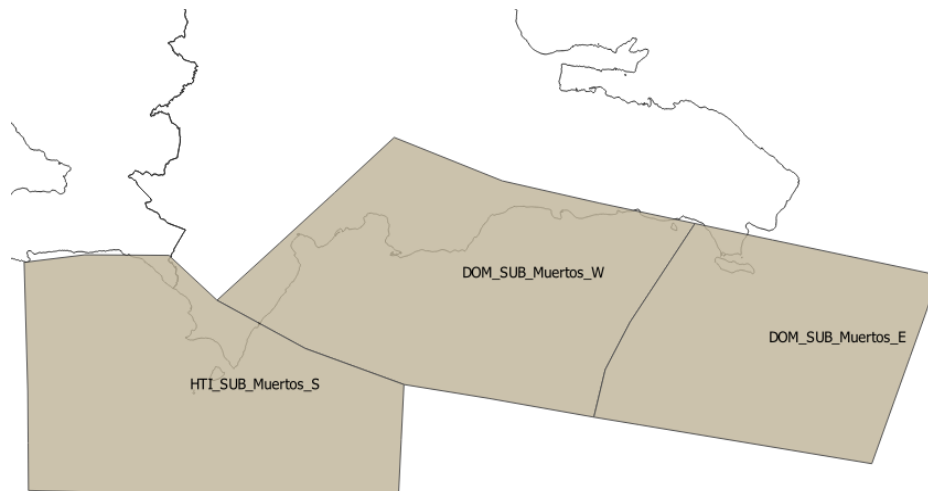


Figura 5

Geometría de las fuentes sísmicas utilizadas en el proyecto.



En la Figura 5, se muestra la geometría de las fuentes sísmogénicas incluidas en el proyecto de R-CRISIS para realizar la caracterización sísmogénica de las fuentes de subducción en la zona

Latitude:

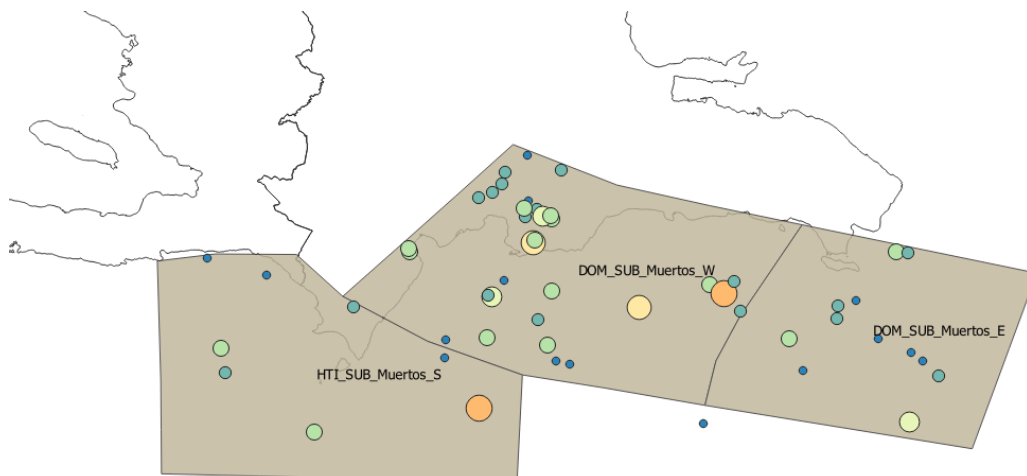
Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

de influencia para la Bahía de Ocoa. De esta caracterización, se han identificado tres regiones denotadas como: Fosa de los Muertos Este, Oeste y Sur, las cuales agrupan la sismicidad ocurrida en las mismas.

Figura 6

Geometría de las fuentes y sismicidad asignada a cada una de ellas



En la Figura 6, se muestra la geometría de las fuentes consideradas, así como los epicentros de los terremotos registrados de manera instrumental en cada una de ellas de donde se puede observar que aquella donde un mayor número de eventos históricos ha sido registrado, corresponde a la denominada como Fosa de los Muertos W.

Modelos de Sismicidad

En el desarrollo de la evaluación probabilista del peligro sísmico (PSHA), generalmente se utilizan dos modelos de sismicidad:

- 1) Gutenberg-Richter modificado (Cornell y VanMarcke, 1969) y,
- 2) Modelo del temblor característico (Young y Coppersmith, 1985)

Modelo Gutenberg-Richter Modificado (G-R)

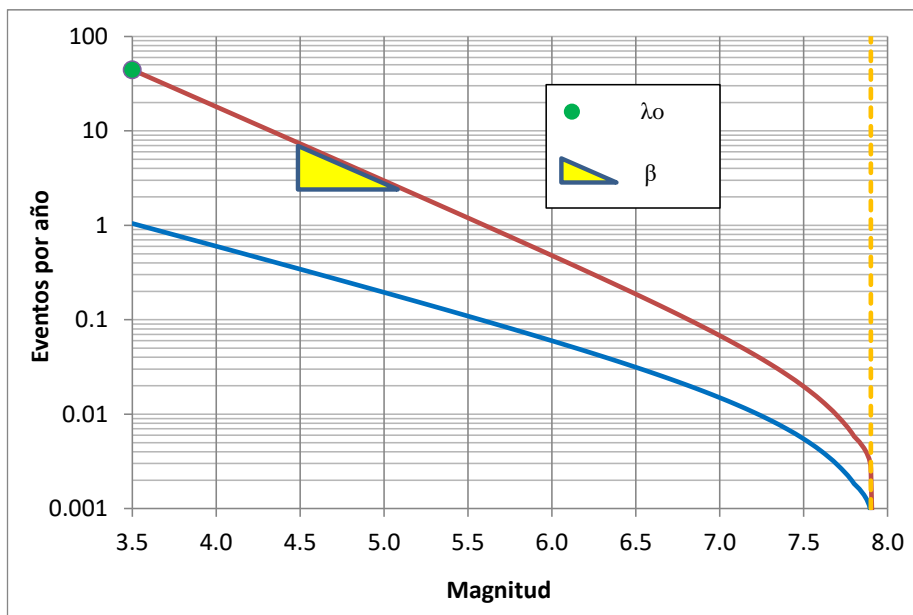
En el modelo de sismicidad G-R modificado, la ocurrencia de futuros eventos se define a partir de la siguiente relación:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{\exp(-\beta M) - \exp(-\beta M_U)}{\exp(-\beta M_0) - \exp(-\beta M_U)} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde λ_0 corresponde a la tasa de excedencia de la magnitud umbral, M_0 ; β es un parámetro equivalente al “valor b” para la fuente y M_U es la magnitud para la fuente. La Figura 7 muestra esquemáticamente la relación de recurrencia de magnitudes para dos fuentes sismogénicas.

Figura 7

Modelo de recurrencia de magnitudes con la relación Gutenberg-Richter modificada



Los parámetros λ_0 y β (a y b) se calcularon con un enfoque de máxima verosimilitud como el descrito por McGuire (2004). Dado que el período de completéz varía en función de la magnitud,

los diferentes sub-catálogos completos se combinaron posteriormente, utilizando la metodología de Ordaz y Giraldo (2018) para obtener los valores finales de referencia en el modelo.

El valor de M_U se asignó utilizando un enfoque multi-criterio, que incluyó la revisión de las magnitudes históricas en el catálogo de trabajo asignado a cada fuente, complementado con análisis estadísticos de los catálogos históricos, incluyendo la sismicidad registrada desde 1520 en la región, la revisión de estudios previos (ECHO et al., 2004 y Bertil et al., 2015), y el uso de las relaciones entre la magnitud y las áreas de ruptura (Wells y Coppersmith, 1994).

Modelo del Temblor Característico

Debido a que se considera fuentes de subducción en esta investigación, el modelo de sismicidad G-R modificado subestima la ocurrencia de eventos de gran magnitud Singh et al. (1983). Por tanto, se ha combinado el modelo G-R modificado con el modelo de Temblor Característico (TC), según lo propuesto por Youngs y Coppersmith (1985).

Dicha combinación utiliza el modelo G-R modificado para un rango de magnitud entre M_0 y M_U^{GR} y el modelo TC a partir de ese valor. El modificado TC se caracteriza por utilizar una relación de recurrencia de magnitudes:

$$\lambda(M) = \lambda_{0CH} \frac{\Phi\left[\frac{M_U - EM}{S}\right] - \Phi\left[\frac{M - EM}{S}\right]}{\Phi\left[\frac{M_U - EM}{S}\right] - \Phi\left[\frac{M_{0CH} - EM}{S}\right]} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde $\Phi[\cdot]$ es la función acumulativa normal estándar, M_0 y M_U son las magnitudes características mínimas y máximas, respectivamente, y EM y S son parámetros que definen la distribución de M . EM se puede interpretar como el valor esperado del Temblor Característico y S es su desviación estándar. λ_{0CH} es la tasa de excedencia de magnitud M_0^{CH} .

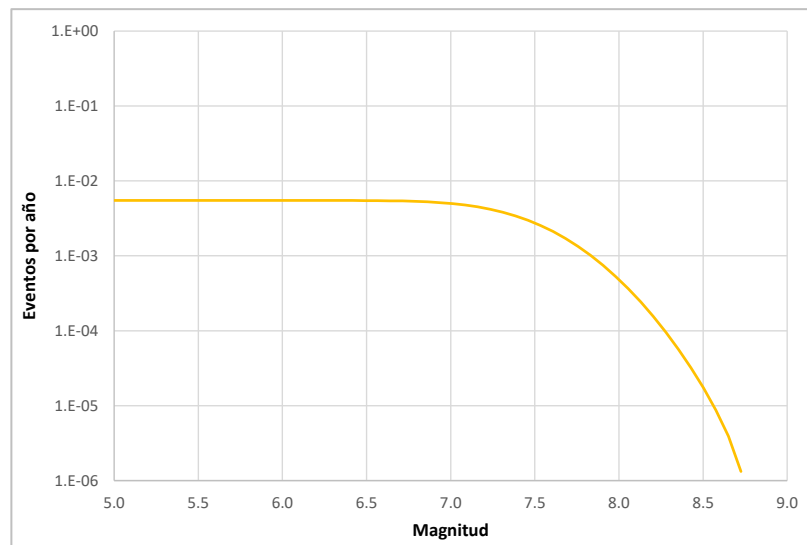
Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

Figura 8

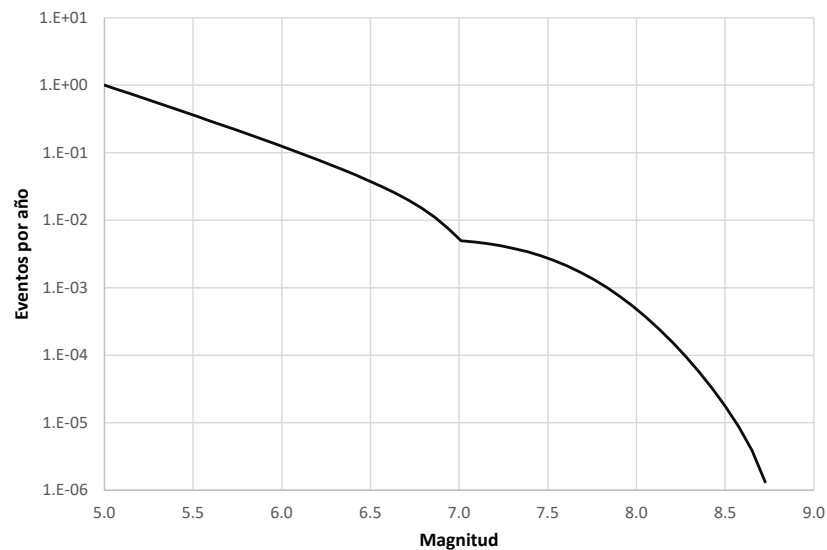
Modelo de ocurrencia del temblor característico



La Figura 8 muestra gráficamente la recurrencia de terremotos luego de utilizar el modelo del temblor característico.

Figura 9

Combinación de los modelos G-R y TC para una fuente sísmica.



Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

La Figura 9 muestra la recurrencia de terremotos en una fuente al combinar los modelos G-R y TC.

Parámetros de Sismicidad para las Fuentes Sísmicas

La Tabla 5 muestra los valores de los parámetros de sismicidad utilizados en cada fuente sismogénica empleando el modelo G-R modificado.

Tabla 5

Períodos de Completez para catálogo de estudio

Fuente	M0	Y0	Y0	CV (B)	Mw
HTI_SUB_Muertos_S	4.3	0.208	2.18	0.38	7.0
DOM_SUB_Muertos_W	4.5	0.545	2.162	0.196	6.0
DOM_SUB_Muertos_E	4.0	0.603	2.179	0.277	7.3

La Tabla 6 presenta los valores de los parámetros de sismicidad para la fuente en la que se ha utilizado, además el modelo del temblor característico.

Tabla 6

Parámetros de sismicidad para las fuentes con el modelo TC

Fuente	Mediana tiempo entre	Magnitud Desviación característica estándar	M0 Mu
DOM_SUB_Muertos_W	35.7	6.6 7.0	5.8 7.3

Validación de los Modelos de Sismicidad

Las figuras 10 a 12 presentan la comparación de los modelos de sismicidad utilizados en la caracterización de la actividad sísmica en cada una de las fuentes con el conteo de terremotos históricos, normalizado por ventanas de completéz.

Figura 10

Validación del modelo de sismicidad para la fuente sísmica Fosa de los Muertos Sur

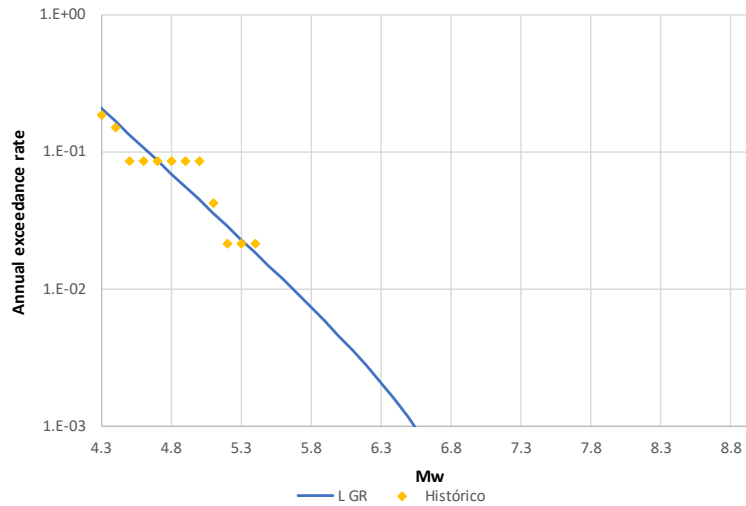


Figura 11

Validación del modelo de sismicidad para la fuente sísmica Fosa de los Muertos Este

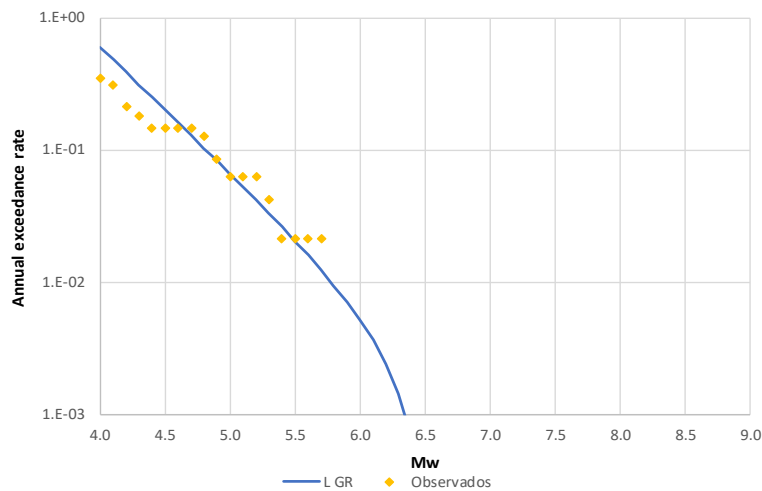
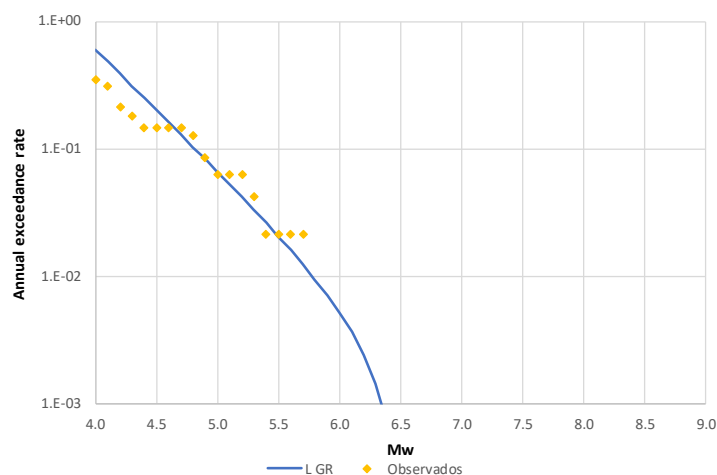


Figura 12

Validación del modelo de sismicidad para la fuente sísmica Fosa de los Muertos Oeste



Caracterización de las Rupturas

Se utilizó una forma elíptica para la representación de las rupturas considerando además una relación de aspecto igual a 0.5 (ancho/largo) que resulta apropiada para los eventos de subducción de interés, ya que las características de las rupturas asociadas a cada terremoto tienen un papel fundamental en la evaluación del peligro tsunamigénico.

El área de ruptura de cada terremoto se calcula a partir de la relación de Singh et al. (1980) en la cual, a partir de la magnitud y dos constantes, K_1 y K_2 , se establece el radio de un círculo. Con este se calcula el área total a partir de la siguiente expresión:

$$A = \pi K_1^2 \cdot e^{2K_2 M} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde M es la magnitud de cada evento y K_1 y K_2 , son constantes.

La orientación de la ruptura se calcula a partir del lineamiento de la trinchera de subducción, con valores cercanos a 270° en las fuentes de interés y el buzamiento de cada una viene dado por la geometría del plano inclinado que se ha definido en cada caso a partir de las

Latitude:

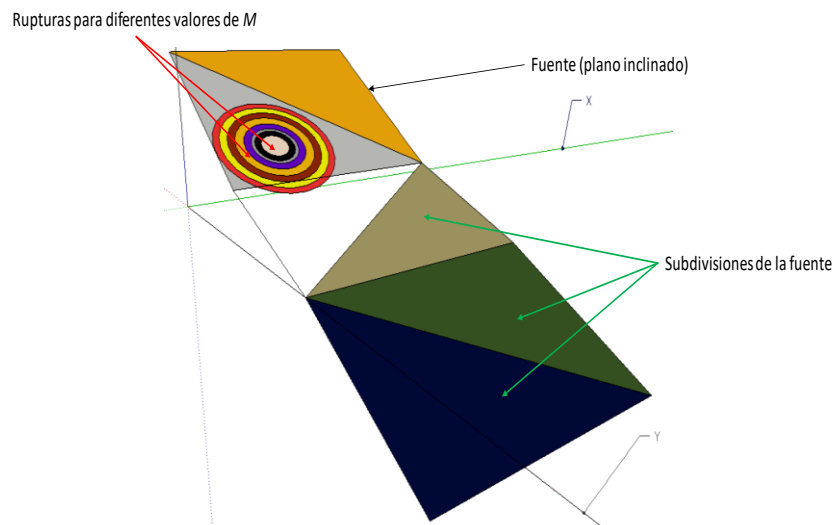
Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

secciones transversales anteriormente mencionadas. La Figura 13 presenta indicativamente como se ven las rupturas ocurriendo en la cara de un plano que subduce, mientras que la Figura 14 muestra una ruptura de ejemplo generada en el programa de cálculo R-CRISIS en la región Fosa de los Muertos W.

Figura 13

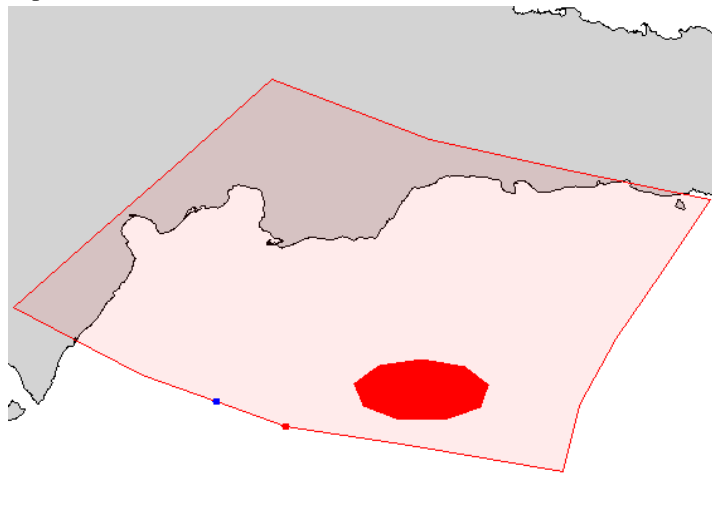
Buzamiento de diferentes rupturas en un plano de subducción



Nota. Tomado de Ordaz y Salgado-Gálvez (2020).

Figura 14

Ejemplo de ruptura para un terremoto localizado dentro de la fuente Fosa de los Muertos W.



Evaluación Probabilista del Peligro Sísmico

El enfoque utilizado para el PSHA en este estudio se basó en la propuesta de Esteva (1967) y Cornell (1968), en la cual la zona bajo estudio se dividió en una serie de provincias, donde cada una de ellas fueron asumidas con características sismo-tectónicas similares.

Para identificar los eventos con características necesarias para ser considerados de interés en la generación de tsunamis, se generó un catálogo de terremotos teniendo en cuenta una ventana de observación suficientemente larga. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

1. Para conservar la compatibilidad de los eventos sísmicos en el marco conceptual de ocurrencias de Poisson, se consideró a cada uno de estos eventos, incluidos en el catálogo sintético, independientes entre sí, y que la ocurrencia de uno no afecte, ni en la localización, magnitud ni frecuencia, las características de otro.
2. Luego de realizar la exclusión de eventos, se representó todas las posibles localizaciones, magnitudes y profundidades que pueden llegar a ocurrir en la Bahía de Ocoa y sus alrededores.
3. Una vez determinado las características de los terremotos estocásticos, se asignó la frecuencia anual de ocurrencia de cada evento, la cual se obtuvo a partir de los valores establecidos en las relaciones de recurrencia de magnitudes establecida para cada fuente sísmica.

Catálogo Sintético

La generación del catálogo sintético de terremotos se realizó utilizando R-CRISIS V20.0 (Ordaz et al., 2020). Con este catálogo se generó un formato *.AME, el cual corresponde a una representación paramétrica de un conjunto de mallas que dan cuenta de todas las características relevantes de las rupturas, incluyendo localización, profundidad, tamaño, relación de aspecto y forma, además de poder tener asociada la frecuencia de ocurrencia para cada evento.

En el modelo de evaluación probabilista, se consideró la ocurrencia de los epicentros con igual probabilidad espacial dentro de cualquier punto dentro de su volumen correspondiente

subdividiendo cada fuente sísmica en triángulos y luego suponiendo que la sismicidad se concentró en el centro de gravedad de cada uno de ellos. Esta subdivisión se realizó de forma recursiva hasta alcanzar un tamaño de triángulo lo suficientemente pequeño para garantizar la precisión en la integración de la Ecuación 4.

Mediante esta ecuación, se calculó el peligro sísmico, el cual es expresado en términos de la tasa de excedencia de intensidad, $v(a)$ considerando la suma de los efectos de la totalidad de ellos y la distancia entre cada fuente sísmica y el sitio de interés. Esta se calcula de la siguiente manera (Ordaz, 2000):

$$v(a) = \sum_{n=1}^N \int_{M_0}^{M_u} -\frac{\partial \lambda}{\partial M} \Pr(A > a \vee M, R_i) dM \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde la suma cubre todas las fuentes sísmicas N , y $\Pr(A > aM, R_i)$ es la probabilidad de que la intensidad exceda cierto valor dada la magnitud M y la distancia entre la fuente y el sitio de interés R_i del evento. La función $\lambda_i(M)$ es la tasa de actividad de las fuentes sísmicas. La integral se realiza desde la magnitud umbral, M_0 , hasta la magnitud máxima, MU de cada fuente, lo que indica que, para cada una, se tiene en cuenta la contribución de todas las magnitudes.

Este cálculo fue realizado una vez conocido los patrones de sismicidad y atenuación de todas las fuentes sísmicas.

Resultados y análisis

El resultado de la caracterización sismogénica de las fuentes de subducción al sur de la Bahía de Ocoa está representado en forma de un catálogo sintético de terremotos. En total, se ha generado un catálogo con 12, 760 terremotos con diferentes localizaciones y magnitudes, tal y como se presenta en la Figura 15.

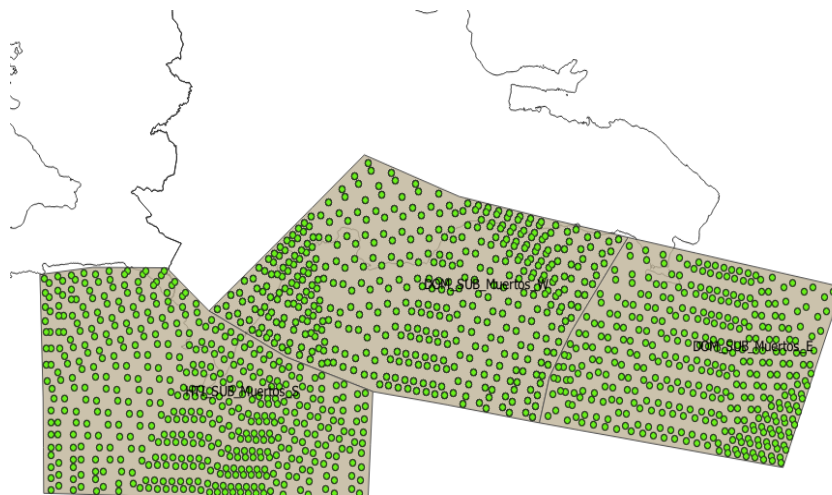
Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

Figura 15

Visualización gráfica del catálogo sintético de terremotos



Los parámetros para la generación de este catálogo utilizados se muestran a continuación:

- Mmin: 5.0
- NMag: 9.0
- Tamaño subfuente: 10 km

De los focos sintéticos presentados en la Figura 15, sólo aquellos localizados en el Océano y con las características mínimas descritas en cada fuente sísmica, son los considerados como capaces de detonar eventos tsunamigénicos.

Discusión

Con base a los resultados obtenidos de la caracterización sismogénica de las fuentes generadoras de tsunamis, se realizó el modelo de peligro sísmico para el área de estudio. A partir del catálogo sísmico elaborado y el contraste con literatura científica, nuestros resultados muestran que el contexto sismo-

tectónico de la región de estudio está caracterizado por incluir estructuras de desgarre y de subducción propicias para la generación de inundaciones por Tsunamis.

En particular, nuestros resultados muestran que la falla de la Fosa de los Muertos es la fuente sísmica local con mayor potencial de generación de tsunamis.

En términos prácticos, los resultados de esta investigación se aplican como punto de partida para la identificación de un conjunto estocástico de terremotos compatible con las características sísmo-tectónica de localización, magnitud y profundidad, área de ruptura, tamaño de ruptura, forma de ruptura, relación de aspecto, orientación, buzamiento y frecuencia de ocurrencia. Este conocimiento resulta necesario para el ordenamiento territorial, reducción de riesgos ante desastres y la toma de decisiones para el desarrollo sostenible de la región.

Los resultados de este estudio sobre la identificación de las fuentes sísmicas generadoras de tsunami en la Bahía de Ocoa, también servirán de base a investigaciones posteriores más detalladas hacia una distinción de las fuentes que pueden tener potencial tsunamigénico. Nuestra línea de investigación a futuro se orienta a analizar cada una de las fuentes sísmica según su geometría, sismicidad y al conjunto de eventos estocásticos, sus localizaciones y magnitudes para la evaluación probabilista del peligro tsunamigénico en la zona de estudio.

Agradecimientos

Este artículo forma parte de los resultados parciales del proyecto de investigación FONDOCYT 2018-19-1G1-325. Agradecemos la financiación del Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT) de la República Dominicana, a través del Fondo Nacional de Innovación, Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDOCYT). Los autores agradecen de manera especial todo el apoyo técnico, administrativo y financiero del Servicio Geológico Nacional (SGN).

Referencias bibliográficas

- Alvarado, F. (2012). Resultados de la encuesta “Mis profesores y yo”. *Noticias PUCV*. Recuperado de <http://prensa.ucv.cl/?p=14441>
- Bertil D., Lemoine A., Winter T. and Belvaux M. (2010). Microzonificación sísmica de Santiago – República Dominicana. Amenaza regional. Informe final. BRGM/RC-59107-FR.
- Bertil D., Terrier M. and Belvaux M. (2015). Análisis de las fuentes sísmicas y evaluación de la amenaza sísmica regional del Gran Santo Domingo BRGM/RP-65305-FR.
- Cornell C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 58(5):1583-1606.
- Cornell, C. A., and Vanmarke E. H. (1969). The major influences on seismic risk, in *Proceedings of the 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile.
- ECHO, MOVIMONDO, SODOSISMICA, ONESVIE and UCODEP (2004). Estudio de amenaza sísmica de la República Dominicana. El conocimiento del riesgo como punto de partida para la prevención de desastres en la región norte oriental de la República Dominicana. Report ECHO/TPS/219/2003/2006.
- Engdahl E.R. and Villaseñor A. (2002). Global seismicity: 1900-1999. *International handbook of earthquake Engineering and seismology*. Vol. 81A. ISBN: 0-12-440652-1.
- Esteva, L. (1967). Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico. 3er Simposio Panamericano de Estructuras. Caracas, Venezuela.
- Gardner J.K. and Knopoff L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*. 64:1363-1367.
- Hayes G.P., Moore G.L., Portner D.E., Hearne M., Flamme H., Furtney M. and Smoczyk G.M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*. 362(6410):58-61.

Latitude:

Multidisciplinary
Research JournalMAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

- Manaker D.M., Calais E., Freed A.M., Ali S.T., Przybylski P., Mattioli G., Jansma P., Prépetit C. and De Chabaliér J.B. (2008). Interseismic plate coupling and strain partitioning in the Northeastern Caribbean. *Geophysical Journal International*. 174(3):889-903.
- McGuire R.K. (2004). Seismic hazard and risk analysis. Earthquake Engineering Research Institute. Oakland, California, USA.
- Oficina Nacional de Estadística. (2010).
- Ordaz M. (2000). Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto. Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico City, Mexico.
- Ordaz M. and Giraldo S. (2018). Joint maximum likelihood estimators for Gutenberg-Richter parameters λ_0 and β using sub-catalogs. *Earthquake Spectra*. 18(1):301-312.
- Ordaz M., Martinelli F., Aguilar A., Arboleda J., Meletti C. and D'Amico V. (2020). R-CRISIS, Program for computing seismic hazard. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico.
- Ordaz, M.G. and Salgado-Gálvez, M.A. (2020). R-CRISIS Validation and Verification Document. ERN International, Mexico City, Mexico.
- Rodríguez-Zurrunero A., Granja-Bruña J.L., Muñoz-Martín A., Leroy S., ten Brink U., Gorosabel-Araus J.M., Gómez de la Peña L., Druet M. and Gorosabel-Carbó A. (2020). Along-strike segmentation in the northern Caribbean plate boundary zone (Hispaniola sector): Tectonic implications. *Tectonophysics*. 776.
- Scordilis E.M. (2006). Empirical global Relations converting M_s and m_b to moment magnitude. *Journal of seismology*. 10:225-236.
- Singh S.K., Bazan E. and Esteva L. (1980). Expected earthquake magnitude from a fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 70(3):903-914.

Latitude:

**Multidisciplinary
Research Journal**MAPA DE SISMICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE FUENTES
SISMOGÉNICAS GENERADORAS DE TSUNAMIS EN BAHÍA
DE OCOA, REPÚBLICA DOMINICANASEISMICITY MAP AND SEISMOGENIC SOURCES
CHARACTERIZATION OF GENERATING TSUNAMIS IN
BAHÍA DE OCOA, DOMINICAN REPUBLIC

Volumen 2, número 16, 2022, julio-diciembre

- Singh S.K., Rodriguez M. and Esteva L. (1983). Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 73(6):1779-1796.
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Bondár I., Engdahl E.R., Harris J., Lee W.H.K., Villaseñor A. and Bormann P. (2013). Public release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009).
- Tinti S. and Mulargia F. (1985). An improved method for the analysis of the completeness of a seismic catalogue. *Lettere al nuovo cimento. Series 2*. 42(1):21-27.
- Wells D.L. and Coppersmith K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84(4):974-1002.
- Youngs R.R. and Coppersmith K. (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 58:939-964.