

Formación y Comunicación para la Evaluación del Riesgo Sísmico

Proyecto TREQ

Modelo Probabilístico de Amenaza Sísmica para la República Dominicana

Entregable 2.2.2 – Versión 2.1.1



**Global
Earthquake
Model (GEM)
Foundation**

www.globalquakemodel.org

Descripción del modelo probabilístico de
amenaza sísmica desarrollado para La
República Dominicana

Entregable D2.2.2 – Modelo probabilístico de amenaza sísmica para la República Dominicana

Entrega D2.2.2

Informe técnico elaborado en el contexto del proyecto TREQ

Versión 2.1.1 – Junio, 2022

Kendra Johnson¹, Marco Pagani¹, Thomas Chartier¹

¹Fundación Modelo Global de Terremotos (GEM)

Colaboradores

Los autores desean agradecer a los colaboradores de la República Dominicana por su invaluable contribución al proyecto, que incluye, entre otros, la recopilación de datos locales, la organización de reuniones y la comunicación de los resultados a las partes interesadas y al público en general.

Los autores desean agradecer en particular a los siguientes grupos por su apoyo:

- Servicio Geológico Nacional (SGN) de la República Dominicana, especialmente Yesica Pérez, Vladimir Guzmán, María Betania Roque Quezada, Freddy García, Edwin García y Santiago Muñoz (antiguo director)
- Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), especialmente a Ramón Delanoy.
- Instituto Sismológico Universitario.

Otros colaboradores

Robin Gee, Richard Styron, Catalina Yepes-Estrada, Michele Simionato, Shreyasvi Chandrasekhar y Manuela Villani de la Fundación Global Earthquake Model (GEM).

Autores de versiones anteriores

Julio García Peláez (anteriormente en la Fundación GEM).

Agradecimientos

Este informe forma parte del programa financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Oficina de Asistencia Humanitaria (BHA) para el proyecto de capacitación y comunicación para la evaluación de riesgos de terremotos (TREQ), subvención AID-OFDA-G-720FDA19GR00273. La Fundación Global Earthquake Model administra y ejecuta los recursos de USAID e implementa el proyecto en colaboración con las partes interesadas locales.

El Proyecto TREQ está diseñado para demostrar cómo la evaluación de la amenaza y riesgos de terremotos puede informar a los tomadores de decisiones en el desarrollo de políticas de reducción de riesgos, así como también cómo se puede comunicar adecuadamente el riesgo de terremotos a las partes interesadas y al público en general. Específicamente, el proyecto tiene como objetivo desarrollar la capacidad para la evaluación del riesgo sísmico urbano en América Latina, Quito (Ecuador), Cali (Colombia) y Santiago de los Caballeros (República Dominicana), mientras que la segunda parte producirá materiales de capacitación, educación y comunicación que mejorará la comprensión del riesgo de terremotos en todo el mundo. Este programa se dirige a un amplio espectro de partes interesadas, categorizadas en cuatro grupos principales: gobierno (tomadores de decisiones/autoridades públicas), industria (practicantes y profesionales), academia (investigadores y profesores) y la comunidad.

Este informe ha sido posible gracias al apoyo y la generosidad del pueblo estadounidense a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Oficina de Asistencia Humanitaria (BHA). Las opiniones, los resultados y las conclusiones que se expresan en este documento son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de USAID o del gobierno de los Estados Unidos.

Cita: Johnson. K., Pagani M., Chartier, T. (2022) Modelo probabilístico de amenaza sísmica para la República Dominicana D.2.2.2, v2.1.1, junio de 2022.

Traducción en español: Freddy García y Catalina Yepes-Estrada

Licencia

Excepto donde se indique lo contrario, este trabajo está disponible bajo los términos de Creative Commons License Attribution - ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Puede descargar este informe y compartirlo con otras personas siempre que proporcione el crédito adecuado, pero no puede cambiarlo de ninguna manera ni usarlo comercialmente.

Los puntos de vista e interpretaciones en este documento son los de los autores individuales y no deben atribuirse a la Fundación GEM. Con ellos también recae la responsabilidad de los datos científicos y técnicos presentados. Los autores han tenido mucho cuidado de garantizar la exactitud de la información en este informe, pero no aceptan ninguna responsabilidad por el material, ni aceptan responsabilidad por ninguna pérdida, incluida la pérdida consecuente incurrida por el uso del material.

Salvo que se indique lo contrario, este trabajo está disponible bajo los términos de Creative Commons License Attribution - ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Puede descargar este informe y compartirlo con otras personas siempre que proporcione el crédito adecuado, pero no puede cambiarlo de ninguna manera, ni utilizarlo comercialmente.

Los puntos de vista e interpretaciones de este documento pertenecen a los autores individuales y no deben atribuirse a la Fundación GEM. En ellos también recae la responsabilidad de los datos científicos y técnicos presentados. Los autores han tenido mucho cuidado para asegurar la exactitud de la información en este informe, pero no aceptan responsabilidad por el material, ni aceptan responsabilidad por ninguna pérdida, incluida la pérdida consecuente incurrida por el uso del material.

Copyright © 2022 Fundación GEM.

<http://www.globalquakemodel.org/>

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS	III
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Entorno sismo-tectónico de la República Dominicana	2
2 RECOPIACIÓN DE DATOS	4
2.1 Catálogo Homogeneizado de Terremotos	4
2.1.1 Desarrollo de la base de datos de terremotos	4
2.1.2 Jerarquía de selección de magnitud, origen y homogeneización	6
2.1.3 Regionalización tectónica de la sismicidad	10
2.2 Base de datos de fallas superficiales activas (fallas corticales)	12
3 CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SÍSMICAS	17
3.1 Interfaz de la trinchera de Puerto Rico	17
3.2 Fuentes de intraplaca	18
3.3 Fuentes corticales superficiales e interfaces NHT y LMT	20
3.4 Validación y verificación del modelo fuentes	32
4 CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL TERRENO	33
5 CÁLCULO PROBABILÍSTICO DE LA AMENAZA SÍSMICA (PSHA) Y PRINCIPALES RESULTADOS	35
5.1 Curvas de amenaza, mapas y espectros de amenaza uniformes	35
5.2 Desagregación	42
6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	44
6.1 Comparación con modelos anteriores	44
6.1.1 CCARA	44
6.1.2 PSHA para Haití (Frankel et al., 2011)	46
6.1.3 Microzonificación de Santiago de los Caballeros (Bertil et al., 2010)	46
6.1.4 Microzonificación de Santo Domingo (Bertil et al., 2015)	48
6.1.5 Comparación con otros modelos: resumen	49
6.2 Aplicaciones iniciales de DOM21	49
7 REFERENCIAS	50

1 INTRODUCCIÓN

El componente de “amenaza sísmica urbana” del proyecto TREQ tuvo como objetivo evaluar la amenaza ante terremotos a escala urbana para tres ciudades importantes en América Latina: Quito, Ecuador; Cali, Colombia, y Santiago de los Caballeros, República Dominicana. La primera tarea fue realizar una revisión detallada de los modelos de amenaza sísmica probabilísticos (PSHA por sus siglas en inglés, Probabilistic Seismic Hazard Assessment) disponibles en cada una de las ciudades seleccionadas y elegir un modelo de referencia para usar en los cálculos de amenaza y riesgo sísmico (tanto en roca como en suelos (ver más detalles en el reporte técnico de TREQ “D2.2.1 Description of the compiled datasets and the selected seismic hazard models”). Para la República Dominicana, revisamos los siguientes documentos y modelos:

- Proyecto CCARA – Evaluación del riesgo sísmico en el Caribe y Centro América (Caribbean and Central America earthquake Risk Assessment, por sus siglas en inglés): El mosaico global de modelos de amenaza sísmica de la Fundación GEM (Pagani et al., 2020b) cubre la República Dominicana con una versión actualizada del modelo de PSHA desarrollado dentro del proyecto CCARA. Este modelo está disponible gratuitamente para el público y se implementó con el formato del software OpenQuake Engine. Sin embargo, el modelo tiene cobertura regional y, por lo tanto, no tiene en cuenta las incertidumbres epistémicas en el modelo de origen a un nivel adecuado para el análisis de riesgos a nivel urbano.
- Mapas de amenaza sísmica para Haití por Frankel et al. (2011): parte de la República Dominicana está cubierta por el modelo utilizado para desarrollar estos mapas. Sin embargo, el modelo no tiene en cuenta todas las fuentes que podrían afectar la parte oriental de la República Dominicana.
- Microzonificación sísmica de Santiago de los Caballeros - Amenaza sísmica para la República Dominicana por Bertil et al. (2010): Este estudio de microzonificación cubre la ciudad de Santiago en detalle, pero no brinda la misma cobertura detallada de la isla completa.
- Código de construcción de la República Dominicana: se considera una zonificación sísmica y mapas de amenaza como parte del código de construcción de República Dominicana (R-001, 2011; “Reglamento para el Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras”). Sin embargo, no existe documentación técnica sobre el estudio del modelo de amenaza sísmica probabilístico (PSHA) utilizado.
- Caracterización de fallas activas y zonificación sismo-tectónica de la isla La Española por Terrier-Sedan y Bertil (2021): esta publicación propone un modelo de fuente sísmica para toda la isla La Española. El modelo aún no está implementado en un software de PSHA, pero es un recurso útil para obtener información sismo-tectónica en la región de estudio.

Si bien cada uno de los anteriores es un recurso invaluable para comprender la amenaza sísmica en Santiago de los Caballeros y en toda la República Dominicana, ninguno se consideró adecuado en el contexto del proyecto TREQ, ya sea porque carecían de suficiente consideración de las incertidumbres epistémicas para su uso en la evaluación del riesgo sísmico urbano; porque los modelos fuente no están disponibles públicamente; o porque no cubren completamente la República Dominicana y, por lo tanto, cualquier aplicación futura de riesgo urbano en otras ciudades no es posible. Por lo tanto, la Fundación GEM utilizó estos recursos y colaboró con instituciones locales (Servicio Geológico Nacional, SGN;

Universidad Autónoma de Santo Domingo, UASD) para desarrollar un modelo nacional. Los resultados finales se compararán con los de los estudios mencionados anteriormente y serán disponibles al público.

Para desarrollar el modelo de amenaza probabilístico para la República Dominicana se siguió principalmente la metodología y flujo de trabajo estándar que utiliza GEM para este tipo de modelos. Adicionalmente, se incorporaron algunas metodologías más recientes que se consideran más apropiadas. Este documento describe el desarrollo de un modelo de amenaza probabilístico a nivel nacional para la República Dominicana, denominado en adelante como modelo **DOM21**. La primera sección presenta la sismo-tectónica de la República Dominicana. La segunda sección describe los principales conjuntos de datos que se utilizaron para construir el modelo, incluyendo el catálogo homogeneizado ad-hoc compilado como parte del proyecto. La tercera sección describe la caracterización de las fuentes sísmicas y los análisis realizados para validar los componentes del modelo. La cuarta sección describe las características del movimiento del terreno en la isla La Española y el árbol lógico de los modelos de movimiento del terreno que se seleccionaron para DOM21. La quinta sección presenta los principales resultados de amenaza sísmica calculados a partir del modelo utilizando el software OpenQuake Engine, centrándose principalmente en la ciudad de Santiago de los Caballeros y Santo Domingo. La sección final analiza cómo se comparan los resultados con los modelos mencionados anteriormente y, por lo tanto, cómo este estudio modifica el entendimiento de la amenaza sísmica en la República Dominicana.

1.1 Entorno sismo-tectónico de la República Dominicana

La República Dominicana se encuentra en la parte oriental de la Isla Española, que forma parte del archipiélago de las Antillas Mayores. La isla está ubicada en un entorno tectónico complejo en la extensión nororiental de la placa del Caribe (CARIB) cerca de su límite con la placa de América del Norte (NOAM) (Mann et al., 2005; Pindell y Kennan, 2009; Demets et al., 2010; Benford et al., 2012; Rodríguez-Zurrano et al., 2020). La placa CARIB se mueve hacia el este-noreste a una velocidad de 18 a 20 mm/año en relación con la placa de América del Norte (DeMets et al., 2000), lo que da como resultado una tectónica de subducción compleja en el límite de las placas. En La Española, la placa NOAM se subduce oblicuamente debajo la placa CARIB, lo que da como resultado un límite de convergencia oblicua en la interfaz de subducción al norte de La Española y Puerto Rico, así como fallas de rumbo al sur del límite de la placa.

La complejidad del límite de la placa en esta área ha dado lugar a varias interpretaciones de la geometría de subducción y segmentación, así como de las estructuras poco profundas que acomodan la convergencia oblicua. Sin embargo, el modelo de colisión oblicua de microplacas propuesto por Mann et al. (2002), basado en GPS y datos geológicos, es ampliamente aceptado y se ha utilizado en numerosos estudios (como Benford et al., 2012 y Calais et al., 2016). En este modelo, representado en la Figura 1, la región se divide en varias microplacas y bloques tectónicos (es decir, Gonave, Septentrional, La Española y Puerto Rico - Islas Vírgenes), lo que es más consistente con las mediciones de GPS y los datos geológicos en comparación con algunos de los modelos más simples (por ejemplo, Mann et al., 1984).

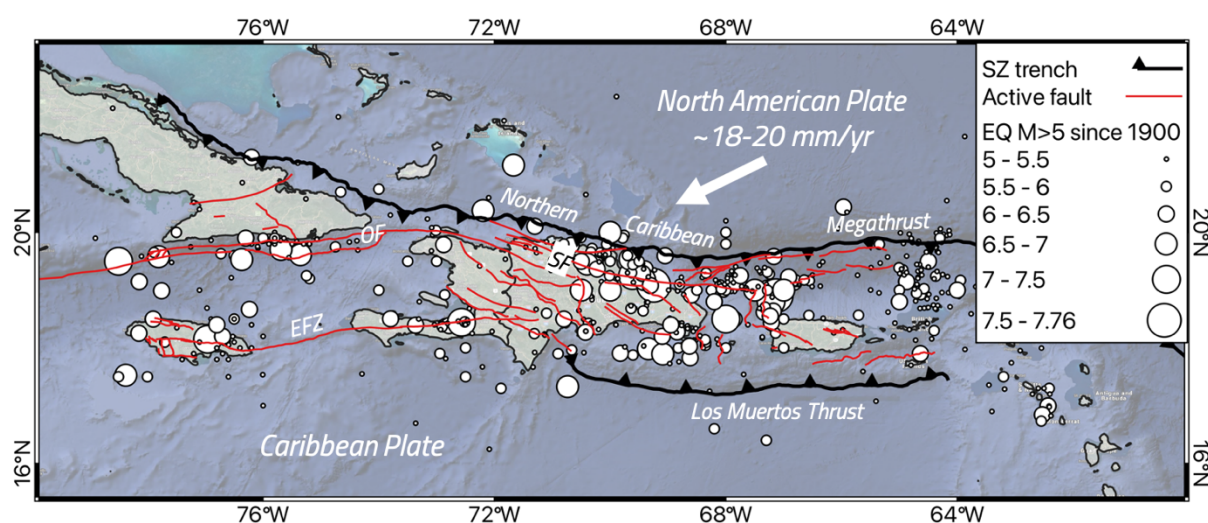


Figura 1. Descripción general de la zona límite de la placa norte del Caribe y América del Norte, que indica algunas estructuras principales. Las posiciones de los terremotos son del catálogo DOM21 desarrollado en este estudio. Las trazas de la zona de subducción (SZ) de la base de datos global de fallas activas de (GEM GAF-DB; Styron y Pagani, 2020). Otras fallas activas de la base de datos del SGN descritas en el texto (por ejemplo, Bertil et al., 2015 y comunicación posterior). OF: Falla de Oriente. SF: falla septentrional. EFZ: Zona de falla Enriquillo-Plantain Garden.

En La Española, el movimiento de las placas se divide entre acortamiento y fallas de rumbo. El acortamiento ocurre en pliegues y cabalgamientos en la parte central de la Isla, formando cadenas montañosas y valles como el Macizo de la Selle en Haití y la Cordillera Central en República Dominicana. Esta región, conocida como microplaca (o bloque) de La Española, está delimitada por dos sistemas de fallas de dislocamiento lateral izquierdo: la falla septentrional (SF) al norte y la falla Enriquillo-Plantain Garden (EFZ) al sur.

La sismicidad que ocurre cerca del límite de la placa incluye grandes eventos tanto de origen cortical como de subducción. Históricamente, varios terremotos significativos han afectado a la República Dominicana, incluido un evento del siglo XVI cerca de Santiago de los Caballeros, un terremoto de 1751 en el sistema de fallas de Enriquillo-Plantain Garden y un evento de 1770 en la trinchera de Los Muertos. Haití también experimentó dos eventos significativos en 1842 y 1887. Más recientemente, una serie de seis grandes terremotos de subducción sacudieron la Trinchera La Española Norte al norte de la República Dominicana entre 1943 y 1953, siendo el más grande el terremoto de magnitud M_w 7.76 de 1946. Este evento, que es el terremoto más grande registrado instrumentalmente para impactar la isla, también provocó un tsunami. En 2010, el terremoto de M_w 7.0 Haití, de gran trascendencia, golpeó la parte suroeste de La Española. Este evento se asoció a una estructura secundaria del Sistema de fallas Enriquillo-Plantain Garden, la falla Léogâne (Calais et al., 2010), y confirmó el potencial sismogénico de las principales fallas de la isla y su necesidad de ser consideradas explícitamente en los análisis de amenazas. Más recientemente, en agosto de 2021, otro terremoto altamente dañino de M_w 7.2 golpeó hacia el oeste en este sistema de fallas.

La mayor parte de la sismicidad registrada en La Española es de profundidad menor a ~40 km y ocurre en las estructuras que acomodan la convergencia oblicua. También ocurren eventos intermedios y profundos dentro de la placa NOAM que descendente a lo largo de las trincheras de Puerto Rico y del Norte de La Española, así como la trinchera de Los Muertos al sureste de la isla, y se extienden hasta unos 250 km de profundidad.

2 RECOPIACIÓN DE DATOS

Además de la información recopilada de los estudios anteriores sobre el riesgo sísmico en la República Dominicana y otra información tectónica disponible públicamente, se utilizaron dos conjuntos de datos primarios para construir el modelo DOM21: (1) un catálogo de terremotos homogeneizado y (2) una base de datos de fallas activas, ambos cubriendo La Española y sus alrededores.

2.1 Catálogo Homogeneizado de Terremotos

Un catálogo de terremotos homogeneizado es un conjunto de datos importante que se utiliza para la mayoría de los estudios de amenaza sísmica. Es necesario un catálogo robusto de terremotos para desarrollar la caracterización de las fuentes sísmicas, ya que este indica dónde y con qué frecuencia ocurren los terremotos en la región de interés. “Homogeneizado” indica que la información de múltiples bases de datos de terremotos que cubren la región se ha combinado para producir un solo catálogo, lo que garantiza que se utilice una escala de magnitud constante en todo momento; que se incluya una sola entrada por cada sismo ocurrido, y que la selección de parámetros de terremotos a partir de eventos con entradas duplicadas siga un procedimiento jerárquico asignado a las bases de datos originales. Se construyó un catálogo homogeneizado durante el proyecto TREQ para usarlo en el desarrollo del modelo DOM21, siguiendo el enfoque propuesto en Weatherill et al. (2016) y usando la herramienta OpenQuake Catalog Toolkit (OQ-CATK¹): un kit de herramientas Python de código abierto desarrollado por GEM. El flujo de trabajo de OQ-CATK utilizado en este documento sigue los siguientes pasos:

- (1) Recolectar catálogos y boletines de terremotos disponibles que cubran La Española más un búfer que cubra todas las fuentes sísmicas alrededor de ~300 km de la isla y fusionarlos en una sola base de datos.
- (2) Los duplicados se identifican haciendo coincidir los registros de terremotos dentro de la base de datos que tienen tiempos de origen e hipocentros similares.
- (3) Elegir un registro de cada conjunto de duplicados basado en una jerarquía de agencias que reportan información y tipos de magnitud, depurando los demás de la base de datos homogeneizada.
- (4) Convertir todas las magnitudes seleccionadas a una unidad común.

La República Dominicana ya estaba cubierta por el catálogo desarrollado dentro del proyecto para Centroamérica y el Caribe CCARA (García y Poggi, 2017a), por lo que el catálogo desarrollado dentro de TREQ se beneficia significativamente del esfuerzo anterior. Sin embargo, debido a que el nuevo catálogo se enfoca en una región más pequeña, las jerarquías utilizadas dan mayor prioridad a las agencias que supervisan las estaciones locales.

2.1.1 Desarrollo de la base de datos de terremotos

El paso (1) combinó los catálogos de terremotos disponibles públicamente, así como los datos proporcionados por las agencias en la República Dominicana dentro del proyecto TREQ. La Tabla 1

¹ <https://github.com/GEMScienceTools/oq-mbtk/tree/master/openquake/cat>

1. Datos utilizados para construir el catálogo homogeneizado. Los códigos de agencia corresponden a los deenumerar las fuentes de los orígenes de los terremotos incluidas en la base de datos fusionada, el número de contribuciones de cada una y sus coberturas de fecha y magnitud. Se accede a la mayoría de estas agencias a través del Boletín del Centro Sismológico Internacional (ISC). Si bien el catálogo compilado durante el proyecto CCARA, denominado agencia "CCA", se incluye directamente en la base de datos, las fuentes de datos originales todavía se incluyen en algunos casos. Esto se debe a que durante CCARA, hubo algunos casos de agencias para las que no hubo emparejamientos suficientes con otra agencia y, por lo tanto, no fue posible realizar conversiones de magnitud sólidas (que se describen más adelante); sin embargo, con los datos disponibles para el presente estudio, fue posible reconsiderar algunas conversiones.

Las agencias enumeradas en la Tabla 1 provienen de los siguientes catálogos o bases de datos:

- **Catálogo CCA:** García y Poggi (2017), desarrollado en el proyecto CCARA y que cubre el Caribe y Centroamérica.
- **Boletines del Servicio Sismológico Nacional de México (SSNC):** un subconjunto del catálogo de CCA que se separó porque durante el esfuerzo de CCA no se desarrolló una ecuación de conversión para las magnitudes del SSNC. Este boletín incluye algunos eventos que ocurren en la parte occidental de la región utilizadas aquí.
- **Boletín del Centro Sismológico Internacional (ISC):** se extiende hasta el 30 de noviembre de 2018 (la última fecha posible en el momento de la descarga). Las agencias a las que se accede a través del ISC están marcadas con un asterisco (*) en la Tabla 1. El ISC tiene cobertura global.
- **Catálogo ISC-GEM versión 7.0:** se utilizó la versión extendida compilada por Weatherill et al. (2016) para construir el catálogo CCA. El ISC-GEM tiene cobertura mundial.
- **Catálogo Global Centroid Moment Tensor (GCMT):** (GCMT, Ekström et al., 2012), que abarca desde 1976 hasta finales de 2018, es la colección más precisa de soluciones de tensores de momento ($M_w \geq 5$). GCMT tiene cobertura mundial.
- **Catálogo UASD-SGN:** el catálogo de las agencias locales de la República Dominicana, incluyendo el Servicio Geológico Nacional (SGN) y Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD). Los eventos cubren la isla de La Española y sus alrededores y se extienden desde 1916 hasta 2019.

Usando el OQ-CATK, los boletines se combinan en una sola base de datos, donde se realiza el paso (2). Las entradas se tratan como duplicados si sus orígenes coinciden dentro de 0.5° y 40 s; entonces la base de datos almacena cada entrada como un solo evento, pero con múltiples orígenes y magnitudes. Esta ventana no siempre es lo suficientemente amplia para los eventos más antiguos, por lo que más adelante en el flujo de trabajo se realiza una segunda verificación semiautomática de duplicados.

Tabla 1. Datos utilizados para construir el catálogo homogeneizado. Los códigos de agencia corresponden a los de la lista del ISC¹

Agencia	Numero original	Año mínimo	Año máximo	Min Mag	Max Mag
IDC*	7410	2000	2018	1.7	7.1
CCA	7108	1678	2016	3.01	7.8
NEIC*	6115	1985	2018	1.4	7.6
SSNC	6115	1904	2018	0	7.6
RSPR*	5112	2001	2018	2	6.5
ISC*	2511	1918	2018	2.7	7.7
TRN*	1214	1961	2018	1.6	6.6
UASD	1087	1916	2019	4	7.7
JSN*	551	2000	2018	1.5	6.4
BJI*	317	1988	2018	4	7.7
OSPL*	302	2013	2018	1.3	6.1
SDD*	292	2009	2018	1.2	5.8
MOS*	262	1962	2018	4	7.1
NEIS*	255	1971	1984	3.2	6.9
EIDC*	232	1995	2000	2.6	5.4
GCMT	193	1970	2018	4	7
USCGS*	160	1964	1970	3.6	5.8
GCMT	141	1977	2017	4.8	7.1
ISCGEM	105	1905	2014	4.98	7.76
LDG*	105	1999	2010	3.2	6.5
SZGRF*	53	2006	2010	4	7.2
LAO*	48	1966	1975	3.5	6.1
GUTA*	47	1911	1948	6.6	8.1
IASPEI*	22	1964	2004	4	5.5
BGR*	22	2010	2018	4.3	6.8

2.1.2 Jerarquía para selección de magnitud, origen y homogeneización

En el paso (3), el OQ-CATK utiliza un conjunto de jerarquías definidas por el usuario para seleccionar un único origen y magnitud para cada entrada, que finalmente se incluirá en el catálogo del modelo para la República Dominicana. Aquí, utilizamos las siguientes suposiciones para definir la jerarquía.

¹ <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/agencies/>

- Debido a que el boletín UASD-SGN es operado por agencias nacionales de República Dominicana, utilizamos este catálogo con un alto nivel de confianza.
- Se supone que los catálogos revisados tienen orígenes más confiables
- El catálogo final utilizará magnitudes de momento (M_w), por lo que se priorizarán las magnitudes que se reportan de forma nativa en esta escala. Otras magnitudes se convertirán siempre que sea posible en el paso (4).

Para comprender mejor cómo se compara el catálogo de la UASD con los catálogos globales revisados, utilizamos gráficas de densidad de magnitud que comparan las magnitudes calculadas por dos agencias para un solo evento (ver Figura 2). Encontramos que los M_w definidos por UASD son aproximadamente iguales a los M_w de ISCGEM y GCMT. En general, se establece la siguiente jerarquía:

- (1) Las magnitudes más confiables son aquellas que son nativamente M_w .
- (2) La siguiente mejor opción es una magnitud para la cual se ha desarrollado una relación de conversión a M_w a partir de grandes conjuntos de datos globales (por ejemplo, Weatherill et al., 2016).
- (3) Si no están disponibles, se intenta usar ecuaciones de conversión ad-hoc y, por lo tanto, se eligen tipos de magnitud para los que hay muchas entradas con una magnitud preferida, y para los cuales se puede desarrollar una conversión ad-hoc robusta.
- (4) Las magnitudes de última elección son aquellas para las que no hay suficientes eventos superpuestos para convertir de forma independiente. La Tabla 2 muestra la jerarquía de magnitud utilizada para seleccionar las magnitudes de los terremotos. (Nota: cuando se agregó el catálogo de CCA a la base de datos, las agencias y los tipos de magnitud utilizados originalmente para crear el catálogo de CCA se usaron en estos campos en las entradas, en lugar de asignarles la identificación de agencia "CCA").

Una vez que se ha seleccionado el conjunto de magnitudes para cada evento, el paso final es convertir todas las magnitudes a la misma medida M_w . Para hacerlo, producimos gráficas de magnitud-densidad según la agencia, como se muestra en la Figura 2, con el objetivo de encontrar pares para cada magnitud que no sea M_w con suficientes eventos para determinar una ecuación de conversión. Primero, se utilizaron conversiones de magnitud que fueron desarrolladas por Weatherill et al. (2016) utilizando conjuntos de datos globales, comprobando visualmente que estas ecuaciones fueran válidas para el subconjunto de eventos en la base de datos de DOM21. Cuando estos no estaban disponibles, se desarrollaron ecuaciones particulares. Las ecuaciones finales se indican en la Tabla 3.

Para elegir el origen de los terremotos de la base de datos, se utilizó el catálogo de la UASD como el catálogo dominante en la medida de lo posible, en cuanto a magnitud. Consideramos la UASD primero en la jerarquía de ubicación; seguido por SSNC (también una red local/regional); ubicaciones de CCA para las cuales se priorizaron catálogos locales o regionales; ISCGEM; y luego el principal del ISC.

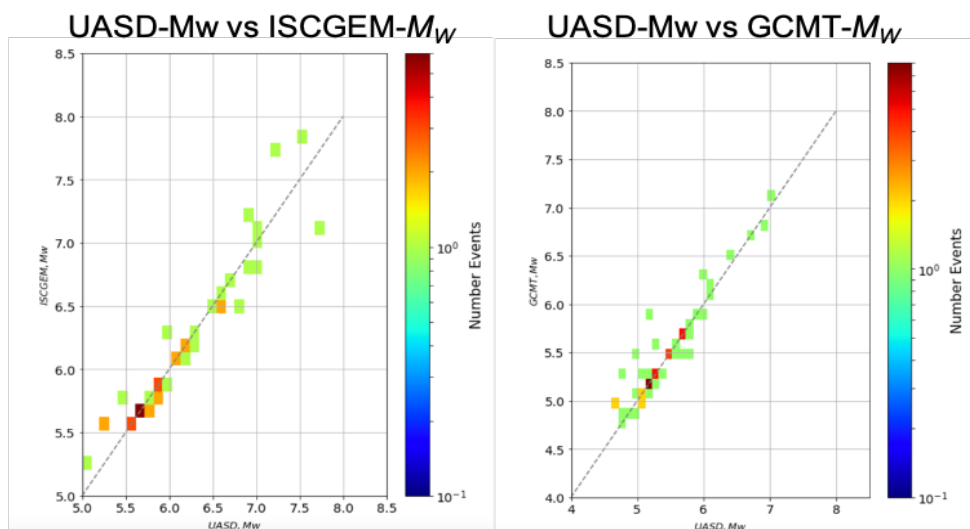


Figura 2. Gráficas de densidad de magnitud. Se observa que UASD-Mw es comparable a Mw de otras agencias.

Tabla 2. Jerarquía de magnitudes y tipos de magnitud utilizadas para la elaboración del catálogo homogeneizado.

Tipo de magnitud, descripción	Jerarquía: Agencia (tipo de magnitud)
M_w y M_w de catálogos globales o locales	GCMT (M_w/MW), ISC GEM (M_w), UASD (M_w) , NEIC (MW), SSNC (M_w/MW)
MS and mb de agencias con ecuaciones de conversión definidas por Weatherill et al. (2016)	ISC (MS), ISC (mb), NEIC (mb), IDC (mb)
Otras magnitudes con conversiones ad-hoc o mantenidas en su escala nativa	RSPR (MD), OSPL (ML), todas los demás (M_w/MW , UK , MS , MD , mb , ML , md , Mt)

La distribución de magnitud y frecuencia (MFD) del catálogo DOM21 final se muestra en la Figura 3. Se utilizó una MFD exponencial negativa de Gutenberg-Richter con valor $a = 6.086$ y valor $b = 1.059$.

Tabla 3. Ecuaciones de conversión utilizadas para calcular entre las diferentes magnitudes (tipo y organismo).

Agencia (tipo)	Ecuación de conversión
GCMT, ISCGEM, UASD, SSNC, CCA (M_w/M_w)	Sin conversión*
NEIC (M_{wr})	Weatherill et al. (2016) lineal*
ISC (m_b)	Weatherill et al. (2016) lineal*
ISC (M_s)	Weatherill et al. (2016) 2 segmentos*
NEIC (m_b)	Weatherill et al. (2016) 2 segmentos*
IDC (m_b)	$0.604 + 0.979 m_b$ (ad-hoc de 406 eventos)
RSPR (M_D)	$0.5546 + 8878 M_D$ (ad-hoc de 474 eventos)
OSPL (M_L)	$M_L \geq 5.0: -1.731 + 1.298 M_L$ $M_L < 5.0: 2.193 + 0.513 M_L$ (ad-hoc de 128 eventos)
Todos los demás (M_w/M_w , UK)	Sin conversión*
Todos los demás (M_s)	$2.1336 + 0.6497 M_s$ (ad-hoc de 375 eventos: IDC, MOS, BJI, EIDC, NEIS, PAS)
Todos los demás (M_D)	$1.6312 + 0.6287 M_D$ (ad-hoc de 186 eventos: JSN, SSNC, SDD, TRN)
Todos los demás (m_b)	$0.8222 + 0.8302 m_b$ (ad-hoc de 213 eventos: BGR, MOS, IASPEI, EIDC, NEIS, TRN)
Todos los demás (M_L)	$0.7250 + 0.9369 M_L$ (ad-hoc de 453 eventos: IDC, SDD, RSPR, SSNC)
Todos los demás (m_d)	Sin conversión (ad-hoc)
Todos los demás (M_t)	$0.1911 + 0.9874 M_t$ (ad-hoc de 30 eventos: TRN)

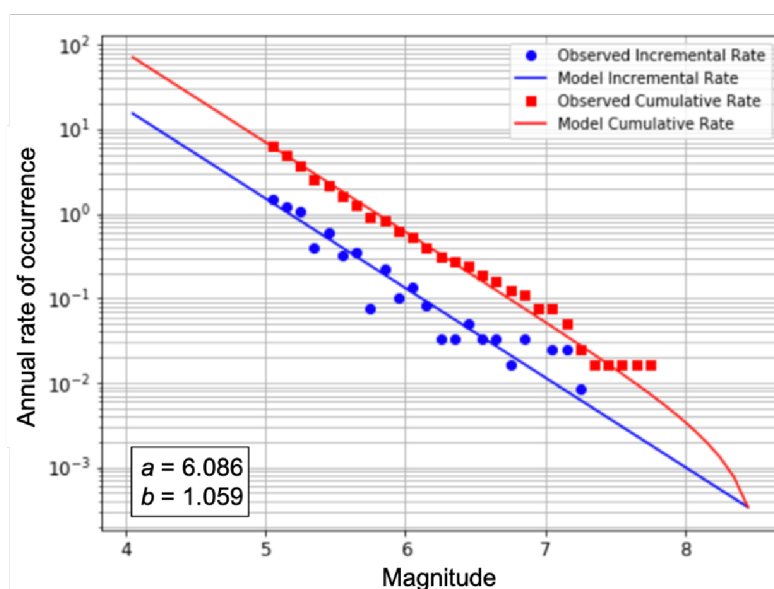


Figura 3. Distribución de frecuencia de magnitud (MFD) para el catálogo final DOM21. En azul se visualizan observaciones incrementales (puntos) y el Gutenberg-Richter MFD de mejor ajuste (línea). En rojo se observa la tasa acumulativa (cuadrados) y Gutenberg-Richter MFD

Como control de calidad del catálogo definitivo, buscamos en el catálogo cualquier posible duplicado restante que no se tuviera en cuenta en la fusión inicial. La verificación utilizó ventanas de búsqueda

espacial y temporal de 0.3° y 10 segundos. Se identificaron 183 posibles eventos duplicados; sin embargo, todos los candidatos (con una excepción) fueron pares de eventos que se derivan del catálogo de la UASD. Además, solo tres corresponden a eventos de $M_w > 5$. No se consideró que estos eventos sean duplicados y, por lo tanto, no se excluyó ninguno del catálogo final. La excepción fueron un par de eventos de 1927 que aparecen en el catálogo de CCA; uno proviene de ISCGEM ($M \sim 5.7$) y el otro de ISCGEM-extendido ($M \sim 6.5$). No fue posible encontrar otra evidencia del evento más grande y, por lo tanto, se mantuvo el evento $M 5.7$.

2.1.3 Regionalización tectónica de la sismicidad

El flujo de trabajo aquí utilizado para realizar la caracterización de las fuentes sísmicas y, en particular, el uso de la sismicidad para limitar las tasas de ocurrencia de muchas de las fuentes, requiere que el catálogo de terremotos se haya clasificado según los regímenes tectónicos que afectan la amenaza sísmica. Por ejemplo, las tasas de ocurrencia de las fuentes que ocurren en la placa descendente deben restringirse utilizando solo la sismicidad que se cree que ocurrió dentro de esa placa. Utilizamos el procedimiento de Pagani et al. (2020a) para clasificar el catálogo creado en este documento. Este procedimiento está implementado en la herramienta OpenQuake Model Building Toolkit (MBTK1) de GEM, y este clasifica un terremoto de acuerdo con la proximidad de su hipocentro a las superficies de referencia utilizadas para delinear las regiones tectónicas.

En el modelo DOM21, se clasificaron los hipocentros en cuatro dominios tectónicos: (1) corteza superficial activa, (2) la interfaz de subducción de la Trincheras de Puerto Rico, (3) la subducción intraplaca de la Trincheras de Puerto Rico (PRT) y (4) subducción intraplaca de la Trincheras La Española Norte (NHT). Si bien las interfaces de subducción de la Trincheras de La Española Norte y la Trincheras de Los Muertos (LMT) también se consideran tipos de regiones tectónicas independientes en la caracterización de la fuente sísmica, hay muy pocos terremotos en cualquiera de los dominios como para restringir las tasas de ocurrencia. Por lo tanto, los terremotos que fueron causados por estas fuentes se clasifican como corticales en esta etapa. Sin embargo, las fuentes relevantes finalmente se modelan como interfaces de subducción (esto se explica más detalladamente en la caracterización de las fuentes sísmicas). Adicionalmente, la Trincheras de los Muertos a veces se considera un cinturón de empuje poco profundo en lugar de un límite de placa, y las geometrías de ambas estructuras están mal restringidas. Por lo tanto, es útil incluirlos en el flujo de trabajo de modelado de la corteza para que parte de la sismicidad se distribuya fuera de las superficies primarias.

El algoritmo de clasificación utilizó las siguientes suposiciones y superficies, definidas específicamente para esta aplicación, para asignar a cada terremoto a un dominio tectónico.

- (1) Las profundidades de Moho de Lithos 1.0 se utilizan (Pasayanos et al., 2014) para definir el umbral de profundidad inferior de la sismicidad de la corteza. Los hipocentros por debajo de la profundidad de Moho más una zona de amortiguamiento de 40 km se clasifican como corticales. Se tiene en cuenta que se incluye una zona de amortiguamiento muy grande que garantiza que se produzcan terremotos en el LMT o el NHT. Sin embargo, la jerarquía aplicada posteriormente asegura que esto no provoque que los terremotos en la interfaz PRT o en las

¹ <https://github.com/GEMScienceTools/oq-mbtk>

placas se etiqueten como corticales, y en los pasos de modelado cortical, los terremotos de menos de 50 km no se consideran.

- (2) Slab2.0 (Hayes et al., 2018) se usa para definir una superficie que representa la interfaz de la PRT; los hipocentros que ocurren dentro de los 10 km por encima y 30 km por debajo de la superficie, y menos de 60 km de profundidad se clasifican en este dominio.
- (3) Slab2.0 también se usa para definir la parte superior del volumen de la placa PRT. Los terremotos que ocurren dentro de los 20 km por encima y 50 km por debajo de esta superficie se clasifican como PRT intraplaca.
- (4) La caracterización de la fuente sísmica de Terrier-Sedan y Bertil (2021) se usa para definir la parte superior del volumen de la placa NHT, pero con el límite de profundidad superior aumentado de 25 km a 40 km. Las mismas zonas de amortiguamiento y umbrales de profundidad que en (3) se utilizan para asignar terremotos a esta placa. Los hipocentros restantes se dejan sin clasificar.

En algunos casos, los resultados de la clasificación indican que un terremoto podría haber ocurrido en múltiples regiones tectónicas. Por ejemplo, algunos eventos son menos profundos que el Moho y dentro de los 20 km de la interfaz del PRT. En estos casos, se utiliza una jerarquía para determinar qué dominio tectónico debe asignarse. Aquí, se considera que es más probable que ocurran terremotos en la placa que en la corteza superficial activa, y es más probable que se originen en la interfaz que dentro de la placa. Finalmente, los eventos más grandes, aquellos $M_w > 6.5$ y dentro de los umbrales de completitud utilizados en la caracterización de la fuente sísmica (ver las siguientes secciones) se inspeccionan manualmente y se comparan con los registros históricos, y los eventos que consideramos mal clasificados se asignan nuevamente a su dominio correcto. En este caso, reasignamos dos terremotos: uno de 1947 M_w 7.7 a la interfaz PRT; y un 1979 M_w 6.7 al intraplaca NHT. También eliminamos un evento de 2012 M_w 6.5 proveniente del catálogo de UASD que no estaba incluido en otros catálogos.

La clasificación final asignó 815 terremotos a la intraplaca NHT, 429 a la intraplaca PRT, 2303 a la interfaz PRT y 11067 a la corteza superficial activa. Los terremotos de 1943 permanecieron sin clasificar, la mayoría de los cuales fueron profundos o con $M_w < 5.0$. Los resultados de la clasificación se presentan en la Figura 4.

Para obtener más información sobre el algoritmo de clasificación tectónica, consulte la documentación en <https://gemscicetools.github.io/oq-mbtk/contents/sub.html>.

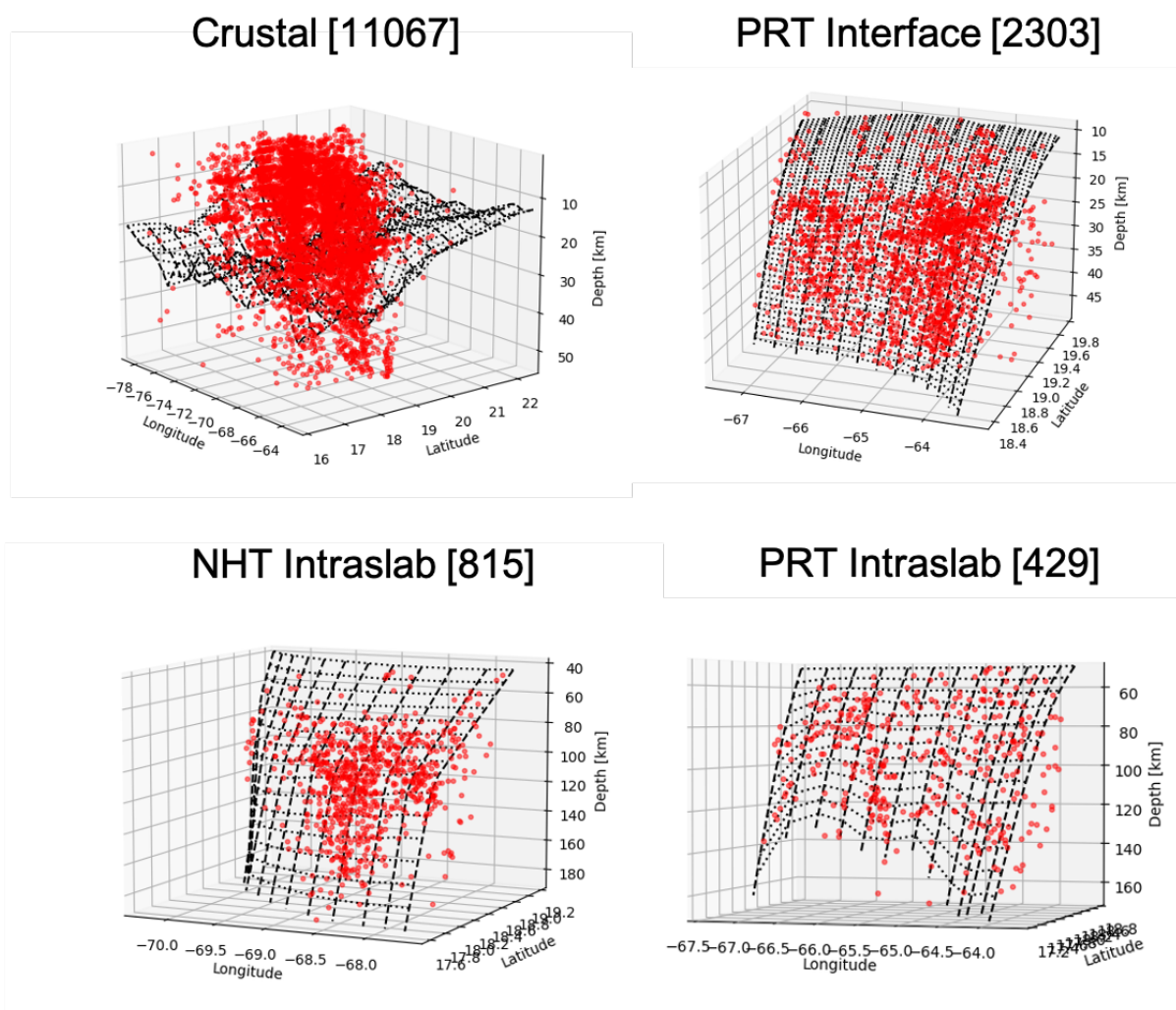


Figura 4. Superficies utilizadas para clasificar la sismicidad y la sismicidad correspondiente clasificadas a los respectivos TRT, con el número de eventos enumerados entre paréntesis. Arriba a la izquierda: sismicidad de la corteza (recordemos que esto incluye las interfaces LMT y NHT). Arriba a la derecha: interfaz PRT. Abajo a la izquierda: NHT intraplaca. Abajo a la derecha: PRT intraplaca.

2.2 Base de datos de fallas superficiales activas (fallas corticales)

Además del catálogo clasificado, la base de datos de fallas superficiales activas (fallas corticales) es el conjunto de datos más importante utilizado para construir el modelo de fuentes sísmicas DOM21. La base de datos de fallas superficiales activas utilizada en este documento, que se compiló en el contexto del proyecto TREQ, se basa en dos conjuntos de datos: (1) la base de datos de fallas CCARA más reciente (actualizada por Styron et al., 2020), que forma parte de la base de datos global de fallas activas de GEM (GAF-DB; Styron y Pagani, 2020), e incluye alrededor de 290 fallas superficiales activas, y (2) una base de datos de fallas activas construida por el SGN durante el Programa SYSMIN y los proyectos del Gran Santo Domingo (por ejemplo, Bertil et al., 2015). Además, para la caracterización de algunas fallas (cinemática de fallas y estimaciones de tasas de deslizamiento) se utilizó la literatura reciente (Calais et al, 2016) y resultados de proyectos actuales del SGN. Enfatizamos que la contribución del SGN fue fundamental para compilar la base de datos de fallas completa para DOM21.

La base de datos final utilizada en este documento incluye 84 trazas de fallas de la base de datos CCARA, que cubren el sureste de Cuba, Jamaica, La Española y Puerto Rico, y están tanto en tierra como en alta mar (Figura 5). Las fallas a lo largo de Cuba -el Sistema de Fallas de Oriente y el cinturón deformado de Santiago- fueron ligeramente modificadas (su segmentación) con base a un estudio más reciente de Rodríguez-Zurrutero et al., (2020). Para todos los demás casos, se mantuvo la parametrización utilizada en la última versión del modelo de Centroamérica y el Caribe (CCA).

Luego, fusionamos este conjunto de fallas con la compilación nacional del SGN (por ejemplo, Bertil et al., 2015). La primera versión del conjunto de datos del SGN contenía 35 trazas de fallas, y se actualizó con datos del proyecto tectónico SGN-IGME dedicado al estudio de la falla Septentrional (Yesica Pérez, comunicación personal en la primera fase del proyecto TREQ). La última versión incluye 40 trazas de fallas ubicados en La Española (Figura 6).

Las fallas geológicas se caracterizaron siguiendo los estándares propuestos en Styron et al. (2020), y consistentes con el enfoque para caracterizar las fallas provenientes de la base de datos CCA. Los atributos geométricos de la falla son proporcionados principalmente por SGN (las excepciones se enumeraron anteriormente), mientras que la cinemática (es decir, las tasas de deslizamiento) se tomaron de compilaciones del SGN o de la literatura si no estaban disponibles en los estudios o informes del SGN.

La compilación que combinaba las dos fuentes de datos contenía inicialmente 125 trazas con errores. Algunas fallas importantes en La Española fueron duplicadas, ya que fueron mapeadas y caracterizadas para ambos proyectos (ver Figura 7). En general, el estilo de falla y los parámetros que describen la geometría (buzamiento, inclinación dirección del buzamiento) para estas fallas son bastante similares, pero se encontraron diferencias en las ubicaciones de la traza (incluida la segmentación) y la cinemática. Las diferencias en las ubicaciones de las trazas se pueden asociar a los métodos de asignación y a los datos de referencia. Dado que las ubicaciones de las trazas están mejor restringidas en la base de datos del SGN, estas trazas se utilizaron para todas las fallas en La Española, y las trazas de CCA se utilizaron para el resto del área de estudio. Es más probable que las disparidades cinemáticas estén relacionadas con la interpretación de los autores al construir las bases de datos y con los datos disponibles en el momento de realizar estudio. Por lo tanto, nuestro mejor juicio se utilizó para seleccionar las tasas de deslizamiento caso por caso.

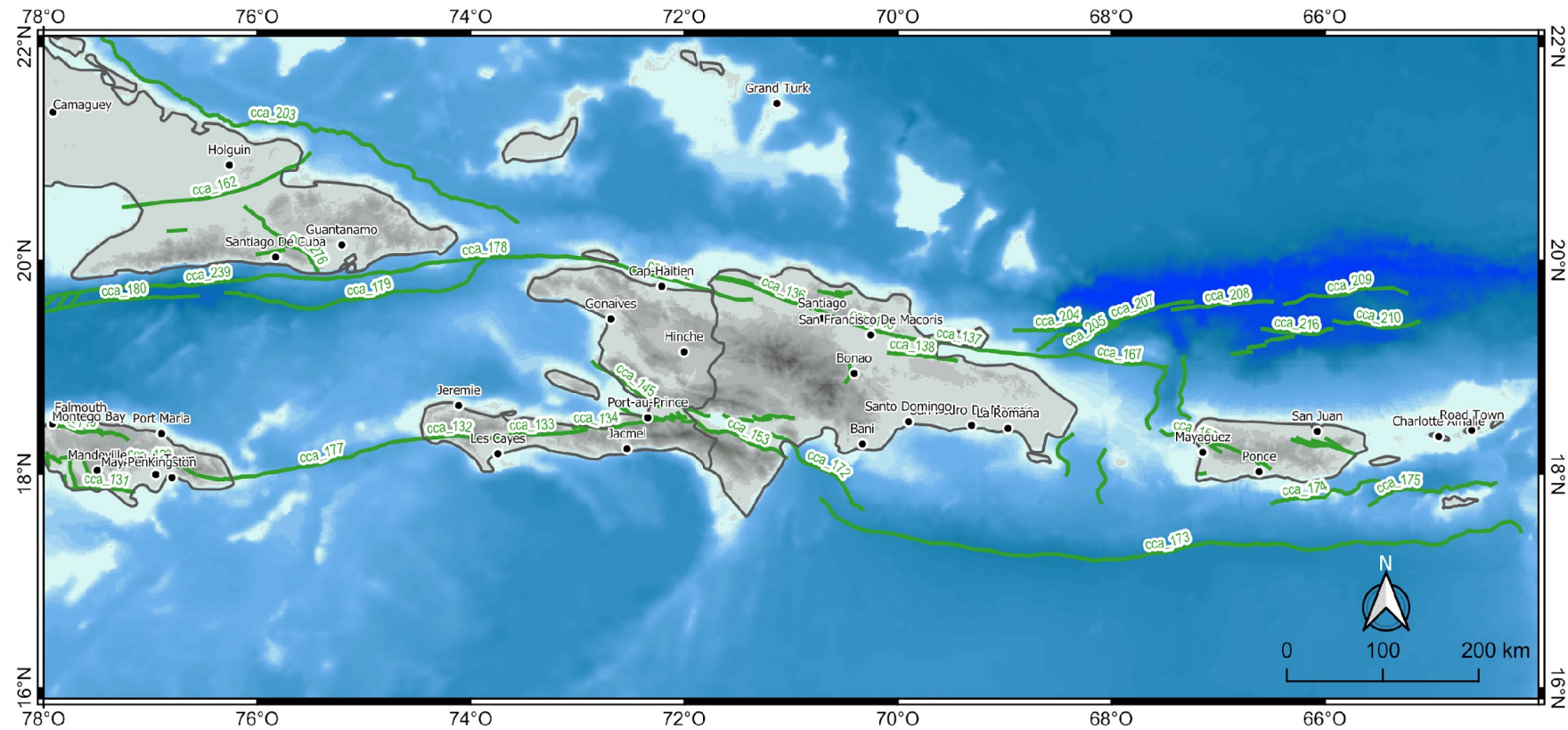


Figura 5. Fallas obtenidas de la base de datos de CCA (actualizada de Styron et al., 2020). Los identificadores de culpa corresponden a los de la Tabla 6.

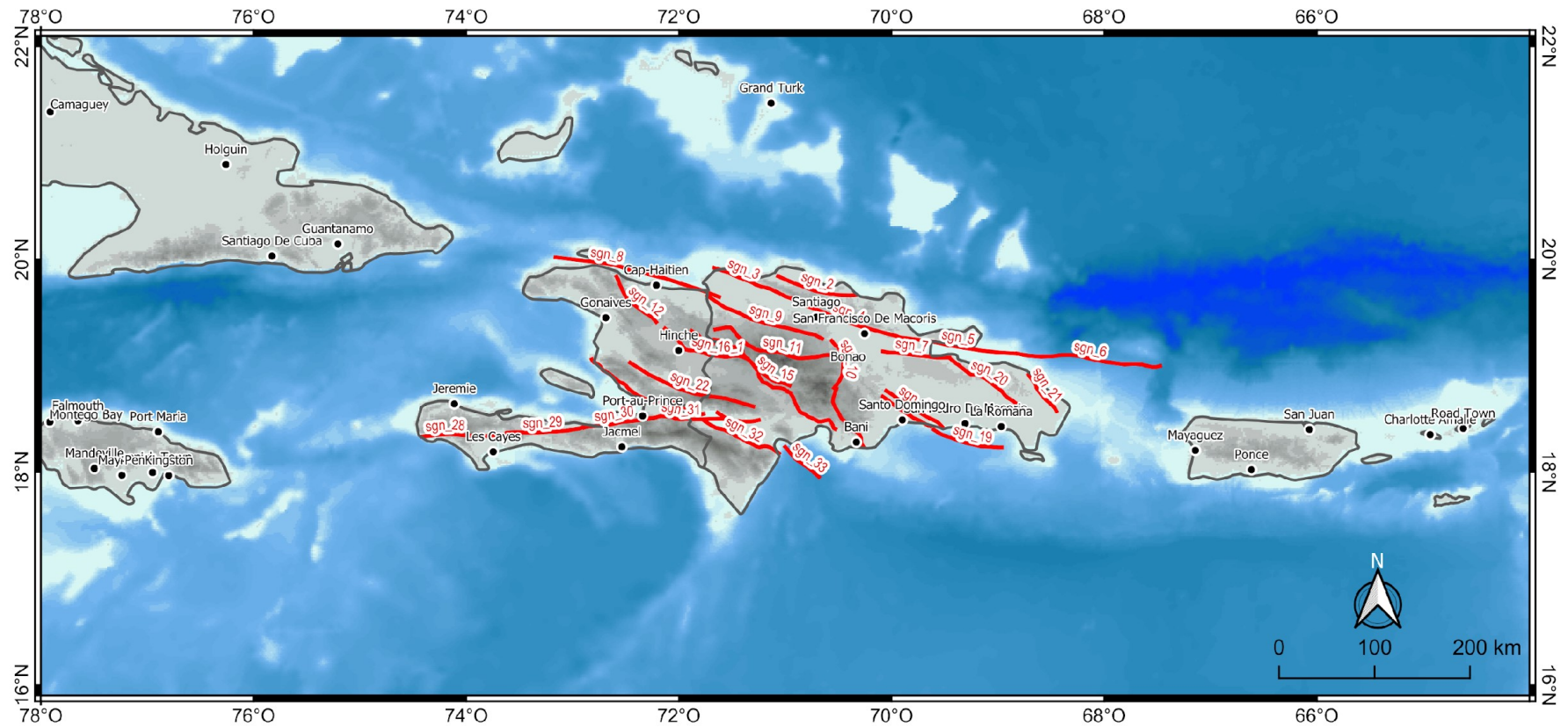


Figura 6. Fallas aportadas por la base de datos del SGN (por ejemplo, Bertil et al., 2015). Los identificadores de culpa corresponden a los de la Tabla 6.

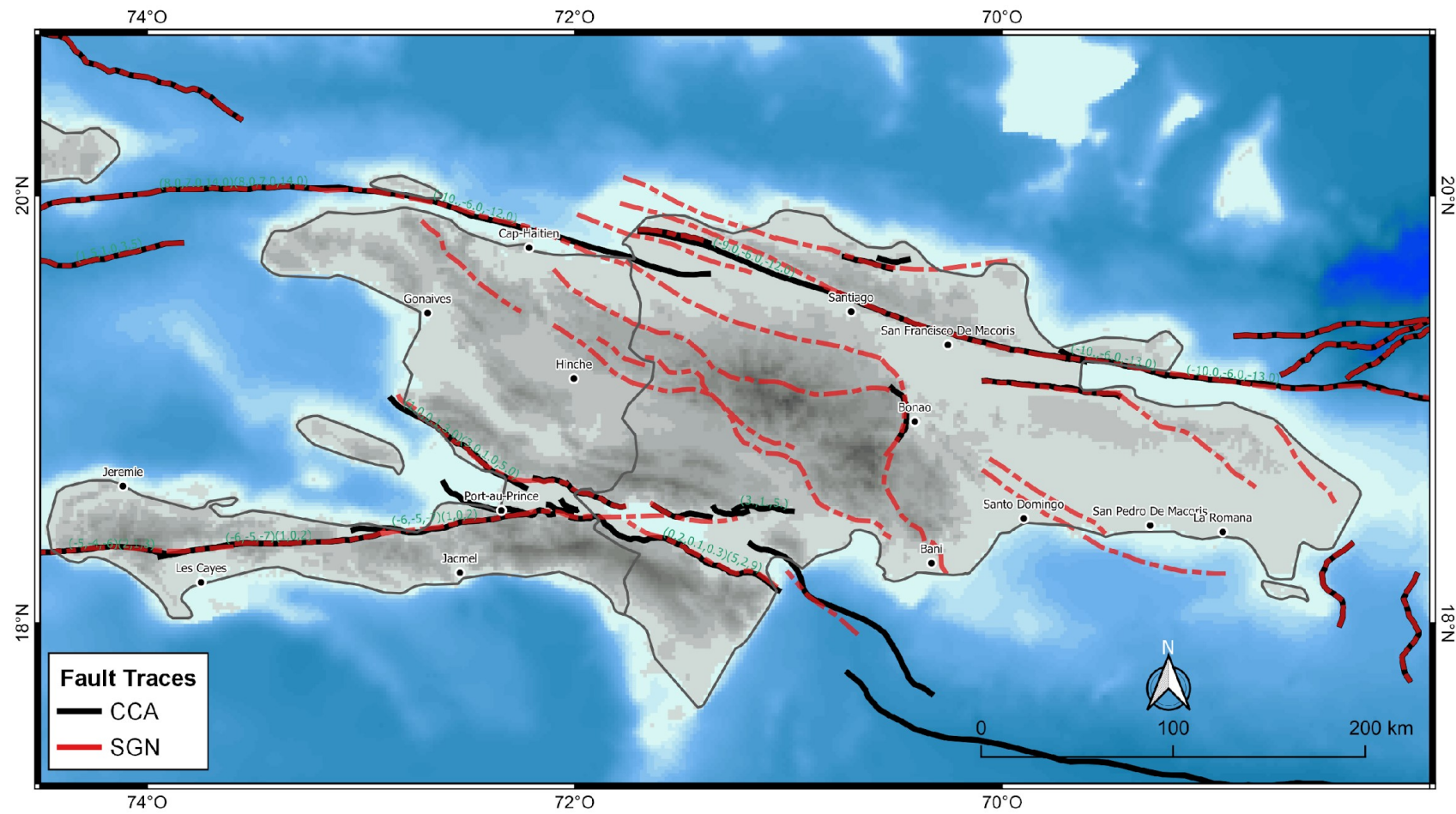


Figura 7. Trazas de fallas en la compilación utilizada en este estudio muy cerca de La Española: 84 trazas (líneas negras) provienen del modelo CCA y el resto (40 líneas discontinuas rojas) de compilaciones SGN

3 CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SÍSMICAS

La caracterización de fuentes sísmicas (SSC, por sus siglas en inglés) para el modelo DOM21 incluye múltiples modelos de fuentes sísmicas que juntos representan todos los terremotos que se han observado o que se cree que son posibles en y cerca de La Española, y que explican algunas de sus incertidumbres epistémicas y aleatorias. Aquí, discutimos los modelos de fuentes en tres grupos que corresponden a los dominios tectónicos primarios definidos en la Sección 2: (1) la interfaz de PRT, (2) las fuentes dentro de la placa y (3) la colección de fuentes que representan terremotos en la parte corteza superficial activa y en las interfaces de NHT y de LMT. Para cada grupo, explicamos las tipologías de fuente elegidas, cómo se determinan las geometrías de la fuente y las propiedades de ocurrencia. Luego, describimos las incertidumbres que incorporamos en la caracterización.

La caracterización de fuentes sísmicas se llevó a cabo utilizando una serie de herramientas desarrolladas (sustentadas) por GEM. En particular, utilizamos el OQ-MTBK para modelar fuentes de subducción y sismicidad distribuida, y el software Seismic Hazard and Earthquake Rate In Fault Systems (SHERIFS) (ver Chartier et al., 2019) para modelar rupturas que ocurren en las fallas superficiales activas y las interfaces de NHT y de LMT. Estas herramientas se describen en sus respectivas secciones.

3.1 Interfaz de la trinchera de Puerto Rico

La interfaz de la Trinchera de Puerto Rico (PRT) se caracterizó como una fuente de falla compleja OpenQuake, es decir, una superficie 3D definida por un conjunto de "bordes" a lo largo del rumbo que están espaciados aproximadamente igual a lo largo de la superficie de la interfaz de inmersión. Los bordes se derivan de la geometría de la Trinchera de Puerto Rico Slab 2.0 (Hayes et al., 2018) y corresponden a la misma superficie utilizada para clasificar la sismicidad (Figura 4).

Para determinar la distribución de la magnitud y frecuencia (MFD) para la interfaz de PRT, exploramos las distribuciones según: (1) la sismicidad observada clasificada en la interfaz en la Sección 2; (2) las dimensiones de la falla y la tasa de deslizamiento; y (3) utilizando una combinación de ambos factores. Para (1) y (3), la sismicidad observada clasificada se desglosó primero usando el método de Gardner y Knopoff (1974) usando las ventanas temporales y espaciales de Uhrhammer (1986), y solo las réplicas identificadas se usaron para calcular las MFDs basados en la sismicidad. Adicionalmente, el catálogo se recortó para incluir solo la sismicidad dentro de los umbrales definidos de completitud de tiempo-magnitud (título de la Figura 9).

En (1), el subcatálogo final se usó con el método de Weichert (1980) para derivar un MFD de Gutenberg-Richter (GR) con valor $a = 4.74$ y valor $b = 1.00$. $M_{\max}$. Para (1) se obtuvo sumando un delta de 0.3 a la magnitud del terremoto más grande observado (M_W 7.7 que ocurrió en 1943). Para (2) exploramos la distribución de magnitud y frecuencias (MFD) de Youngs y Coppersmith (1985; YC) derivados de índices de deslizamiento escalados por un coeficiente de acoplamiento, usando múltiples $M_{\max}$ (M_W 7.9 - 8.2), coeficientes de acoplamiento (0.08 - 1.0) e índice de deslizamiento (7.2 - 6.5 mm/año) valores de la literatura (Symithe et al, 2015; Manaker, 2008; Terrier-Sedan & Bertil, 2021). En (3), usamos el subcatálogo de los mismos rangos de parámetros con la metodología de Paganí et al. (2020a) para crear MFD de tipo híbrido que desacople los procesos que controlan los terremotos de magnitud "característica" de los de menor magnitud que ocurren según una GR (ver también Peñaruba et al., 2020; Johnson et al., 2021).

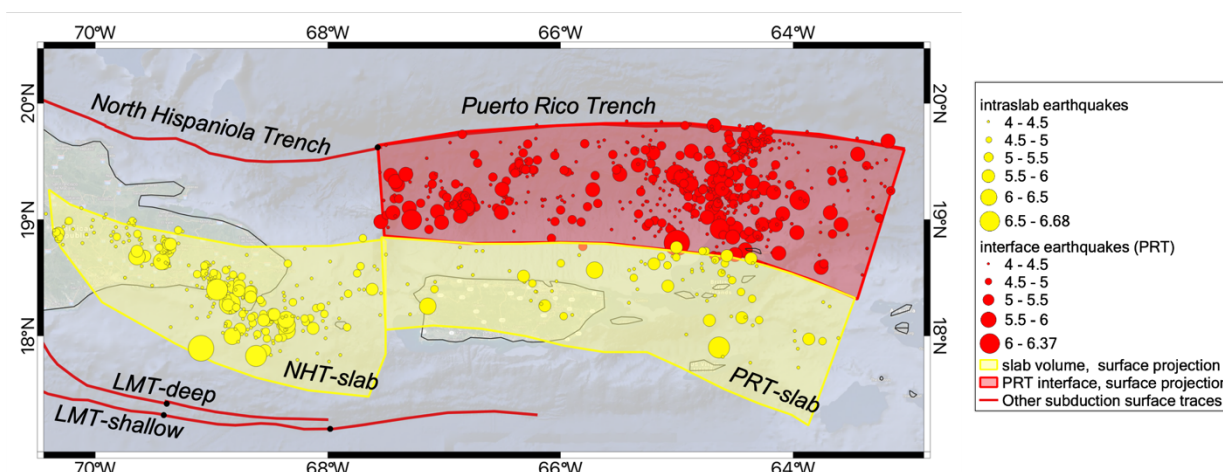


Figura 8. Interfaz de subducción y fuentes de placa de subducción. Las líneas rojas muestran la proyección superficial del borde superior de las fallas clasificadas como interfaz de subducción en la proximidad de las superficies utilizadas para la clasificación tectónica de la sismicidad (ver Figura 4): la Trinchera La Española Norte (NHT. Nota: esto se extiende hacia el oeste), la Trinchera de Puerto Rico (PRT), y la Trinchera de Los Muertos (LMT). El polígono rojo muestra la extensión de la interfaz de PRT, y los círculos rojos son terremotos de $M_w > 4.0$ ocurridos desde 1960 clasificados en esta TRT. El polígono y los círculos amarillos son iguales, pero para la región tectónica intraplaca, separados en NHT y PRT. Los puntos negros muestran dónde ocurren los segmentos de las fallas.

Considerando la proximidad de la interfaz de PRT a La Española (>100 km a los sitios terrestres más cercanos), las tasas de eventos de mayor magnitud tienen un impacto mucho mayor en la amenaza sísmica. Por lo tanto, elegimos solo dos MFDs de la gama de candidatos: un GR MFD, que tiene tasas más bajas de terremotos $M > 7.0$ y un YC MFD. Ambos MFDs están respaldados por las observaciones, aunque observamos que las tasas de las ocurrencias de mayor magnitud pueden estar sesgadas por la completitud de la magnitud - tiempo, y representan posibles soluciones (ver Figura 9). Las dos alternativas tienen la misma ponderación en el árbol lógico del modelo fuente.

3.2 Fuentes de intraplaca

Ambas placas se modelaron utilizando fuentes no paramétricas en el OpenQuake Engine (es decir, rupturas predefinidas con las probabilidades correspondientes que se generan antes de los cálculos de amenaza) de acuerdo con el método propuesto por Pagani et al. (2020a). El método sigue los siguientes pasos:

- (1) Para cada volumen de placa, el subcatálogo clasificado y desagregado para la placa o segmento de placa respectivo se usa para derivar una GR MFD usando el método de Weichert (1980).
- (2) Se generan rupturas cuadrículadas dentro del volumen de la placa, que se basa en la geometría de la superficie superior de la placa utilizada para clasificar la sismicidad
- (3) Se distribuyen las tasas de magnitud y frecuencia (MFD) a través de las rupturas cuadrículadas. En Pagani et al. (2020a), el paso (3) asigna una tasa uniforme a cada ruptura. Aquí, nos basamos en el método original para incluir un núcleo de suavizado basado en Gauss que distribuye una parte de las tasas de ocurrencia de acuerdo con la sismicidad pasada.

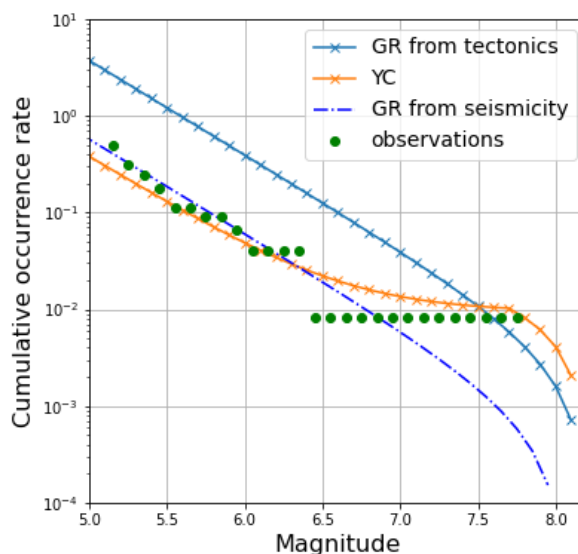


Figura 9. Distribución de magnitud y frecuencia (MFD) para la interfaz de PRT. Los puntos verdes muestran las tasas de ocurrencia acumuladas de las observaciones (es decir, terremotos registrados), mientras que cada línea muestra una MFD ensayada. La línea azul clara con cruces es la GR MFD calculado a partir de la tectónica; y la azul oscura es la GR MFD ajustada a las observaciones de los terremotos, y la línea naranja es la MFD de Youngs y Coppersmith (1985; YC) de la tectónica. Todas las MFD calculadas usan $b=1.0$ (ver texto) y los rangos de completitud de $[[2010, 5.0], [2000, 5.2], [1980, 5.5], [1960, 6.0], [1900, 7.0]]$.

El modelo de fuente sísmica para la República Dominicana incluye dos fuentes intraplaca: la placa descendente de las trincheras de La Española Norte y de Puerto Rico. Los GR MFD generados a partir de los respectivos subcatálogos se enumeran en la Tabla 4, con $M_{min} = 5.5$ y $M_{max} = M_{max,obs} + 0.3$, pero con un mínimo de $M_{max} = 7.0$ (es decir, ver el MFD para PRT). Para ambas fuentes de placa, las superficies utilizadas para clasificar la sismicidad (ver Figura 4) también se utilizan para definir los volúmenes de placa dentro de los cuales se producen las rupturas. La superficie se utiliza como la parte superior del volumen de la placa. Las rupturas se generan en superficies con buzamiento de 45° y 135° respectivamente con respecto a la parte superior de la placa y se extienden por 60 km, utilizando la relación de escala - magnitud para la sismicidad intraplaca de Strasser (2010) y relaciones de aspecto de ruptura que van de 2.0 a 8.0 para determinar las dimensiones de ruptura.

Se incluyeron dos versiones de las fuentes intraplaca en el árbol lógico. En el primero, el 10% de las ocurrencias se distribuye uniformemente en todo el volumen de la placa, mientras que el otro 90% se distribuye utilizando el núcleo suavizante. En el segundo, la relación se cambia de manera que el 90% de la sismicidad se distribuye uniformemente. En el árbol lógico, el modelo anterior tiene un peso más alto (0.7) basado en nuestra mayor confianza en el modelo que asume que es más probable que futuros terremotos ocurran dentro de placas cercano a terremotos anteriores.

Tabla 4. Parámetros de las GR MFDs calculadas para la región tectónica intraplaca de la Trinchera de La Española Norte (NHT) y la Trinchera de Puerto Rico (PRT).

Segmento intraplaca	a-valor	b-valor	M_{max}	$M_{max,obs}$	Integridad $[[año, M], ...]$
NHT	4.566	0.968	7.5	7.2	$[[2000, 5.0], [1980, 5.5], [1960, 6.0], [1900.0, 7.0,]]$
PRT	4.898	1.087	7.0	6.1	$[[2000, 5.0], [1980, 5.5], [1960, 6.0], [1900.0, 7.0,]]$

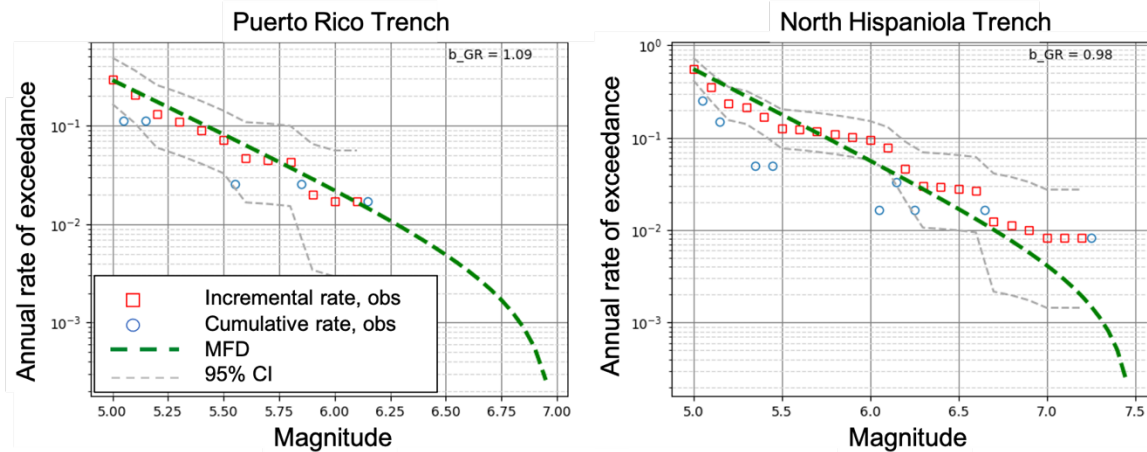


Figura 10. MFDs para las regiones tectónicas intraplaca.

Izquierda: Trinchera de Puerto Rico y Derecha: Trinchera de La Española Norte. La línea verde discontinua muestra el ajuste de las MFD a las observaciones, los círculos azules muestran las tasas de ocurrencia incrementales de terremotos categorizados en la placa respectiva, los cuadrados rojos muestran las tasas de ocurrencia acumuladas para el mismo, y las líneas grises discontinuas muestran el intervalo de confianza del 95%.

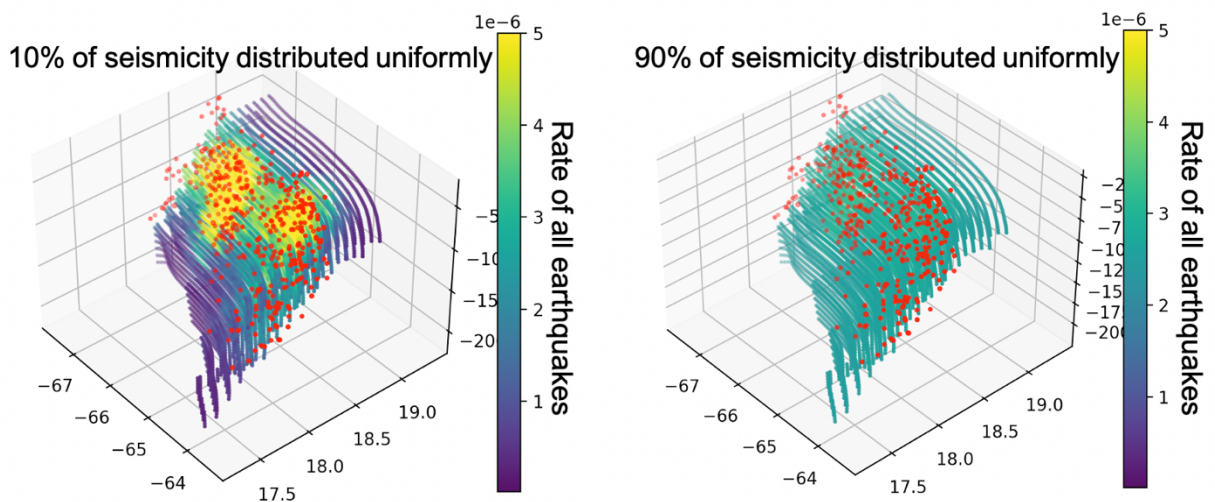


Figura 11. Ejemplo para la Trinchera de Puerto Rico, donde las tasas de sismicidad intraplaca modeladas se suavizan (izquierda) 10% uniformemente y 90% según el núcleo, y (derecha) 90% uniformemente y 10% según el núcleo. Cada punto representa un hipocentro de ruptura y está coloreado por la tasa acumulativa de todos los terremotos asignados a esa ruptura.

3.3 Fuentes corticales superficiales e interfaces NHT y LMT

El componente superficial de la corteza del modelo de fuentes se compone de dos partes principales: (1) sismicidad distribuida modelada al suavizar las tasas de ocurrencia de fuentes puntuales en las zonas de origen, y (2) rupturas de fallas únicas y múltiples que capturan el rango de posibles terremotos de rupturas sísmicas que podrían ocurrir dentro de los sistemas de fallas que afectan a La Española. Estas fuentes se basan en el subcatálogo clasificado para la corteza superficial, la base de datos de fallas y las interfaces LMT y NHT según lo caracterizado por Terrier-Sedan y Bertil (2021).

La sismicidad de la corteza superficial se caracterizó siguiendo los siguientes pasos:

- (1) Definir las zonas de origen de la corteza que se utilizarán para crear fuentes de sismicidad distribuida,
- (2) Usando el OQ-MBTK, caracterizar la geometría y las propiedades de ocurrencia de cada fuente,
- (3) Aplicar núcleos de suavizado para distribuir las tasas de sismicidad modeladas dentro de una zona de fuente a través de fuentes puntuales de acuerdo con las posiciones de terremotos pasados,
- (4) Usando SHERIFS, se crea un modelo de ruptura que gaste las tasas de deslizamiento de todas las fallas en la base de datos de fallas usando rupturas de fallas únicas y múltiples,
- (5) Usando SHERIFS y OQ-MBTK para controlar la porción de la tasa de momento total modelada asignada a la sismicidad distribuida versus el modelo de ruptura,
- (6) Repetir los pasos 2-5 para incorporar incertidumbres epistémicas.

En el paso (1), definimos un conjunto de siete "zonas fuente", es decir, áreas (definidas por un perímetro) con características tectónicas y sísmicas internamente consistentes, resumidas en la Tabla 5. Las zonas de origen están basadas en datos geológicos y geofísicos, incluyendo los límites de las placas, la tasa de deslizamiento y el sentido del movimiento de las fallas de la corteza y los patrones espaciales de sismicidad, pero no necesariamente tienen tasas espacialmente consistentes. Luego, en el Paso (2), caracterizamos cada zona fuente, asignando los siguientes parámetros: GR MFD; distribución del mecanismo focal; distribución de profundidad y límites de profundidad sismogénica; relación de escala de magnitud; y relación de aspecto de ruptura. Los MFDs y los parámetros de distribución de profundidad se derivaron del subcatálogo de la corteza desagrupado recortado a la zona de origen y filtrado para que esté completo. Las MFDs usan un valor fijo de $M_{\min} = 5.0$, mientras que $M_{\max}$ es la magnitud del terremoto más grande observado en la zona fuente + 0.5.

En el paso (3), se usa un núcleo de suavizado gaussiano para redistribuir el momento total en cada zona de fuente en un conjunto de fuentes puntuales que se ubican usando el nivel 4 de [H3: el índice espacial jerárquico hexagonal de Uber](#)¹. En cada punto de la cuadrícula, el método de suavizado, que es similar al de Frankel (1995), toma en consideración cada terremoto dentro de una distancia dada y utiliza el núcleo gaussiano para determinar cuánto más momento producirá ese punto de la cuadrícula en el modelo fuente en relación con los otros puntos de la cuadrícula. El núcleo utiliza tres gaussianas con desviaciones estándar de 20, 40 y 60 km ponderadas al 80%, 15 % y 5%, respectivamente, y una distancia máxima (radio) de 120 km. Tradicionalmente, cuando se usa esta metodología, a cada terremoto se le ha dado el mismo peso cuando se escala su impacto utilizando el kernel de suavizado (por ejemplo, en otros modelos de GEM como Peñarubia et al., 2020 y Johnson et al., 2020). Aquí, exploramos un segundo método para ponderar los terremotos, en el que los pesos se basan en el inverso de la duración completa aplicada a la respectiva magnitud del terremoto, lo que da como resultado una mayor ponderación para los terremotos de menor magnitud. Esto es defendible porque entonces los terremotos más pequeños, aquellos que se espera que tengan tasas más altas en un sentido relativo (ya que todos los MFDs usan una forma MFD exponencial negativa de Gutenberg-Richter), tienen más prioridad en el esquema de ponderación.

¹ <https://github.com/uber/h3>

Tabla 5. Descripción de las zonas tipo fuente (SZ) utilizadas para modelar la sismicidad cortical. a y b son los valores de la GR a y b . $M_{\max}$ es la magnitud máxima observada (obs) y modelada (mod). FM es la distribución del mecanismo focal dada por rumbo/buzamiento/dirección y el peso (w). DD son los pares de distribución de profundidad y peso w , profundidad (km). C son los umbrales de completitud utilizados en términos de año y magnitud.

SZ	descripción	a	b	$M_{\max}$ (obs/ mod)	FM (rumbo/buzamiento/ inclinación, w)	DD (w , profundidad)	C (año, M_w)
1	Falla de empuje que marca la convergencia entre las placas NA y C. Estructuras principales: NHT y PRT. Las tasas de sismicidad en la NHT son altas en el centro y el este, pero más escasas al oeste	4.29	0.98	6.8/ 7.1	0/90/-90, 1.0	0.17, 5.0 0.31, 15.0 0.39, 27.5 0.13, 42.5	2000, 5.0 1980, 5.5 1960, 6.0 1920, 6.5 1900, 7.0
2	Zona de cizallamiento que acomoda el componente siniestral de la convergencia NA-C. Incluye las zonas de falla Septentrional y Oriente, que en su mayoría tienden ~E-O.	3.46	0.72	7.76/ 8.06	90/30/90, 0.64 90/90/0, 0.22 90/45/90, 0.14	0.2, 5.0 0.4, 15.0 0.32, 27.5 0.08, 42.5	2000, 5.0 1980, 5.5 1960, 6.0 1900, 7.0
3	Sismicidad dispersa en la placa NA	3.15	0.80	6.87/ 7.17	0/90/-90, 1.0	0.16, 5.0 0.24, 15.0 0.55, 27.5 0.05, 42.5	2000, 5.0 1980, 5.5 1960, 6.0 1900, 7.0
4	Sismicidad escasa en la placa del Caribe; transpresión al este y compresión al oeste	5.90	1.29	6.69/ 6.99	0/90/-90, 1.0	0.14, 5.0 0.26, 15.0 0.49, 27.5 0.11, 42.5	2000, 5.2 1980, 5.5 1960, 6.0 1940, 6.5 1900, 7.0
5	Incluye la mayor parte del bloque Gonaive y la zona de falla de Enriquillo-Plantain Garden que limita con el terreno. La falla es predominantemente E-W y sinistral/transpresiva	3.73	0.86	7.80/ 8.10	100/45/9 0, 0.8 30/90/0, 0.2	0.22, 5.0 0.42, 15.0 0.29, 27.5 0.07, 42.5	2010, 4.6 2000, 5.0 1980, 5.5 1960, 6.0 1900, 7.0
6	La península oriental, marcada principalmente por fallas extensionales que recubre el cabalgamiento de Muertos	4.80	1.06	7.50/7.80	100/60/- 90, 0.46 100/30/9 0, 0.54	0.26, 5.0 0.3, 15.0 0.38, 27.5 0.06, 42.5	2000, 5.0 1980, 5.5 1960, 6.0 1900, 7.0
7	Zona de convergencia entre las placas NA y C. En el este, la estructura principal es el LMT de tendencia E-O. Más al oeste, las estructuras giran hacia ONO-ESE, e incluyen el cinturón Peralta de empuje frontal, la falla Montagnes Noires y la falla Matheux.	4.57	0.94	7.50/ 7.80	330/45/9 0, 0.64 210/90/0, 0.24 30/30/90, 0.12	0.17, 5.0 0.31, 15.0 0.43, 27.5 0.09, 42.5	2010, 4.7 2000, 5.3 1980, 5.5 1960, 6.0 1900, 7.0

Al final del paso (3), las fuentes puntuales para cada zona de fuentes se dividen en dos conjuntos que dependen de sus rangos de magnitud. Esto se hace duplicando las fuentes puntuales y asignando a cada conjunto una parte de la MFD para cada fuente. El primer conjunto da cuenta de magnitudes $M_w < 6.0$,

mientras que el segundo da cuenta de $M_w \geq 6.0$. Esta estructura se usa más adelante en el flujo de trabajo (paso 5), cuando las fuentes puntuales activas de la corteza superficial deben combinarse con las fuentes de fallas.

El paso (4) caracteriza las fuentes de fallas, utilizando el programa *Seismic Hazard and Earthquake Rates In Fault Systems* (SHERIFS; Chartier et al., 2019) para crear rupturas en cada falla en la base de datos proporcionada por SGN. SHERIFS es una herramienta en Python de código abierto que considera las fallas individuales juntas como un sistema de fallas, modelando las tasas anuales de ruptura para las rupturas permisibles por el sistema de fallas, incluidas aquellas que son complejas y con múltiples fallas. La herramienta toma geometrías de fallas y tasas de deslizamiento como entrada, así como también hipótesis (realizadas por el modelador) de la forma de la MFD para el sistema de fallas total. Las fallas, utilizando sus trazas de superficie, buzamientos y direcciones de buzamiento, se cortan en segmentos representados por superficies tipo cometa (kyte) en OpenQuake, y las tasas de deslizamiento de fallas se dividen entre los segmentos en función de sus áreas respectivas. Luego, los segmentos se utilizan para construir dos tipos de fuentes: fallas tipo cometa y rupturas no paramétricas, que juntas satisfacen la MFD objetivo definida para el área de falla, las tasas de deslizamiento y la forma de la MFD objetivo definida por el usuario. El presente modelo utiliza los siguientes datos y supuestos:

- Datos de fallas: trazas de fallas, índices de deslizamiento, sentido de movimiento, buzamientos y direcciones de buzamientos según lo definido por la base de datos recopilada en este documento (ver la Sección 2.2); descrito más explícitamente en la Tabla 6.
- MFD inicial: Gutenberg-Richter con valor $b = 0.95$ (un promedio aproximado de las zonas que incluyen fallas)
- Relaciones de escala de magnitud y sismicidad de falla intermitente (Tabla 7).

Las fuentes de falla se pueden dividir en dos categorías. El primero son las fuentes de una sola sección (fallas tipo cometa), que producen rupturas que van desde $M_w 6.0 - M_{\max, \text{segmento}}$, donde $M_{\max, \text{segmento}}$ es la magnitud de un terremoto que rompería el segmento completo. Estas son fuentes paramétricas "típicas" en el sentido en que se evalúan mediante rupturas flotantes en las superficies de la cometa. El segundo tipo son las rupturas multisección, que acomodan las magnitudes que exceden $M_{\max, \text{segmento}}$. A cada ruptura no paramétrica se le asigna una probabilidad anual de ocurrencia correspondiente.

Además de las fallas en la base de datos, las interfaces NHT y LMT se modelan utilizando SHERIFS. De esta manera, se pueden usar las tasas de deslizamiento variables a lo largo del rumbo en estas interfaces, al mismo tiempo que se permiten rupturas para conectar segmentos de las fallas que se deslizan a diferentes tasas. Además, estas interfaces están poco restringidas en relación con la trinchera PRT, que tiene una sismicidad poco frecuente que representa más una zona que una superficie; por lo tanto, sus tasas de ocurrencia no pueden restringirse usando solo observaciones de terremotos, y las fallas por sí mismas deben equilibrarse con la sismicidad fuera de falla modelada en el paso (3). Sin embargo, no se permitieron rupturas que conectan estas superficies de interfaz con las fallas corticales.

El paso (5) combina las fuentes y rupturas construidas en los pasos (3) y (4) para producir un solo modelo de fuente de la corteza que no "cuenta dos veces" ninguna de las sismicidades modeladas. Esto se hace dentro de SHERIFS usando adaptaciones ad-hoc en el código. Las fuentes puntuales del paso (3) con $M_w \geq 6.0$ se recortan en un polígono que delimita las fallas más una zona de amortiguamiento (que se muestra en la Figura 12), que indica los puntos en los que se deben equilibrar las fuentes. Además, dentro del SHERIFS se proporciona una sismicidad de falla a falla dependiente de la magnitud. Las proporciones dictan la porción de la sismicidad que se asigna a las fuentes tipo cometas y rupturas frente a las fuentes puntuales; las tasas o probabilidades para cada una se escalan consecuentemente.

En el paso (6), las incertidumbres epistémicas se introducen en los pasos (3) y (4) del flujo de trabajo usando un árbol lógico donde cada incertidumbre corresponde a un conjunto de ramas. Esto se hizo haciendo múltiples hipótesis o suposiciones sobre los siguientes parámetros inciertos utilizados para construir el modelo de fuente activa de la corteza superficial:

- Método de ponderación utilizado para suavizar la sismicidad distribuida (2)
- Tasa de deslizamiento en los sistemas de fallas de rumbo Oriental y Enriquillo-Plantain Garden (3)
- Relación escala-magnitud utilizada en SHERIFS (2)
- Relación de sismicidad en la falla y fuera de la falla (2)

Enfoque de suavizado: Cómo se mencionó en el paso (3), utilizamos dos enfoques diferentes para ponderar los terremotos observados al distribuir el momento sísmico en cada zona de fuente: ponderación uniforme de los terremotos y ponderación basada en la magnitud-completitud, como se muestra en la Figura 14. Una de las discrepancias notables entre los dos resultados es que, en la última, se da más peso a los terremotos observados recientemente que ocurrieron cerca de las fallas en la parte central de La Española, cerca de la frontera entre Haití y República Dominicana, una región con múltiples fallas según la base de datos del SGN. Los dos enfoques de suavizado se ponderaron por igual en el árbol lógico.

Tasa de deslizamiento de fallas: En un caso óptimo, la incertidumbre epistémica incluida aquí daría cuenta del rango completo de posibles tasas de deslizamiento para cada falla en la base de datos del SGN. Sin embargo, las fallas en el SGN representan múltiples sistemas de fallas en los que las tasas de deslizamiento de todas las fallas juntas acomodan la deformación que ocurre en la región. Por lo tanto, no es posible cambiar la tasa de deslizamiento de una falla sin volver a calcular las tasas de deslizamiento de una o más fallas en el sistema. Por lo tanto, para las fuentes de fallas, usamos un modelo primario con la tasa de deslizamiento 'preferida' para cada segmento de falla (como lo indica el SGN en la base de datos de fallas), y dos modelos alternativos en los que las tasas de los componentes sinestrales de dos de las estructuras significativas son variadas: al norte, la falla Oriente y la parte de la falla La Española con la que todavía es continua a lo largo del rumbo, y al sur, la falla Enriquillo-Plantain Garden y sus estructuras a lo largo del rumbo para el rango longitudinal cubierto por las estructuras del norte. Al este de aquí, el sistema es demasiado complejo y un mayor equilibrio de tasas requeriría un análisis exhaustivo.

La Tabla 8 enumera las estructuras involucradas y el componente sinistral preferido, mínimo y máximo de la tasa de deslizamiento. Las estructuras se agrupan por tramos en los que existe superposición longitudinal. El modelo primario utiliza la tasa de deslizamiento sinistral preferida para las fallas en todas las secciones, siguiendo el mismo estándar que todas las fallas del modelo. Para los modelos alternativos, la tasa de deslizamiento sinistral para cada falla se ajusta hacia el límite mínimo o máximo, y luego se aplica el cambio de tasa opuesto a las fallas correspondientes. Por ejemplo, cuando las tasas de deslizamiento de las estructuras del norte aumentan, las tasas de deslizamiento de las estructuras del sur disminuyen en la misma cantidad. En la mayoría de los casos, la magnitud del rango admitido no es igual entre los dos sistemas, por lo que en su lugar se utiliza el valor delta más pequeño entre "preferido" y "mínimo" o "preferido" y "máximo" para definir tasas alternativas. La única excepción es en la falla de Blue Mountain; el valor delta de 0.5 mm/año se ignoró al elegir el valor delta para esa parte del sistema.

Tabla 6. Fallas para las cuales se crearon rupturas usando SHERIFS. dir es la dirección de buzamiento de la falla y buzamiento es el ángulo de buzamiento en grados. slip_type es el sentido de movimiento en la falla. lsd y usd son las profundidades sismogénicas inferior y superior, respectivamente, en km. v_rl y v_ex es la velocidades lateral derecha/izquierda (negativo es izquierdo) y extensional/compresiva (negativo es compresivo) modeladas en las fallas, derivadas tomando los componentes correspondientes de la tasa de deslizamiento neta. La referencia indica la fuente de la información de falla. BRGM hace referencia al proyecto BRGM, DEV HISPALÉA 2014-2015.

Nombre	dip	dir	slip_type	lsd	usd	v_rl	v_ex	referencia
NHT-E	25.4	S	Inversa	40	0	5	0	Terrier-Sedan and Bertil, 2021
NHT-W	30	S	Inversa	50	0	6	0	Terrier-Sedan and Bertil, 2021
NHT-W-Fin	45	S	Inversa	50	0	4.3	0	Terrier-Sedan and Bertil, 2021
LMT-Centro Este-superficial	16.7	N	Inversa	6	0	4.6	0	Terrier-Sedan and Bertil, 2021
LMT-Centro Oeste-superficial	16.7	N	Inversa	7	0	6.2	0	Terrier-Sedan and Bertil, 2021
LMT-E	31	N	Inversa	40	0	0.8	0	Terrier-Sedan and Bertil, 2021
Falla Camú W	70	N	Sinistral	20	0	1	0	SGN
Falla Septentrional W	70	N	Sinistral	20	0	-8	0	Calais et al. 2016
FalLa Española 01	70	N	Sinistral	20	0	10	0	
San Juan-Restauración Falla Zona 01	70	N	Inversa	20	0	1.1	0	Benford 2012; Calais et al., 2016
Empuje frontal Peralta 01	70	N	Inversa-Sinistral	20	0	0.6	0	Benford 2012; Calais et al., 2016
Zona de Falla San Juan-Restauración 06	70	E	Inversa	20	0	1.8	2.5	
San Juan-Restauración Falla Zona 03	70	N	Inversa	20	0	0.2	0	
San Juan-Restauración Falla Zona 02	70	N	Inversa	20	0	0.2	0	
Falla Bonao-La Guacara Zona C	70	S	Inversa-Sinistral	20	0	0.4	0	SGN
Falla de Bonao	70	W	Inversa	20	0	0.4	0	SGN, BRGM/RP-65305-FR 2015
Falla Matheux 01	70	N	Inversa	20	0	1	0	Pubellier et al., 2000 Tectonics; Benford 2012; Calais et al., 2016
Falla Matheux 02	70	N	Inversa	20	0	1	0	Pubellier et al., 2000 Tectonics; Benford 2012; Calais et al., 2016
Falla Muertos-Punta Salinas	70	N		20	0	0.2	0	BRGM, 2015
Falla Batoruco Zona	70	S	Inversa	20	0	0.2	0	BRGM 2015
Falla Enriquillo 04	70	S	Sinistral	20	0	-7	4	Benford et al., 2012, Calais et al., 2010, Calais et al., 2016
FalLa Española 03	70	N	Sinistral	20	0	1	0	SGN
Falla septentrional C	70	N	Sinistral	20	0	-10	0	Calais et al. 2016
Falla de Vacama	70	E	Normal-Dextral	20	0	0.2	0	BRGM 2015
Falla del Río Yabón	70	W	Normal-Dextral	20	0	0.2	0	BRGM 2015
Falla Cuenca San Pedro	70	W	Normal	20	0	0.2	0	BRGM 2015

Nombre	dip	dir	slip_type	lsd	usd	v_rl	v_ex	referencia
FalLa Española-Sur	70	W	Normal-Dextral	20	0	0.1	0	BRGM 2015
FalLa Española-Norte	70	W	Normal-Dextral	20	0	0.1	0	BRGM 2015
Falla septentrional E	70	N	Sinistral	20	0	-10	0	Calais et al. 2016
Final de falla septentrional	70	N	Sinistral	20	0	-8	0	Calais et al. 2016
Falla Enriquillo 03	70	S	Sinistral	20	0	-7	4	Benford et al., 2012, Calais et al., 2010, Calais et al., 2016
Falla Enriquillo 01	70	S	Sinistral	20	0	-7	4	Benford et al., 2012, Calais et al., 2010, Calais et al., 2016
Falla Enriquillo 02	70	S	Sinistral	20	0	-7	4	Benford et al., 2012, Calais et al., 2010, Calais et al., 2016
Zona de falla San Juan-Restauración 05	70	N	Inversa	20	0	0.2	0	
Falla Neiba	70	N	Inversa	20	0	1	0	Saint Fleur et al., 2015 GRL; Calais et al., 2016
Falla Matheux 03	70	N	Inversa	20	0	1	0	Pubellier et al., 2000 Tectonics; Benford 2012; Calais et al., 2016
Empuje delantero de Peralta 03	70	N	Inversa	20	0	0.6	0	Benford 2012; Calais et al., 2016
Empuje delantero de Peralta 04	70	N	Inversa	20	0	1.8	2.5	Benford 2012; Calais et al., 2016
Falla Duanvale	60	S	Sinistral-Inversa	20	0	0.5	0	Mann et al., 2007
Falla Duanvale Este	60	S	Sinistral-Inversa	20	0	0.5	0	Mann et al., 2007
Falla del río Minho-Crawle	90	N	Sinistral	20	0	-5	1	Benford et al., 2015
Falla de los caballeros	90	N	Sinistral	20	0	-5	0	Benford et al., 2015
Falla de la montaña azul	60	NE	Inversa	20	0	2	2.6	Benford et al., 2012; Benford et al., 2015; Dominguez Gonzalez et al., 2015; Draper2008
Falla de la costa sur	90	N	Sinistral	20	0	2	0	Benford et al., 2012; Benford et al., 2015
Falla Enriquillo-Plantain Garden	90	S	Sinistral	20	0	3.2	0	Benford 2012
Falla de Oriente Este	90	N	Sinistral	20	0	8	0	Leroy et al., 2015 Terra Nova; Calais et al., 2016; Benford 2012
Santiago Cinturón Deformado W	70	N	Inversa	20	0	0	1.5	Benford 2012; Leroy et al., 2015 Terra Nova
Falla Oriente Oeste	90	N	Sinistral	20	0	6	0	Benford 2012, Leroy et al., 2015 Terra Nova
Falla de Plantain Garden	90	N	Sinistral	20	0	5	0	Benford et al., 2015; Koehler et al., 2013
Baconao B	60	NE	Normal	20	0	0.05	0	Magaz et al., 1997
Baconao A	60	NE	Normal	20	0	0.05	0	Magaz et al., 1997
Boniato	65	S	Normal	20	0	0.1	0	Magaz et al., 1997
Falla Cerro Goden	80	S	Sinistral	20	0	1	0	Mann et al., 2005
Zona de falla del Gran Sur de Puerto Rico	70		Sinistral	20	0	1	0	Mann et al., 2005

Nombre	dip	dir	slip_type	lsd	usd	v_rl	v_ex	referencia
Falla del Rift de Oeste Mona	60	E	Normal	20	0	0.2	-1.5	Benford 2012
Falla del Rift de Esta Mona	60	W	Normal	20	0	0.2	-1.5	Benford 2012
Falla del Rift de Oeste Yuma	60	E	Normal	20	0	0.15	-1.5	Hippolyte et al., 2005 GSA SP, Benford 2012
Falla del Rift de Este Yuma	60	W	Normal	20	0	0.15	-1.5	Hippolyte et al., 2005 GSA SP; Benford 2012
Anegada Rift	60	N	Normal	20	0	0	-0.5	Mann et al., 2005 GSA SP; Benford 2012
Falla de St. Croix	60	N	Normal	20	0	0	-0.5	Mann et al., 2005 GSA SP; Benford 2012
Zona de falla del Gran Norte de Puerto Rico	90	N	Sinistral	20	0	0.1	0	Jansma and Mattioli 2005
Zona de falla del Gran Norte de Puerto Rico	90	N	Sinistral	20	0	0.1	0	Jansma and Mattioli 2005
Zona de falla del Gran Norte de Puerto Rico	90	N	Sinistral	20	0	0.1	0	Jansma and Mattioli 2005
Zona de falla del Gran Norte de Puerto Rico	90	N	Sinistral	20	0	0.1	0	Jansma and Mattioli 2005
Camú Falla E	80	N	Sinistral	20	0	1	0	SGN
Falla Villa Vázquez	80	S	Sinistral	20	0	1	0	SGN, personal communication
Falla de Monte Cristi	80	N	Sinistral	20	0	1	0	CCA and SGN
Falla Bonao-La Guacara Zona E	45	S	Inversa-Sinistral	20	0	0.4	0	SGN
Falla Bonao-La Guacara Zona W	45	S	Inversa-Sinistral	20	0	0.4	0	SGN
Empuje frontal Peralta 02	45	N	Inversa-Sinistral	20	0	0.6	0	Benford 2012; Calais et al., 2016
Falla Española 02	80	N	Sinistral	20	0	1	0	SGN
Cinturón Deformado de Santiago E	70	N	Inversa	20	0	0	1.5	Benford 2012; Leroy et al., 2015 Terra Nova
Falla de Oriente Centro	90	N	Sinistral	20	0	6	0	Benford 2012, Leroy et al., 2015 Terra Nova
LMT-Centro Este-profundo_1	34	N	Inversa	40	6	0.92	0	Terrier-Sedan and Bertil (2021)
LMT-Centre West-dep_7	30	N	Inversa	40	7	1.24	0	Terrier-Sedan and Bertil (2021)

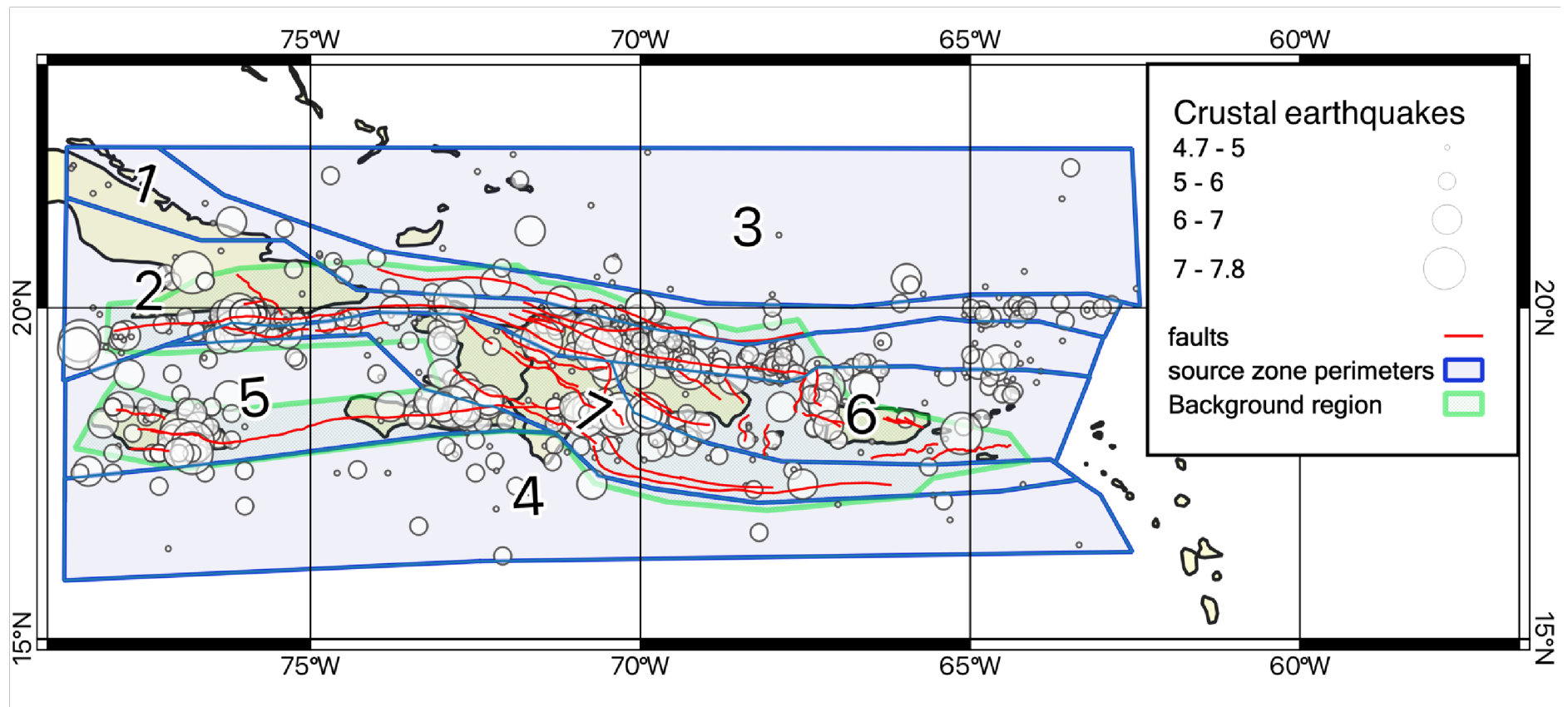


Figura 12. Zonas de origen (azul; etiquetadas para corresponder con la Tabla 5), fallas modeladas dentro de SHERIFS (rojo), terremotos clasificados como corticales (círculos blancos) con $M_w \geq 4.7$ y perímetro de recorte (verde; ver texto).

Tabla 7. Relaciones de sismicidad de falla intermitente. "Relación" indica la proporción de sismicidad en el rango de magnitud dado que se modela en las fallas.

Magnitud	Razón 1	Razón 2
6.0 – 6.5	0.8	0.7
6.5 – 7.0	0.9	0.8
7.0 – 7.5	1.0	0.9
7.5 – 8.0	1.0	1.0
8.0 - Mmax	1.0	1.0

Tabla 8. Fallas para las que se considera la incertidumbre epistémica en la componente sinistral. Las tasas de deslizamiento sinistral preferidas, mínimas y máximas enumeradas provienen de la base de datos del SGN. Las tasas de deslizamiento sinistral del modelo 1, modelo 2 y modelo 3 corresponden a los tres modelos considerados. El modelo 1 usa el deslizamiento 'preferido', el modelo 2 pone más deslizamiento en el sistema del norte y el modelo 3 pone más deslizamiento en las estructuras del sur.

Estructuras del Norte [nombre – (preferido, mínimo, máximo) tasa de deslizamiento sinistral en mm/año – sección]	Septentrional Estructuras [(modelo 1, modelo 2, modelo 3) tasa de deslizamiento sinistral en mm/año]	Estructuras del Sur [nombre – (preferido, mínimo, máximo) tasa de deslizamiento sinistral en mm/año – sección]	Meridional Estructuras [(modelo 1, modelo 2, modelo 3) tasa de deslizamiento sinistral en mm/año]
Falla Oriente Oeste – (6, 5, 14) – 1	(6, 8, 5)	Culpa de los Cavaliers – (5, 3, 7) – 1	(5, 3, 6)
Falla Oriente Centro – (6, 5, 14) – 2	(6, 7.2, 5)	Falla de la Montaña Azul (2, 1, 2.5) – 1	(2, 1, 2.5)
Falla Oriente Este – (8, 7, 14) – 3	(8, 9, 7)	Falla Plantain Garden – (5, 3, 7) – 1	(5, 3, 6)
Falla Española 01 – (10, 8, 12) – 4	(10, 11, 9)	Falla Enriquillo-Plantain Garden – (3.2, 2, 5) – 2	(3.2, 2.0, 4.2)
		Falla Enriquillo 01 – (7, 6, 8) – 3	(7, 6, 8)
		Falla Enriquillo 02 – (7, 6, 8) – 3	(7, 6, 8)
		Falla Enriquillo 03 – (7, 6, 8) – 4	(7, 6, 8)
		Falla Enriquillo 04 – (7, 6, 8) – 4	(7, 6, 8)

Relación de escala de magnitud: Utilizamos dos relaciones de escala de magnitud (MSRs) en SHERIFS para determinar la magnitud atribuible a cada sección de falla y ruptura de múltiples fallas: las relaciones empíricas de magnitud y área de Wells y Coppersmith (1994) y Leonard et al. (2010) (para la relación intraplaca). Los mismos MSR también se utilizan con las fuentes de falla para producir rupturas. Además de cambiar las geometrías de ruptura, los MSR también calculan diferentes valores de $M_{\max}$ para cada segmento, modificando las formas de la MFD y, por lo tanto, no incorporamos adicionalmente una rama formal de $M_{\max}$ del árbol lógico.

Relación de sismicidad de falla Intermitente: las tasas de ocurrencia de magnitudes de terremotos modeladas por fuentes de fallas y rupturas (M_w 6.0 y más grandes) deben ajustarse de manera que las ocurrencias en la sismicidad de fondo no sean un "conteo doble" de ninguna fuente. Esto es realizado usando la magnitud dependiente de la relación sísmica de falla intermitente como en el paso (5). Aquí, usamos dos conjuntos de relaciones, igualmente ponderadas en el árbol lógico, cambiando así la cantidad de sismicidad que fue modelada por las fallas versus la sismicidad distribuida. Esto modifica aún más las MFD utilizadas para definir ocurrencias en las fallas, así como la sismicidad distribuida circundante. Las relaciones se enumeran en la Tabla 7. Ambas hipótesis modelan la mayoría de la sismicidad $M_w > 6.0$ en las fallas, donde los modelos de Relación 2 atribuyen una pequeña cantidad más a la sismicidad distribuida, permitiendo que ocurran algunos terremotos de hasta M_w 7.5 en las fuentes distribuidas. Se utiliza una sola relación para todo el sistema de fallas, por lo que las hipótesis alternativas impactan en la extensión espacial total. Esta lógica agrega solo dos ramas al árbol lógico, en lugar de dos ramas por estructura.

El árbol lógico final para la caracterización de la fuente sísmica que utiliza la sismicidad distribuida y el flujo de trabajo SHERIFS incluye 24 ramas. La Figura 13 muestra dos ejemplos de cómo el árbol lógico se manifiesta para la MFD para una sola falla: la falla de los Muertos-Punta Salinas, que se encuentra frente a la costa sur de la República Dominicana, y el segmento 4 de la falla frontal de Peralta en la parte central de la isla. En ambos casos, la tasa de sismos de M_w 6.0 varía en un orden de magnitud, y la $M_{\max}$ varía.

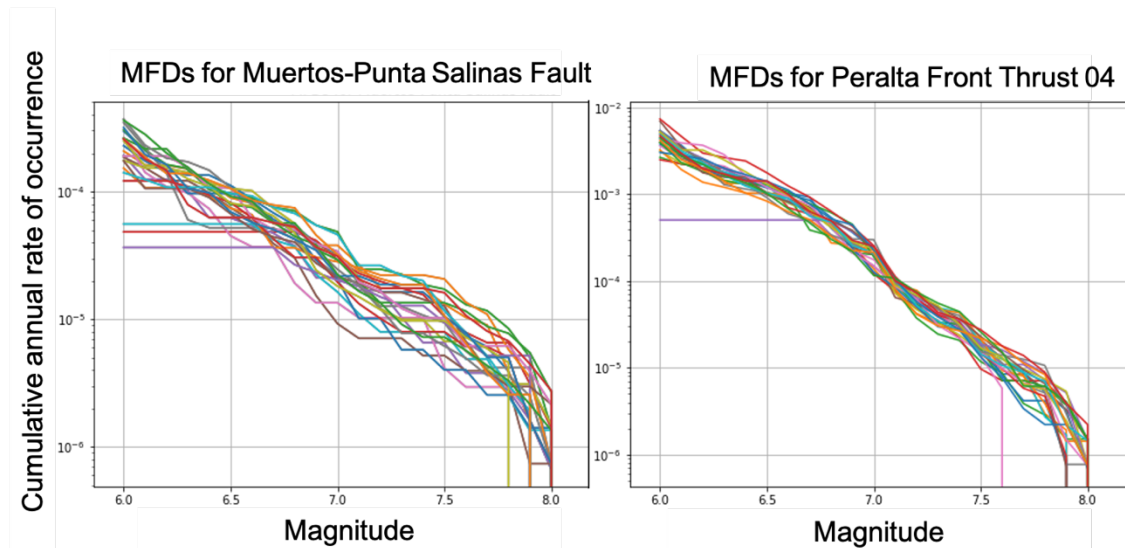


Figura 13. Las 24 MFD para (izquierda) la falla de los Muertos-Punta Salina y (derecha) la falla frontal de Peralta, segmento 04.

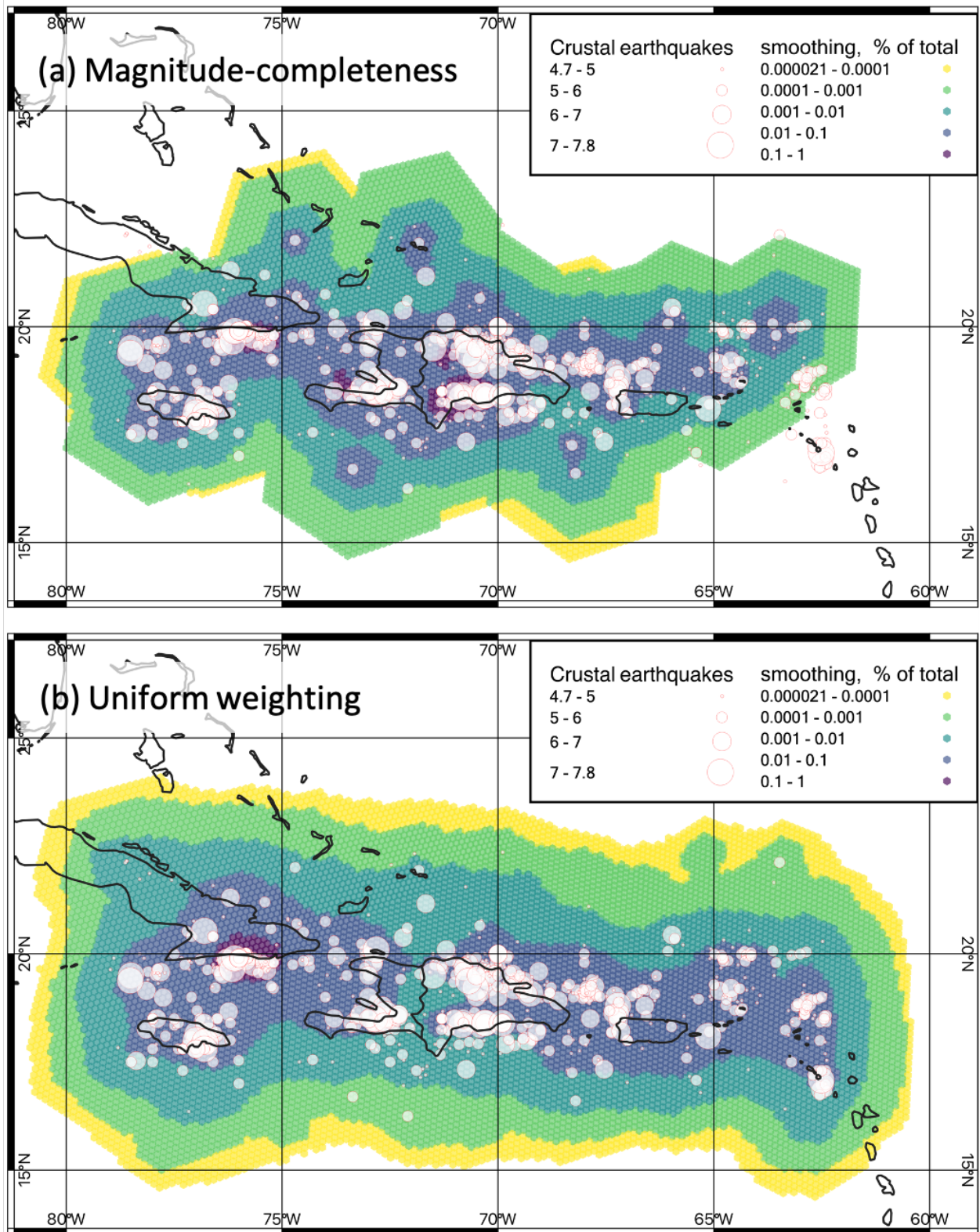


Figura 14. Enfoques de suavizado, que representan el peso aplicado espacialmente a las tasas de ocurrencia de fuentes puntuales (es decir, no las tasas de ocurrencia finales). (a) Magnitud-completitud. (b) Ponderación estándar y uniforme por terremoto

3.4 Validación y verificación del modelo fuentes

El modelo de fuentes sísmica debe validarse mediante la aplicación de verificaciones básicas y la confirmación de que el modelo es capaz de producir las observaciones sísmicas utilizadas para construir el mismo. Hacemos esto utilizando la herramienta "Hamlet" de GEM para evaluar cómo la sismicidad producida por el modelo se compara con el catálogo original, evaluando los tipos de regiones tectónicas independientes del modelo y las diferentes realizaciones (es decir, cada rama final del árbol lógico).

Hazard Model Evaluation and Testing (Hamlet) es una herramienta de Python que facilita pruebas cualitativas y cuantitativas para evaluar modelos de fuentes sísmicas desarrollados en análisis probabilísticos de la amenaza sísmica (PSHA). En la actualidad, los enfoques predominantes de Hamlet prueban retrospectivamente los modelos de ocurrencia de terremotos del caracterizados en las fuentes sísmicas contra el catálogo de terremotos utilizado en la preparación de modelo de fuentes, o prospectivamente contra registros más recientes u otros datos no utilizados para desarrollar el modelo. Estas pruebas incluyen enfoques basados en la probabilidad, como los de Regional Earthquake Likelihood Models (RELM) y Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP; por ejemplo, Schorlemmer et al., 2007, 2010; Zechar et al., 2010), así como métodos similares desarrollados por GEM junto con Hamlet, y otras comparaciones básicas del modelo como la $M_{\max}$ con la $M_{\max}$ observada.

Aquí, usamos la implementación de Hamlet para las siguientes pruebas:

- **Comprobación de magnitud máxima:** confirma que todos los rangos (*bins*) espaciales producen terremotos con magnitudes al menos tan grandes como las observadas
- **Prueba N** (versión modificada de Zechar et al., 2010): verifica si el número total de eventos observados con $M > M_{\min}$ (un umbral de magnitud inferior para la prueba, no necesariamente del modelo en sí) está dentro de un rango dado por un percentil especificado de la distribución de Poisson (el número pronosticado de eventos es la media de la distribución). La información de magnitud espacial y adicional se ignora.
- **Prueba M** (Zechar et al., 2010): compara la distribución de magnitudes y frecuencias (MFD) del catálogo de terremotos observados utilizados para producir el modelo con la MFD de conjuntos de eventos estocásticos con una longitud igual al catálogo generado muestreando el modelo fuente. El modelo "pasa" la prueba si el puntaje de probabilidad del modelo para las observaciones excede la probabilidad de algún percentil crítico de las simulaciones.
- **Prueba S** (Zechar et al., 2010): equivalente a la prueba M, pero prueba las frecuencias relativas observadas frente a las modelada de los terremotos usando rangos (*bins*) espaciales que cubren el dominio del modelo.

Hamlet funciona generando todas las rupturas que permite el modelo de origen y simula conjuntos de eventos basados en estas rupturas, agrupándolos en intervalos espaciales y de magnitud (Nota: la discretización espacial utiliza las mismas celdas H3 utilizadas por el OQ-MBTK para producir las fuentes superficiales de sismicidad distribuida en la corteza). Las observaciones del catálogo se agrupan de la misma manera y luego se ejecutan las pruebas para comparar los dos conjuntos. Para obtener más información sobre los detalles de las pruebas, ver Zechar et al. (2010) y el suplemento de Johnson et al. (2020).

Para todas las pruebas, utilizamos un único catálogo que combina todas las regiones tectónicas, combinando las versiones desagrupadas de cada una en un único catálogo. El catálogo se truncó a

un período de 40 años a partir de 1980, lo que corresponde a una integridad de M_w 5.5: el límite de menor magnitud en las fuentes intraplaca de subducción (las otras regiones tectónicas se extienden a magnitudes más bajas) y, por lo tanto, un M_{min} razonable para usar para las pruebas con Hamlet.

Aquí, probamos de forma independiente cada una de las 96 ramas finales del modelo de origen y utilizamos los siguientes parámetros de configuración:

- **Rango de magnitud:** M_w 5.5 – 8.5, agrupado por 0.2
- **Tiempo de investigación (todas las pruebas):** 40 años
- **Intervalo de confianza de la prueba N:** 95%
- **Percentil crítico de la prueba M:** 0.25
- **Percentil crítico de la prueba S:** 0.25
- **Número de iteraciones (todas las pruebas):** 1000

Las 96 ramas finales pasan la magnitud máxima, la prueba N y la prueba S, mientras que 87 pasan la prueba M. Las nueve ramas finales que no pasan la prueba M están muy cerca del percentil crítico (es decir, por encima de 0.237). Dado que los autores originales (Zechar et al., 2010) propusieron un umbral de 0.025, consideramos que los resultados de la prueba M de estas nueve ramas finales siguen mostrando un sólido rendimiento del modelo.

4 CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL TERRENO

La caracterización del movimiento del terreno (GMC) para el modelo DOM21 adopta la caracterización propuesta en el proyecto CCARA. Esto es defendible porque:

- La cobertura del modelo CCA incluye la República Dominicana y sus tres tipos de regiones tectónicas (corteza superficial activa, interfaz de subducción e intraplaca de subducción).
- La selección de las ecuaciones de atenuación (GMPEs) en CCA se realizó utilizando datos de las Antillas Menores y El Salvador. Al igual que las Antillas Menores, se ha observado una alta atenuación en Haití y en La Española (por ejemplo, Castro et al., 2003; McNamara et al., 2012).
- No se disponía de suficientes acelerogramas con nuevos movimientos fuertes del terreno como para repetir el análisis.

En CCARA, el GMC se realizó mediante un proceso de selección de GMPEs que utiliza el OpenQuake Strong Motion Toolkit (Weatherill, 2014). Los tres pasos principales fueron:

- (1) Preselección de un conjunto de GMPEs candidatos para cada entorno tectónico considerado, por ejemplo, Bommer et al., 2010 o Cotton et al., 2006.
- (2) Escalado comparativo de los GMPEs preseleccionados utilizando un conjunto de escenarios de ruptura con un rango de magnitudes y distancias de la fuente al sitio para varios parámetros de movimiento del terreno (es decir, el enfoque de diagrama de rejilla); y
- (3) Análisis residual para comparar los movimientos del suelo calculados por los GMPEs preseleccionados y los movimientos del suelo observados (es decir, valores máximos de registros de movimientos fuertes en las Antillas Menores y El Salvador) en el área de estudio (por ejemplo, Scherbaum et al., 2004).

En la selección final, se eligió un conjunto de GMPE (en lugar de uno solo) para cada región. Esto se debió en parte a la notable diferencia observada en la atenuación de los terremotos dentro de la placa en las Antillas Menores versus El Salvador, y respaldado por las observaciones de Douglas y Mohais (2009) de que la variabilidad del movimiento del terreno es mayor en las Antillas Menores de lo que se captura en cualquier GMPE individual. Por lo tanto, para la selección final, se seleccionaron modelos que predicen tanto por encima como por debajo los movimientos del suelo observados en cada una de las regiones tectónicas. Los GMPE y sus árboles lógicos se muestran en la Tabla 9.

En particular, se han desarrollado varios GMPE recientes aplicables a los tipos de regiones tectónicas en DOM21 desde el proyecto CCARA. Durante la primera fase del proyecto TREQ dentro de la cual se completó el modelo DOM21, estos aún no se habían implementado en OpenQuake Engine y, por lo tanto, no podría incluirse fácilmente en el GMC. Sin embargo, estos GMPE ahora están disponibles y, por lo tanto, revisamos la selección de los GMPE y la actualizamos para las regiones entre placas e intraplaca de subducción incluyendo uno más nuevo, Parker et al. (2020). En ambos casos se reemplazó el GMPE más antigua, tanto por su desactualización como por que Parker et al. (2020) mantiene la media y rango de predicción de la intensidad del CCA GMC.

Tabla 9. Ecuaciones de atenuación del movimiento del terreno (GMPE) y pesos utilizados en el modelo DOM21.

Interfaz de subducción	Peso
AbrahamsonEtAl2015SInter	0.33
ZhaoEtAl2006SInter	0.33
ParkerEtAl2020SInter	0.34
Subducción intraplaca	Peso
AbrahamsonEtAl2015SSlab	0.33
ParkerEtAl2020SSlab	0.33
Kanno2006Profundo	0.34
Corteza superficial activa	Peso
AkkarEtAlRjb2014	0.33
CauzziEtAl2014	0.33
AbrahamsonEtAl2014	0.34

5 CÁLCULO PROBABILÍSTICO DE LA AMENAZA SÍSMICA (PSHA) Y PRINCIPALES RESULTADOS

Utilizamos el software OpenQuake engine (Pagani et al., 2014) para calcular los resultados clásicos de PSHA que cubren la isla de La Española, y con más detalle para algunas de las ciudades más grandes de la República Dominicana. Los resultados incluyen:

- **Curvas de amenaza:**
 - En roca ($v_{s,30} = 800$ m/s) y para las condiciones del suelo ($v_{s,30}$ calculado a partir de la topografía utilizando Allen y Wald (2007))
 - Medidas de intensidad para la aceleración pico efectiva (PGA) y la aceleración espectral (SA) con períodos $T=0.1, 0.2, 0.5, 1.0$ y 2.0 segundos
 - media, realizaciones individuales (es decir, ramas finales del árbol lógico), y los cuantiles 16th y 84th
- **Mapas de amenaza:**
 - media de PGA y SA con períodos $T = 0.1, 0.2, 0.5, 1.0$ y 2.0 segundos en roca y para las condiciones del suelo
 - calculado para probabilidades de excedencia (PDE) del 2% y 10% en 50 años, equivalentes a períodos de retorno de 2475 y 475 años, respectivamente
- **Espectros de amenaza uniformes:**
 - valores medios y cuantiles de 16th y 84th
 - en roca y para las condiciones del suelo
 - calculado para PDE de 2% y 10% en 50 años
- **Desagregación de amenazas sísmicas:**
 - para Santiago de los Caballeros y Santo Domingo
 - para (1) magnitud, distancia y épsilon de las GMPE y (2) latitud, longitud y tipo de región tectónica
 - en roca para un 10% de PDE en 50 años

Aquí presentamos un subconjunto de estos resultados, centrándonos especialmente en aquellos que son de interés para el proyecto TREQ.

5.1 Curvas de amenaza, mapas y espectros de amenaza uniformes

La Figura 15, la Figura 16 y la Figura 17 muestran los mapas de amenaza para PGA, SA (0.2 s) y SA (1.0 s), respectivamente, calculados en roca para una PDE del 10 % y 2 % en 50 años. En todos los casos, la amenaza es más alta cerca de las fallas corticales que se mueven más rápido: la falla Septentrional en el norte de la República Dominicana y el sistema de fallas Enriquillo-Plantain Garden que divide la península en el suroeste de Haití. A lo largo de estas fallas, el PGA alcanza 0.6 – 0.8 g y 1.2 – 1.7 g con 10 % y 2 % de PDE, respectivamente, en 50 años. Lejos de las fallas principales, la amenaza es menor pero persistente. PGA excede 0.2 y 0.4g para el 10% y 2% PDE, respectivamente, en 50 años en la mayor parte de la isla. La amenaza más baja se encuentra en el centro-oeste de Haití. Estos patrones persisten para SA(0.2s) y SA(1.0s). Los niveles de medición de intensidad más altos (IML) se calculan para SA(0.2 s), superando los 3.0 g a lo largo de las fallas con 2% de PDE en 50 años.

La Figura 18 muestra las curvas de amenaza para cuatro ciudades principales de la República Dominicana: Santo Domingo (la capital), Santiago de los Caballeros (en adelante también llamada "Santiago"), Bonao y Bani, y Puerto Príncipe, la capital de Haití. Esta representación muestra cómo la amenaza relativa entre las ciudades varía en función de la probabilidad de excedencia considerada (es decir, el período de retorno de los niveles de intensidad). Las curvas de amenaza son los valores medios para seis tipos de medidas de intensidad (IMTs) calculadas en roca como referencia. Para todas las intensidades las PDE anuales para niveles de intensidad muy bajos son comparables en todas las ciudades excepto Puerto Príncipe, para la cual las PDE son ligeramente más bajas, que se puede observar es cerca de donde los mapas de amenazas muestran la mayor amenaza. Por otro lado, para las dos PDE indicadas en las figuras, los niveles de intensidad son más altos en aquí y en Santiago. Esto sugiere una contribución significativa de los terremotos infrecuentes de magnitud moderada a alta en las fallas corticales cercanas (descritas con los mapas de amenaza) a la amenaza calculada para estas PDE.

La Figura 19 muestra los espectros uniformes de amenaza derivados para cada ciudad y los períodos de retorno indicados en la Figura 18, y la Tabla 10 enumera los valores en cada punto muestreado; estos son complementarios a la Figura 18 y representan cómo los niveles de amenaza en un sitio varían para edificios con diferentes períodos de vibración. En general, estos son consistentes con las curvas de amenaza y demuestran que, para todos los períodos de vibración, los niveles esperados de sacudidas son más altos en Santiago y Puerto Príncipe.

Tabla 10. Niveles de medida de intensidad media (g) calculados en roca para PGA y cinco períodos espectrales para el 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años.

Ciudad	PGA (g) 10%/2%	SA(0.1) g 10%/2%	SA(0.2) g 10%/2%	SA(0.5) (g) 10%/2%	SA(1.0) (g) 10%/2%	SA(2.0) (g) 10%/2%
Santiago de los Caballeros (RD)	0.51/0.99	1.11/2.21	1.10/2.19	0.61/1.26	0.33/0.70	0.16/0.35
Puerto Príncipe (HA)	0.54/1.20	1.19/2.81	1.12/2.55	0.57/1.32	0.29/0.68	0.14/0.33
Santo Domingo (RD)	0.26/0.53	0.63/1.25	0.58/1.13	0.30/0.60	0.16/0.31	0.08/0.15
Bonao (RD)	0.29/0.55	0.68/1.32	0.62/1.20	0.34/0.66	0.18/0.37	0.09/0.158
Bani (RD)	0.32/0.62	0.77/1.55	0.69/1.35	0.33/0.66	0.17/0.33	0.08/0.16

Los resultados mostrados hasta ahora han representado la amenaza media, es decir, un único resultado promedio ponderado de los árboles lógicos de los modelos de movimiento del terreno y fuentes sísmicas completas. Sin embargo, también es importante revisar el rango completo de valores permitidos por los modelos de entrada. La Figura 20 muestra las curvas de amenaza de PGA en roca para cada rama final del árbol lógico (es decir, una "realización") para la ciudad de Santiago (70.6931°O, 19.4792°N), así como el promedio de PGA calculado a partir del promedio ponderado de cada realización. La figura revela que el PGA con el 10% de PDE en 50 años abarca >0.2 g alrededor del valor medio de 0.6 g y ~0.5 g para el 2% de PDE en 50 años alrededor del valor medio de 1.2 g. Además, la distribución de valores de amenaza del 2% de PDE en 50 años es bimodal, lo que indica que una incertidumbre epistémica, muy probablemente el esquema de ponderación utilizado para construir las fuentes de sismicidad distribuida, está teniendo un impacto significativo en la amenaza.

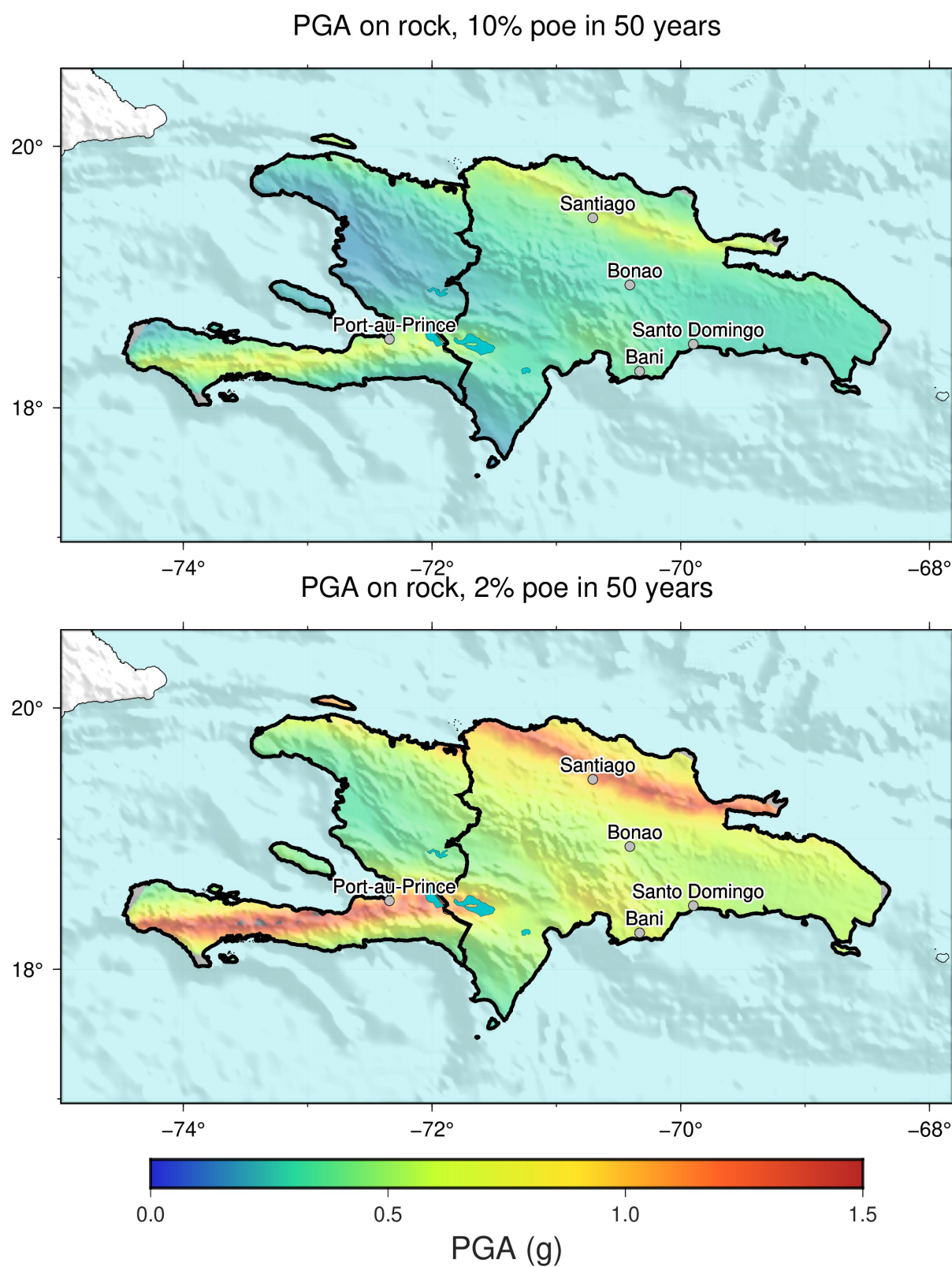


Figura 15. Mapa de amenaza sísmica de la aceleración pico efectiva del terreno (PGA) media, calculada para (arriba) 10% de probabilidad de excedencia y (abajo) 2% de probabilidad de excedencia en 50 años.

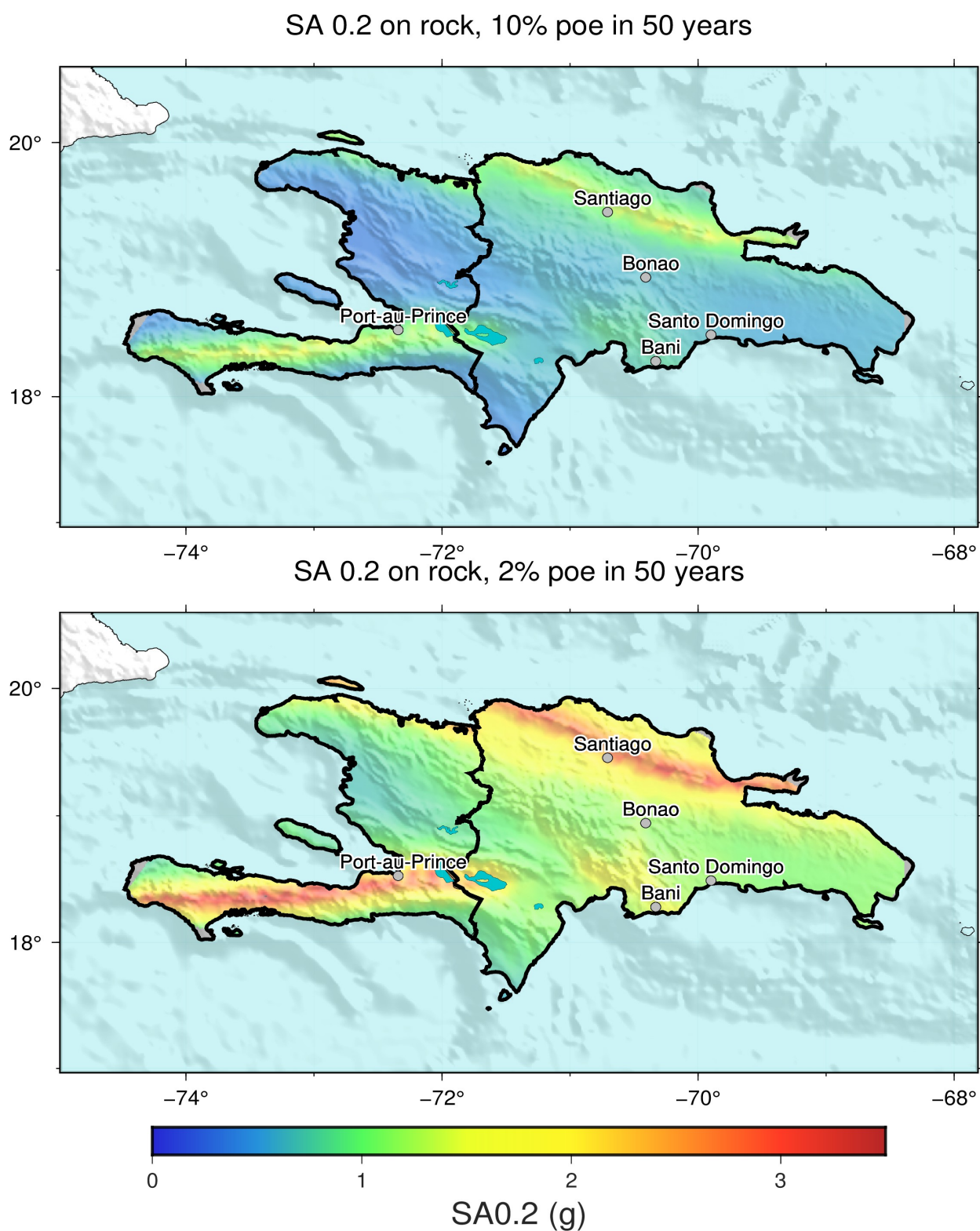


Figura 16. Mapa de amenaza sísmica de aceleración espectral (SA) con período $T=0.2$ segundos calculado para (arriba) 10% de probabilidad de excedencia y (abajo) 2% de probabilidad de excedencia en 50 años.

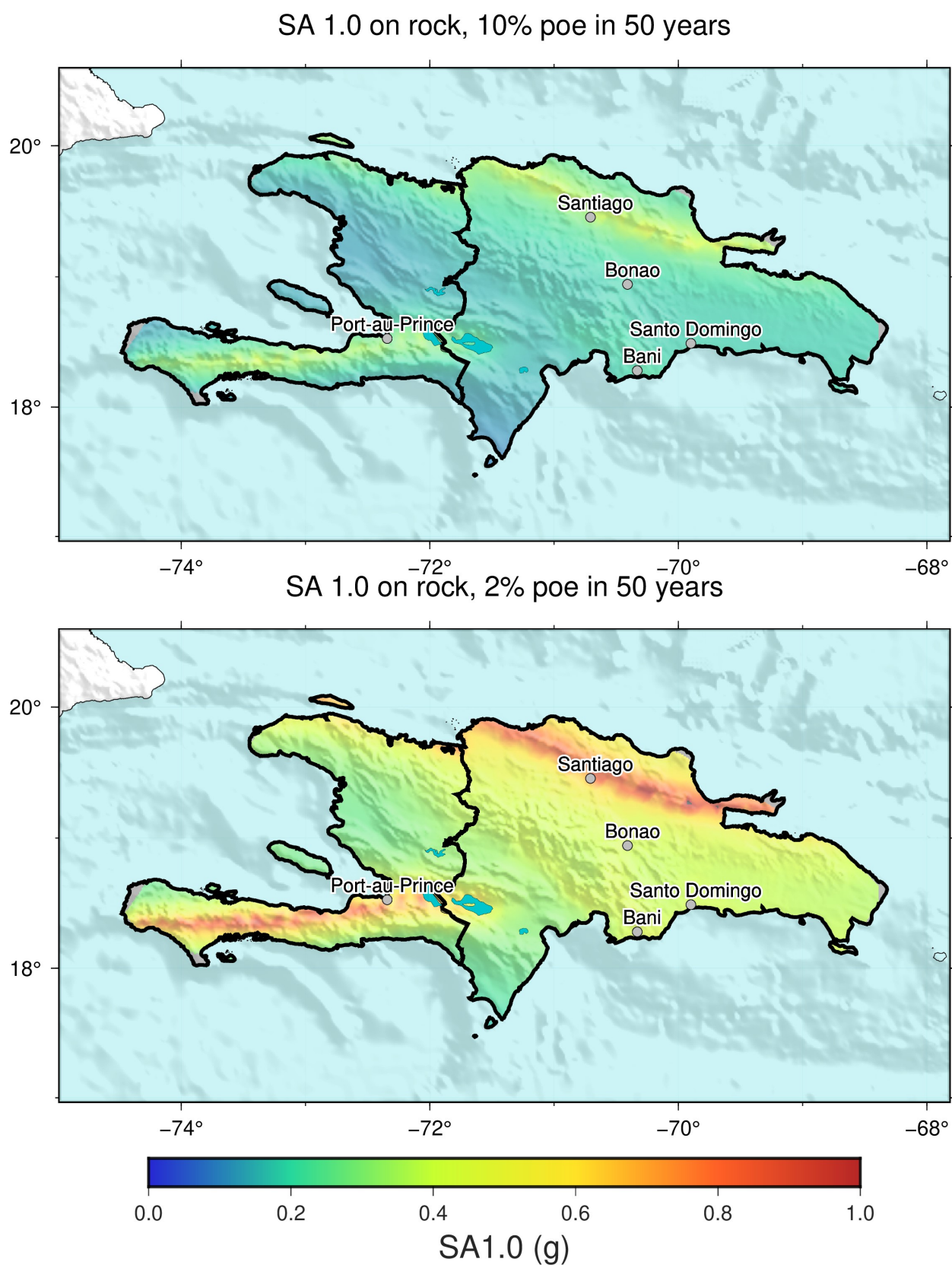


Figura 17. Mapa de amenaza sísmica de aceleración espectral (SA) con período $T=1.0$ segundo calculado para (arriba) 10% de probabilidad de excedencia y (abajo) 2% de probabilidad de excedencia en 50 años.

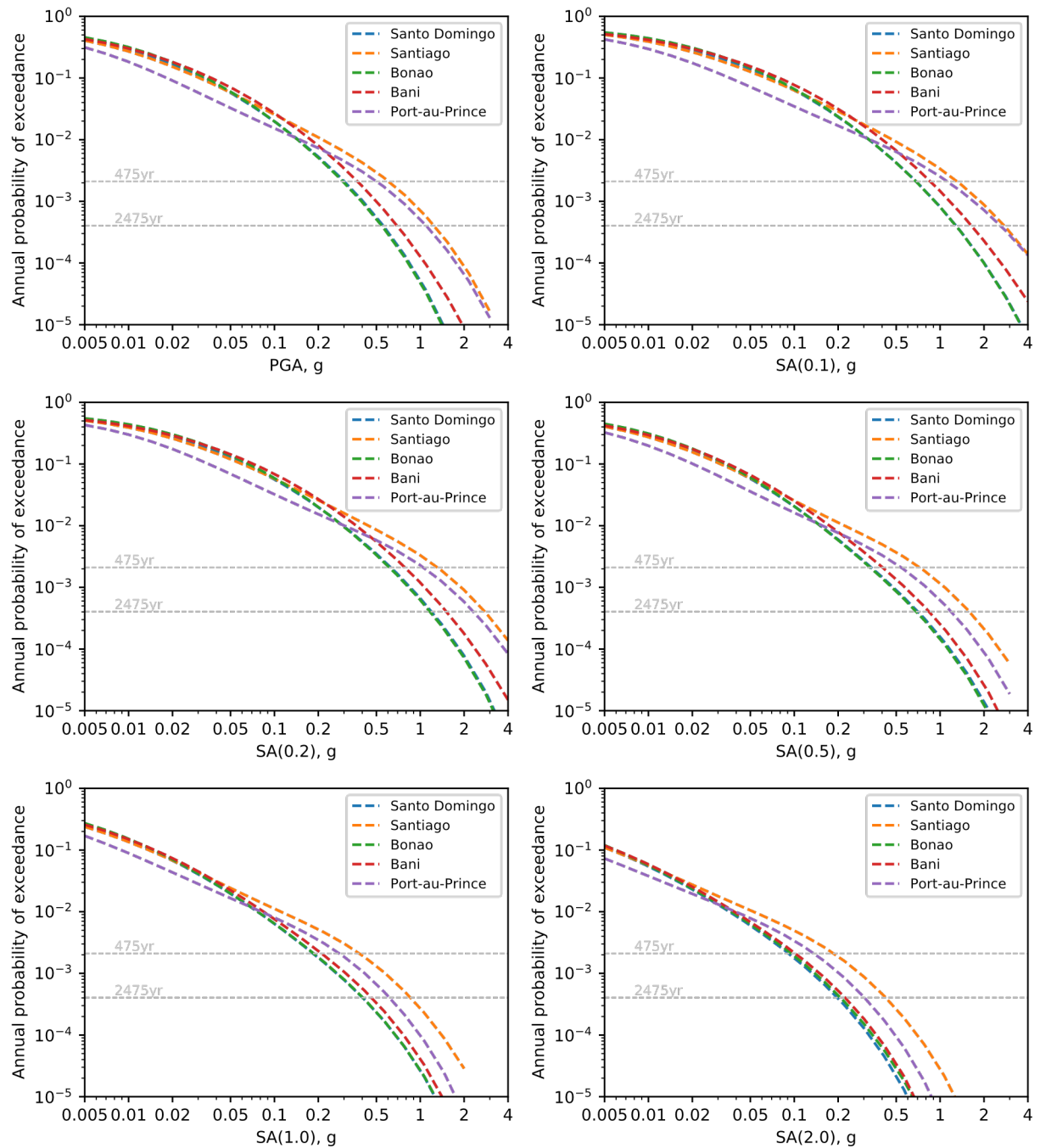


Figura 18. Curvas de amenaza sísmica para las principales ciudades de la República Dominicana y Puerto Príncipe, Haití. Los tipos de medidas de intensidad se indican en el eje x e incluyen PGA y aceleraciones espectrales con el período especificado. Todos los gráficos muestran la amenaza media calculado para las condiciones en roca. Las líneas grises discontinuas muestran los periodos de retorno de 475 y 2475 años, correspondientes al 10% y 2% de PDE en 50 años, respectivamente. Nota: en la mayoría de los casos, las curvas de amenaza de Santo Domingo y Bonao son muy similares, y una está oculta a la vista por la otra.

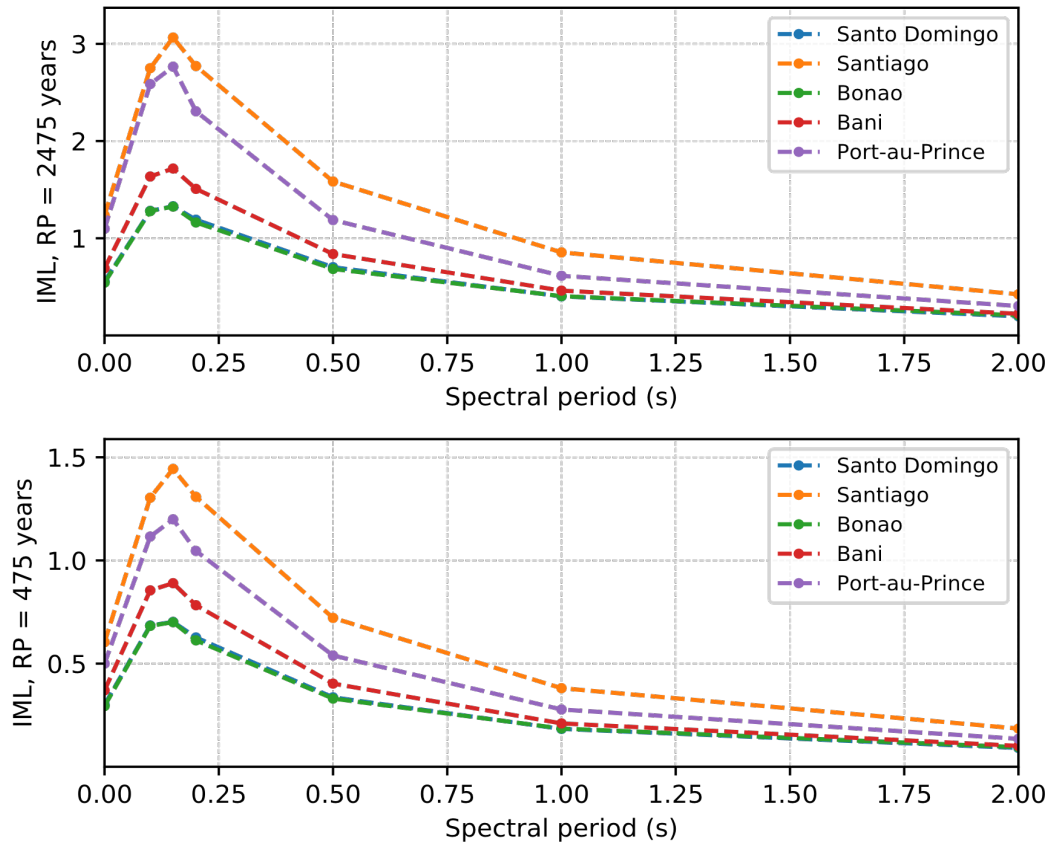


Figura 19. Espectros uniformes de amenaza (UHS) (promedio en roca) para las principales ciudades en (arriba) 2475 años y (abajo) 475 años. Nota: en la mayoría de los casos, las curvas de amenaza de Santo Domingo y Bonao son muy similares, y una está oculta a la vista por la otra.

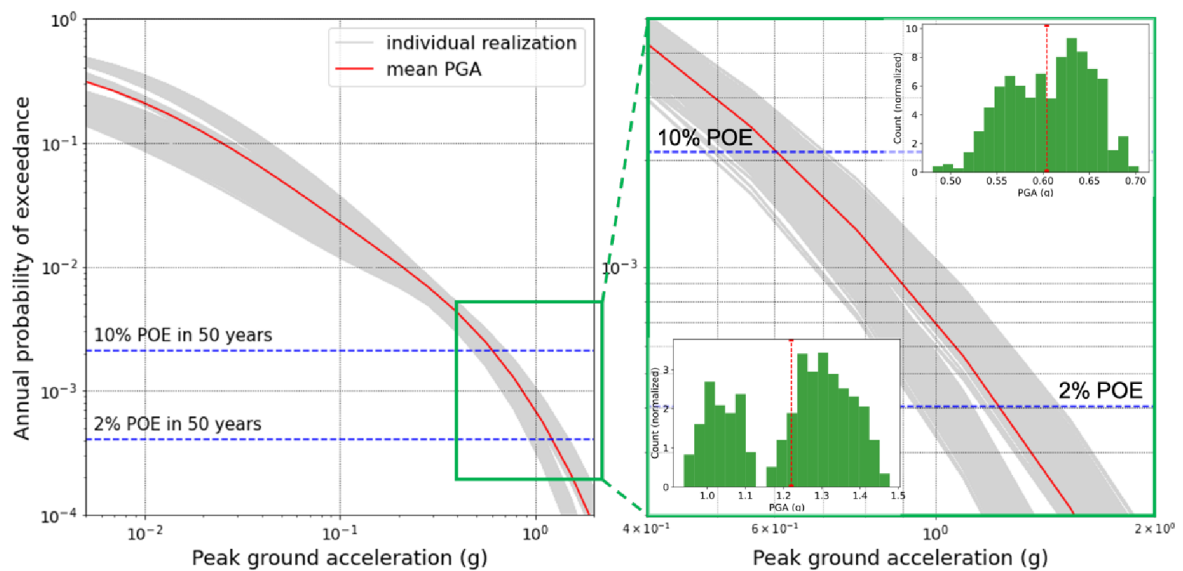


Figura 20. Rango de valores de PGA calculados en roca para Santiago de los Caballeros. Izquierda: curvas de amenaza en PGA para las realizaciones individuales (gris) en comparación con la media (rojo). Las líneas discontinuas azules indican el 10 % y el 2 % de PDE en 50 años. Derecha: como se muestra a la izquierda, pero ampliada en el área del gráfico cubierta por el cuadro verde para mostrar mejor el rango de curvas de amenaza permisible por el modelo. Los histogramas muestran el recuento normalizado de valores de amenaza para 20 rangos que abarcan la distribución total de PGA de cada PDE (verde), sin tener en cuenta el peso de cada realización, y la media de PGA (rojo).

5.2 Desagregación

La desagregación de la amenaza sísmica revela qué combinaciones de variables explicativas (por ejemplo, magnitud y distancia) contribuyen más al nivel del parámetro de movimiento del terreno en un sitio para una intensidad dada y una PDE específicas. En otras palabras, la desagregación indica qué fuentes, agrupadas por sus parámetros de control, controlan la amenaza para un período de retorno determinado. Aquí, desagregamos la amenaza siguiendo a Pagani y Marcellini (2007) en términos de PGA para el 10 % y 2 % de PDE en 50 años para las ciudades de Santiago y Santo Domingo en términos de: (1) posición (rangos de latitud y longitud) y tipo de región tectónica; y (2) magnitud, distancia y épsilon GMPE.

La Figura 21 muestra los resultados de desagregación para Santiago, revelando que la amenaza para PGA en ambos períodos de retorno (10% y 2% en 50 años correspondientes a 475 y 2475 años) está dominada por fuentes cercanas de la corteza superficial activa (ASC) con pequeñas contribuciones de la interfaz de subducción. En particular, las fuentes de corteza superficial activa a menos de 25 km de Santiago y con $M_w \sim 6.5-8.0$ dominan la amenaza, mientras que aquellas tan cercanas con $M_w \sim 6.0-6.5$ o más distantes (pero aún dentro de los 50 km) de $M_w > 8.0$ también contribuyen. Con un 2% en 50 años, el impacto de la variable aleatoria de las GMPE es claro, ya que todas las contribuciones tienen valores positivos grandes (en relación con el rango) de épsilon. De los resultados, inferimos que la falla Septentrional y su falla asociada controlan la amenaza de movimiento del terreno en Santiago para los períodos de retorno de interés. Las contribuciones de la interfaz de subducción provienen de la Trincherla La Española Norte y pueden tener un mayor impacto cuando se desagregan para otros tipos de medidas de intensidad (es decir, períodos más largos).

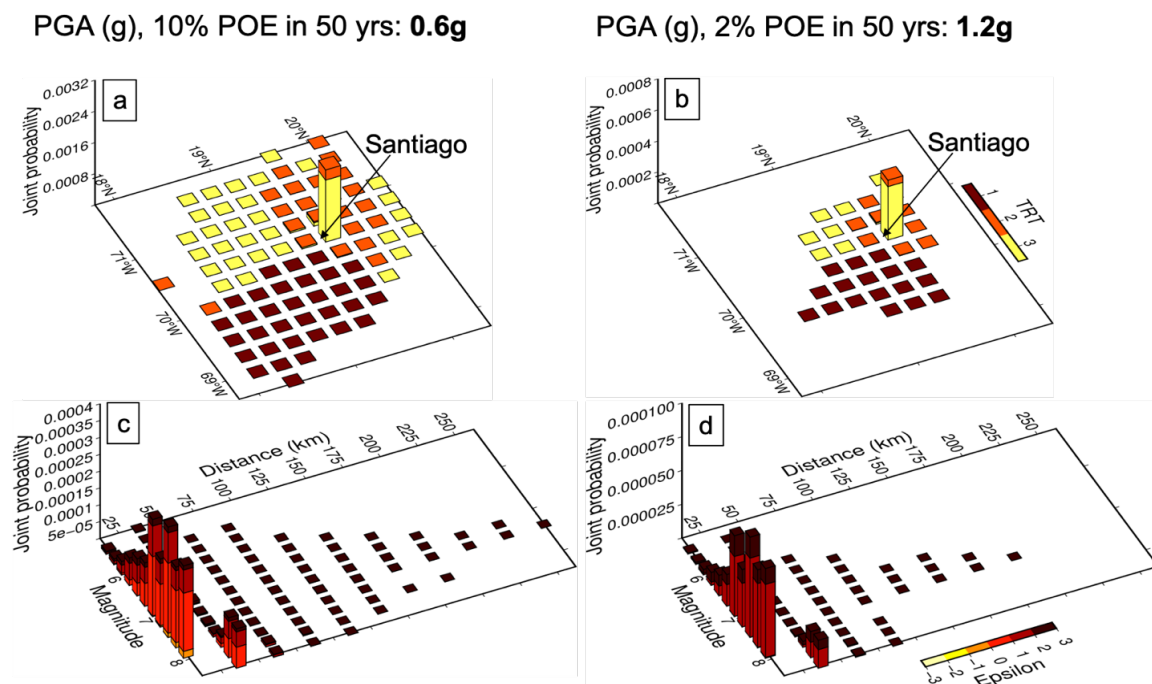


Figura 21. Desagregación de PGA medio en roca para Santiago, 10% y 2% de PDE en 50 años (a,c y b,d, respectivamente). (a) y (b) están desagregados por latitud, longitud y tipo de región tectónica (TRT). Solo se grafican las contribuciones agrupadas con probabilidades conjuntas $> 1E-16$. TRT: 1 (marrón) = subducción intraplaca, 2 (rojo) = interfaz de subducción y 3 (amarillo) = corteza superficial activa. (c) y (d) están desagregados por magnitud, distancia y épsilon (el término entre eventos de las GMPE).

La Figura 22 y la Figura 23 muestran los resultados de la desagregación para Santo Domingo. Santo Domingo se encuentra en una posición única muy cerca de varias estructuras en la corteza superficial activa, así como de dos de las tres zonas de subducción incluidas en el presente modelo: la Trincheras de Los Muertos en el sur y la Trincheras La Española Norte en el norte, la última de las cuales incluye fuentes tanto de interfase como de intraplaca. Algunos rangos espaciales incluyen las tres regiones tectónicas y, de hecho, las tres contribuyen a la amenaza del movimiento del terreno observado en Santo Domingo en el 10% y el 2% de PDE en 50 años, siendo la corteza superficial activa la que más contribuye. Sin embargo, como en Santiago, es probable que las contribuciones relativas de las tres regiones cambien para otros tipos de medidas de intensidad. La desagregación por magnitud, distancia y GMPE epsilon también muestra contribuciones de amplios rangos de parámetros. Las fuentes con magnitudes M_w 5.0–6.0 dentro de 50 km contribuyen más a la amenaza y son seguidas por rupturas más grandes ($M_w > 8.0$; fuentes de interfaz de subducción) entre 50 y 100 km de Santo Domingo. Los terremotos de $M_w \sim 6.5$ –7.5 provenientes de ambos tipos de fuentes de subducción continúan teniendo contribuciones notables más allá de los 100 km. Los patrones principales persisten tanto para el 10% como para el 2% en 50 años, pero, al igual que para Santiago, la mayor contribución proviene de los valores más altos de epsilon para el 2% en 50 años.

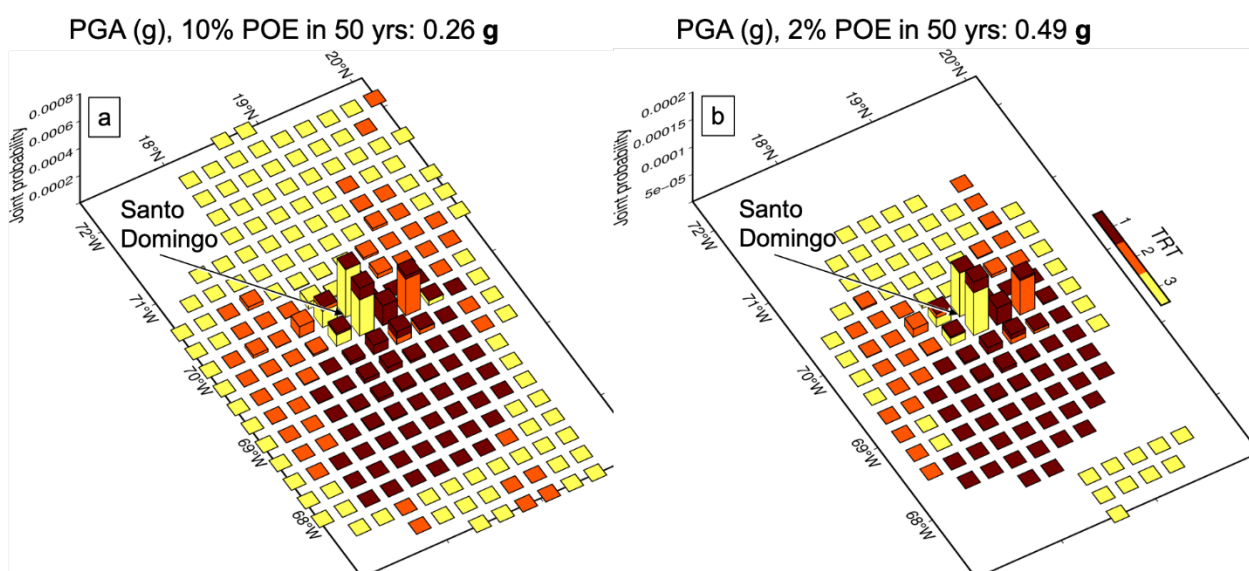


Figura 22. Desagregación de PGA medio en roca para Santo Domingo, (a) 10% y (b) 2% de PDE en 50 años. La desagregación es por latitud, longitud y tipo de región tectónica (TRT). Solo se grafican las contribuciones agrupadas con probabilidades conjuntas $> 1E-16$. TRT: 1 (marrón) = subducción intraplaca, 2 (rojo) = interfaz de subducción y 3 (amarillo) = corteza superficial activa.

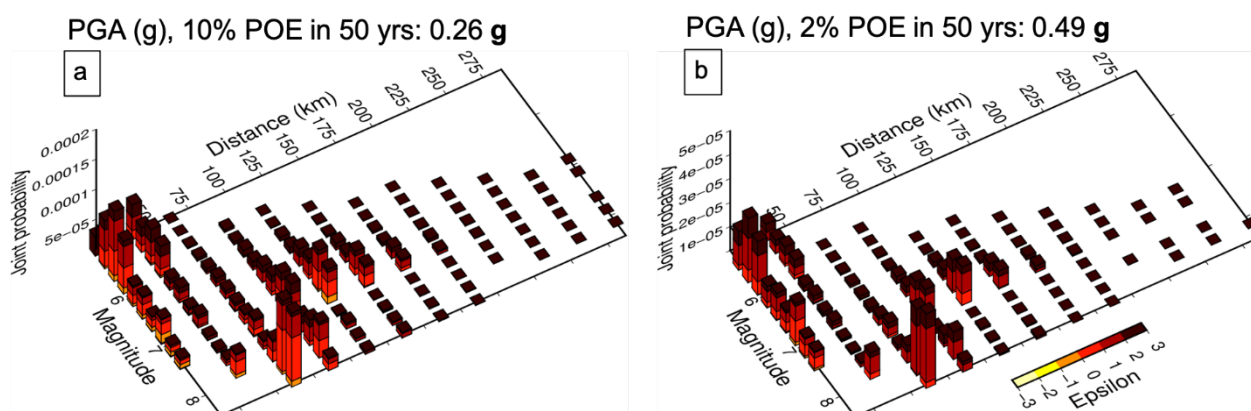


Figura 23. Desagregación de PGA medio en roca para Santo Domingo, (a) 10% y (b) 2% de PDE en 50 años. La desagregación es por magnitud, distancia y épsilon (el término entre eventos de las GMPE). Solo se grafican las contribuciones agrupadas con probabilidades conjuntas $> 1E-16$.

6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

6.1 Comparación con modelos anteriores

En la introducción, describimos varios trabajos anteriores que han estudiado la amenaza sísmica en La Española. En esta sección, comparamos los resultados del presente modelo con la amenaza calculada a partir de la cobertura superpuesta de cuatro estudios anteriores: el modelo CCARA actualizado de GEM que cubre el Caribe y América Central, el modelo de Frankel et al., (2011) que cubre Haití y partes de la República Dominicana y las microzonificaciones que cubren a Santiago (Bertil et al., 2010) y a Santo Domingo (Bertil et al., 2015).

6.1.1 CCARA

Una versión actualizada del modelo de PSHA resultante del Proyecto de Amenaza y Riesgos del Caribe y América Central (CCARA) cubre a La Española en el Mosaico de amenazas Globales de GEM (Pagani et al., 2020b). En esta referencia, la versión actualizada del modelo se denomina CCA. Este modelo brinda una cobertura geográfica completa de La Española, pero no incluye incertidumbres epistémicas en el modelo de fuentes. Debido a que GEM lideró el desarrollo del modelo CCA, se puede comparar más fácilmente con el modelo actual (denominado aquí DOM21) para La Española.

Realizamos detalladas comparaciones sobre las diferencias observadas en los patrones espaciales entre CCA y DOM21, concentrándonos en la PGA media en roca para el 10 % de PDE en 50 años (aquí denominado "amenaza"). La amenaza es en general mayor para CCA; por ejemplo, en el extremo este de La Española y, en general, a lo largo de la costa sur de la República Dominicana, la amenaza de CCA supera la amenaza de DOM21 en ~ 0.2 g (por ejemplo, 0.2-0.4 g para DOM21 frente a 0.35-0.55 g para CCA), aumentando a una discrepancia de casi 0.3 g en el centro-oeste de Haití. Por otro lado, la amenaza cerca de algunas fallas es mayor en el modelo DOM21. A lo largo de la falla Septentrional, el modelo CCA muestra valores máximos comparables a los de DOM21, pero para DOM21 los valores que oscilan entre ~ 0.5 y 0.7 cubren una franja más grande: puntos en los que CCA calcula valores tan bajos como

~0.45 g. La discrepancia a lo largo del sistema de fallas Enriquillo-Plantain Garden es similar. Los mismos patrones espaciales persisten para la PGA media en roca con 2 % de PDE en 50 años, con diferencias entre DOM21 y CCA que aumentan a ~0.4 g.

Acercándonos a Santiago y Santo Domingo podemos observar con más detalle otras métricas de amenaza. La Figura 24 muestra el espectro uniforme de respuesta (UHS) para Santiago y Santo Domingo, comparando el PGA promedio de DOM21 y los cuantiles 84th y 16th para el 10% y 2% de PDE con el de CCA. Recordemos que los resultados de la desagregación de Santiago se encuentran cerca de la falla Septentrional, y que esta falla, así como la sismicidad de la corteza, controlan la amenaza. Sin embargo, Santiago está lo suficientemente lejos de la falla en sí como para acercarse a la región geográfica donde CCA muestra mayor amenaza que DOM21. Por lo tanto, los niveles medios de medición de la intensidad de los dos modelos son cercanos (en su mayoría dentro del ~10%) para los resultados de PDE del 10% en 50 años, y divergen solo un poco más para la PDE del 2% en 50 años. Los resultados de CCA están dentro de los cuantiles 84th y 16th de DOM21, excepto para el período $T = 2.0$ segundos. CCA muestra valores medios más altos para los períodos más cortos ($T < 0.5s$), mientras que DOM21 muestra valores más altos en períodos más largos. Por otro lado, Santo Domingo se encuentra en la costa sur de la República Dominicana, donde los patrones espaciales de PGA muestran que la amenaza en DOM21 es mucho menor que en CCA. Esto es consistente en todos los períodos espectrales y ambos períodos de retorno, y en todos los casos los valores de CCA están fuera del cuantil 84th para DOM21. A menudo, los valores de CCA para el 10% de PDE en 50 años están más cerca de los valores de DOM21 para el 2% de PDE en 50 años.

Las razones de las discrepancias entre los dos modelos resultan de la caracterización de las fuentes sísmicas (SSC), ya que la caracterización del movimiento del terreno utilizada para ambos modelos es la misma. Algunos aspectos de la caracterización en CCA son similares al enfoque de modelado de fuentes utilizado en DOM21. Por ejemplo, algunas de las zonas de subducción en ambos modelos de entrada utilizan la clasificación del catálogo y el enfoque de modelado de fuentes de subducción de Paganí et al., (2020a), y la sismicidad de la corteza superficial activa se modela mediante una combinación de sismicidad distribuida (fuentes puntuales con tasas suavizadas) y fallas. Sin embargo, el modelo DOM21 pudo incorporar catálogos de terremotos y datos de fallas activas más recientes y completos que los de CCA; utilizó el enfoque SHERIFS, un enfoque más avanzado para modelar fallas; y explicó algunas de las incertidumbres epistémicas en las fuentes, tasas y distribución de la sismicidad. Además, el modelo DOM21 suavizó las tasas de sismicidad dentro de la placa en función de ocurrencias pasadas, mientras que el modelo CCA usó tasas uniformes en todo el volumen de la placa. Se recuerda que de los resultados de desagregación sísmica en Santo Domingo todos los tipos de regiones tectónicas contribuyen a la amenaza, consecuentemente las tasas uniformes de sismicidad habrían modelado más sismicidad dentro de la placa en los rangos espaciales subyacentes a Santo Domingo, aumentando la amenaza calculada.

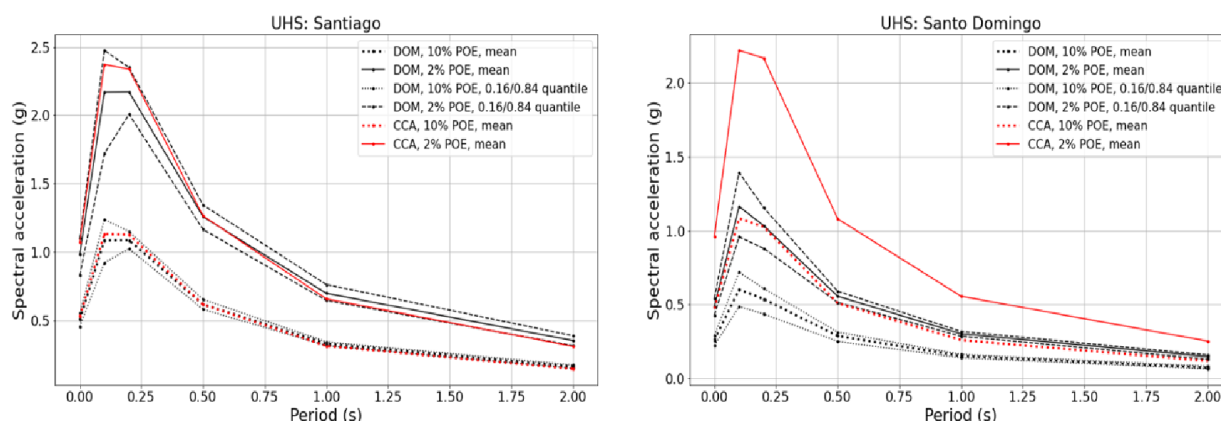


Figura 24. Espectro de amenaza uniforme en roca que compara los cuantiles medio, 84th y 16th calculados a partir del modelo DOM21 con el promedio calculado utilizando CCA para (izquierda) Santiago y (derecha) Santo Domingo.

6.1.2 PSHA para Haití (Frankel et al., 2011)

El modelo de amenaza producido por Frankel et al. (2011) fue desarrollado por el USGS como parte de la respuesta al terremoto M_w 7.0 que devastó Haití en 2010. En general, el modelo utiliza un enfoque similar al utilizado para DOM21, utilizando datos de sismicidad y fallas activas para desarrollar modelos de fuentes sísmicas que representan las fallas corticales, las zonas de subducción y los terremotos corticales superficiales activos.

Comparamos la PGA media en roca calculada a partir de DOM21 con los mapas de las Figuras 3 y 4 de Frankel et al. (2011). Tanto para el 10% como para el 2% de PDE en 50 años, los patrones de amenaza entre los dos mapas son similares. A pesar de usar diferentes árboles lógicos para el modelo del movimiento del terreno, en particular para las fuentes corticales superficiales activas, los valores de PGA calculados a partir de DOM21 cerca de la falla Enriquillo-Garden Plantain y la falla Septentrional son cercanos a los de Frankel et al. (2011); sin embargo, no pueden ser evaluados con precisión ya que en Frankel et al. (2011) los mapas utilizan una escala de colores que abarca de 0.1 a 0.8 g en las áreas de interés. En una escala más fina, los patrones difieren ligeramente, por ejemplo, cerca de Bani, donde la amenaza de DOM21 es mayor. Aquí, y en gran parte del interior de La Española, el modelo DOM21 incluye fallas de la corteza para las cuales Frankel et al. (2011) no tenían datos disponibles. En consecuencia, los señalamos que el entendimiento de la amenaza cambiará a medida que haya más datos de fallas disponibles, como se ha hecho para la preparación del modelo DOM21. Del mismo modo, Frankel et al. (2011) indican que su información fue menos completa para República Dominicana que para Haití.

6.1.3 Microzonificación de Santiago de los Caballeros (Bertil et al., 2010)

La microzonificación de Santiago, desarrollada por Bertil et al. (2010), cubre la ciudad de Santiago. Al igual que el modelo de Frankel et al. (2011), la caracterización de la fuente sísmica utilizada para la microzonificación incluye la falla Septentrional, la falla Enriquillo-Plantain Garden y las zonas de subducción al norte y sur de la isla, pero en el momento del desarrollo no tenía tanta información sobre otras fallas como la disponible actualmente en la base de datos de fallas del SGN para desarrollar el modelo DOM21. En general, el enfoque utilizado para producir los dos modelos es similar. La

microzonificación utiliza fallas y sismicidad de fondo y considera un rango de valores para algunos parámetros de origen en el árbol lógico.

Aquí, comparamos el rango de valores calculados para Santiago por Bertil et al. (2010) con los calculados por el modelo DOM21. Los dos estudios tienen el mismo patrón espacial: la amenaza disminuye a lo largo de los contornos paralelos a la falla Septentrional a medida que aumenta la distancia desde la falla. El PGA medio en roca calculado a partir de Bertil et al. (2010) es inferior al de DOM21. Con una PDE del 10 % en 50 años, el modelo de microzonificación oscila entre ~0.33 y 0.44 g en toda la ciudad, mientras que DOM21 oscila entre ~0.45 y 0.61. La discrepancia es mayor para el 2% de PDE en 50 años, donde la microzonificación muestra un PGA de ~0.55 a 0.72 g, mientras que el modelo DOM21 oscila entre ~0.82 y 1.20 g.

Además, comparamos el espectro de amenaza uniforme (UHS) para el 10% de PDE en 50 años en el sitio N.27 (70.6563 W, 19.4725 N) en Bertil et al. (2010), ver Figura 25. Al igual que PGA, todos los períodos espectrales en el modelo DOM21 son cerca de un 50 % más grandes que la microzonificación. Esta tendencia persiste tanto para la media como para los cuantiles 85 y 15, sin superposición entre los rangos dados.

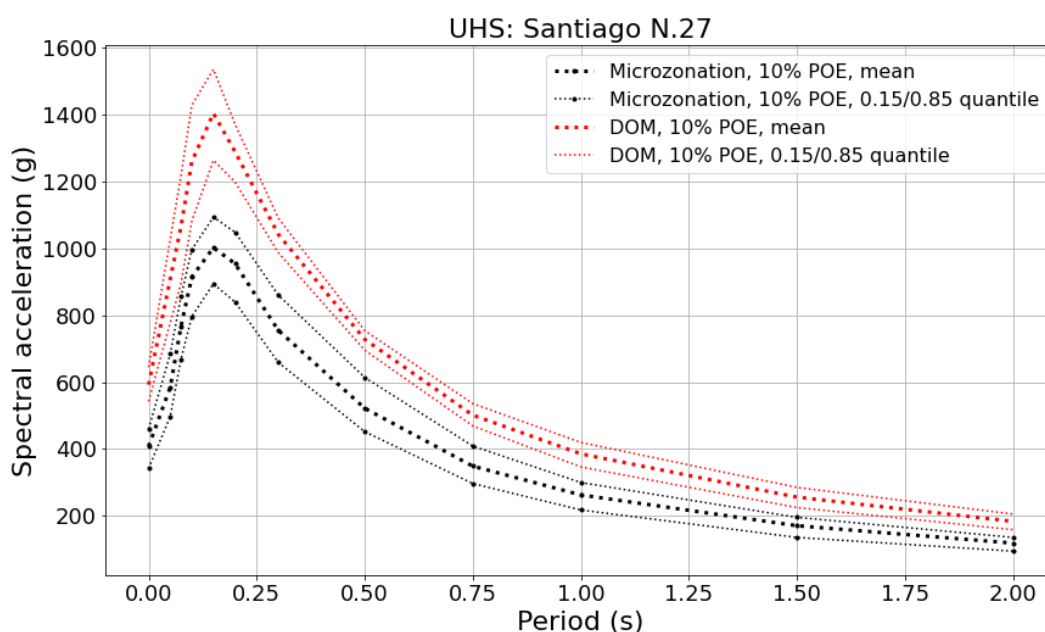


Figura 25. Espectro de amenaza uniforme (UHS) para el 10% de PDE en 50 años en el Sitio N.27 de la microzonificación sísmica y del modelo DOM21. Los valores de la microzonificación se toman de la Tabla 9 de Bertil et al. (2010).

Para comprender una posible razón por la cual la amenaza es más alta en el modelo DOM21, comparamos la distribución de magnitud y frecuencias (MFD) de la falla Septentrional, la estructura que controla la amenaza en Santiago. Las tasas de ocurrencia para la distribución de magnitud y frecuencias son más bajas en la versión DOM21 comparadas con el estudio de microzonificación, sin embargo, la distribución espacial de las fuentes varía. La microzonificación concentra la mayor parte de la sismicidad en la falla misma, y solo permite ocurrencias de hasta M_w 5.5 en la zona de sismicidad de fondo que rodea la falla. Por el contrario, el modelo DOM21 permite sismos de hasta M_w 7.0 y en algunos ramales hasta M_w 7.5 en la sismicidad suavizada. Así, los grandes terremotos en DOM21 ocurren más cerca de Santiago.

6.1.4 Microzonificación de Santo Domingo (Bertil et al., 2015)

El estudio de microzonificación de Bertil et al. (2015) cubre la ciudad de Santo Domingo. El modelo fuente se desarrolló utilizando una metodología mejorada en comparación con la microzonificación de Santiago (Bertil et al., 2011) que fue posible gracias a más datos de fallas disponibles, así como a más datos geofísicos y de sismicidad. En particular, el estudio pudo incorporar algunas de las fallas corticales activas que están cerca de Santo Domingo, y utilizó dos ramas en el árbol lógico del modelo de fuente: una de las cuales usa fallas y sismicidad de fondo, mientras que la otra usa zonas de fuentes tipo área. Los modelos de fuentes incorporan incertidumbres para algunos parámetros en el árbol lógico.

Comparamos la distribución espacial de la PGA media calculada a partir de la microzonificación con el modelo DOM21. El modelo DOM21 muestra una amenaza ligeramente mayor en ambos períodos de retorno. El modelo DOM21 muestra que el PGA con el 10% de PDE en 50 años es aproximadamente constante en 0.26 g en toda la ciudad, mientras que la microzonificación muestra valores entre 0.19 y 2.3 g, aumentando de suroeste a noreste. Para el 2% de PDE en 50 años, DOM21 muestra ~0.48 g en toda la ciudad, mientras que, en la microzonificación, la amenaza aumenta de ~0.35 a 0.42 g del suroeste al noreste.

También comparamos el espectro de amenaza uniforme (UHS) para un punto dentro de la ciudad: el sitio *MOPC*, que es aproximadamente central para el área de estudio de Bertil et al. (2015, ver Figura 26. Al igual que PGA, los valores medios para todos los períodos espectrales en el modelo DOM21 son mayores que los de la microzonificación. Esta tendencia persiste tanto para la media como para los cuantiles 85 y 15. Contrariamente a lo que se observa para Santiago, los rangos de los dos modelos sí se superponen. El rango de valores de PGA calculados a partir de la microzonificación es mucho mayor que el calculado a partir de DOM21 y, en algunos casos (es decir, los períodos superiores a 0.2 segundos), los valores de microzonificación en el cuantil 85 superan la media o incluso el cuantil 85 de DOM21.

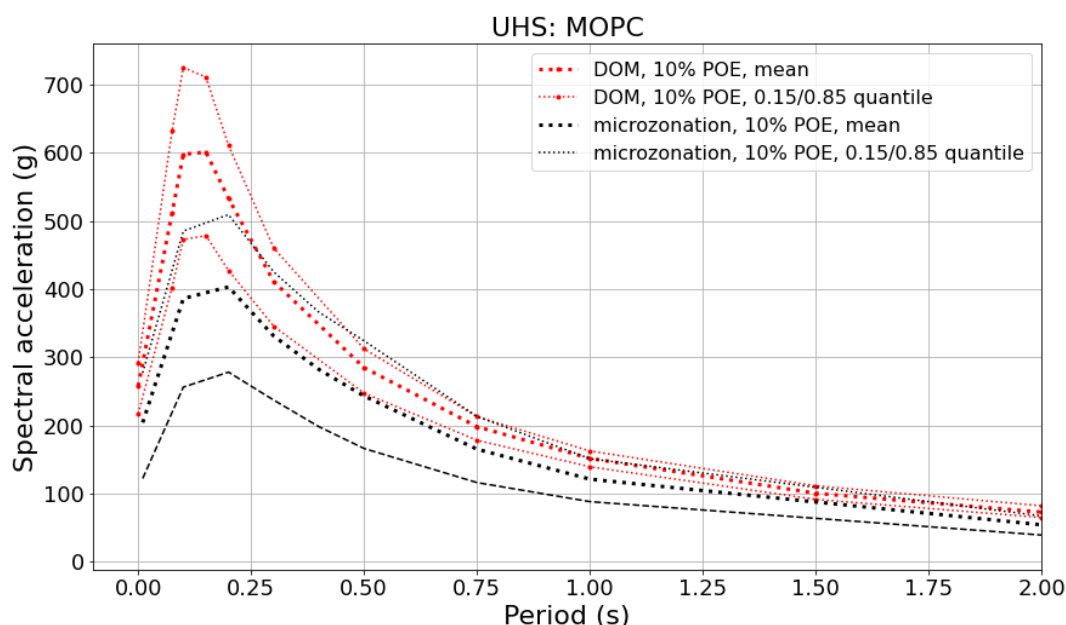


Figura 26. Espectro de amenaza uniforme (UHS) para el 10% de PDE en 50 años en el sitio MOPC de la microzonificación y el modelo DOM21. Los valores de microzonificación se toman de la Tabla 14 de Bertil et al. (2015).

Consideramos algunas explicaciones para las discrepancias en los resultados de los dos modelos. Los parámetros para los cuales se consideran las incertidumbres epistémicas en el modelo fuente de microzonificación son más directos (por ejemplo, valores de la distribución de magnitud y frecuencias a y b y $M_{\max}$ de las fuentes) que los del modelo DOM21 (por ejemplo, las mismas incertidumbres, pero incorporadas a través del algoritmo SHERIFS y el enfoque de suavizado). Además, mientras que la microzonificación de Santo Domingo (Bertil et al., 2015) incluye más fallas que las de Santiago (Bertil et al., 2011), el modelo DOM21 todavía incluye algunas más, algunas de las cuales están justo al oeste de Santo Domingo y puede ser la razón por la que no se observa un gradiente de amenaza en toda la ciudad. Al igual que para Santiago, la $M_{\max}$ de los terremotos en el fondo es $M_w = 5.5$ para el modelo de fuente de microzonificación que usa fallas y sismicidad distribuida, mientras que en DOM21 se permiten valores más altos. Finalmente, el modelo de movimiento del terreno utilizado para la microzonificación es diferente al utilizado por DOM21.

6.1.5 Comparación con otros modelos: resumen

Entre todos los modelos descritos anteriormente, con la excepción del modelo de CCA, las principales características de los patrones espaciales de amenaza son comparables, a pesar de que los modelos están siendo desarrollados por diferentes autores, utilizando conjuntos de datos con diferentes niveles de integridad y con diferentes aplicaciones o regiones de estudio en mente. En general, consideramos que esto respalda los resultados del modelo DOM21 propuesto, a pesar de las diferencias en los valores de amenaza absolutos.

6.2 Aplicaciones iniciales de DOM21

El modelo propuesto DOM21 para la evaluación probabilística de la amenaza sísmica que cubre la isla de La Española fue preparado como parte del Proyecto TREQ.

La primera aplicación del modelo fue una evaluación de amenaza y riesgo urbano para Santiago de los Caballeros, la cual se presenta en detalle en reporte "*D2.2.4 Seismic hazard analysis at the urban scale*", también como resultado del proyecto TREQ.

7 REFERENCIAS

- Abrahamson, N. A., Gregor, N., and Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23-44. doi:10.1193/051712eqs188mr
- Abrahamson, N. A., W. J. Silva, and R. Kamai (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions, *Earthq. Spectra* 30, 1025–1055.
- Akkar S., M. A. Sandikkaya, and J. J. Bommer (2014). Empirical Ground-Motion Models for Point- and Extended- Source Crustal Earthquake Scenarios in Europe and the Middle East, *Bulletin of Earthquake Engineering* (2014), 12(1): 359 - 387
- Atkinson Gail M. and David M. Boore (2006). Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America; *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 96, No. 6, pages 2181-2205
- Atkinson G. M. and D. M. Boore (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, 2003.
- Benford, B., DeMets, C., Calais, E. (2012). GPS estimates of microplate motions, northern Caribbean: evidence for a La Española microplate and implications for earthquake hazard. *Geophys. J. Int.* 191 (2), 481–490.
- Bertil D., Terrier M., Belvaux M. (2015) – Análisis de las fuentes sísmicas y evaluación de la amenaza sísmica regional del gran Santo Domingo. “Estudio de la amenaza sísmica y vulnerabilidad física del Gran Santo Domingo” - Actividad 1.1. BRGM/RP-65305-FR, 149 p., 85 fig., 26 tablas.
- Bertil D., Lemoine A., Winter T., Belvaux M. (2010) – Microzonificación sísmica de Santiago – Republica Dominicana. Amenaza regional. Informe final. BRGM/RC-59107-FR, 100 p., 36 fig., 12 tablas, 2 anexos.
- Bommer JJ, Douglas J, Scherbaum F, Cotton F, Bungum H, Fäh D (2010). On the selection of groundmotion prediction equations for seismic hazard analysis. *Seismol Res Lett* 81:783–793
- Boore David M., Jonathan P. Stewart, Emel Seyhan and Gail Atkinson (2014). NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, nd 5 % Damped PGA for Shallow Crustal Earthquakes; *Earthquake Spectra*, Volume 30, No. 3, pages 1057 - 1085.
- Castro, R. R., Fabriol, H., Bour, M., & Le Brun, B. (2003). Attenuation and site effects in the region of Guadeloupe, Lesser Antilles. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(2), 612-626.
- Calais, E., Symithe, S., de Lépinay, B., Prépetit, C. (2016). Plate boundary segmentation in the northeastern Caribbean from geodetic measurements and Neogene geological observations. *Comptes Rendus Geoscience*. 348. 10.1016/j.crte.2015.10.007.
- Calais, E., A. Freed, G. Mattioli, F. Amelung, S. Jónsson, P. Jansma, S.-H. Hong, T. Dixon, C. Prépetit, and R. Momplaisir (2010), Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake, *Nature Geoscience*, 3(11), 794-799.
- Cauzzi C., E. Faccioli, M. Vanini, and A. Bianchini (2015). Updated predictive equations for broadband (0.01-10s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of

- digital acceleration records. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(6):1587-1612. doi: 10.1007/s10518-014-9685-y.
- Chartier, T., Scotti, O., & Lyon-Caen, H. (2019). SHERIFS: Open-Source Code for Computing Earthquake Rates in Fault Systems and Constructing Hazard Models. *Seismological Research Letters*.
- Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J. J. and Bungum, H. (2006). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: Application to central Europe and rock sites, *J. Seism.*, 10:2, 137-156.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophys. J. Int.* 181, 1–80. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>.
- DeMets, C., Jansma, P.E., Mattioli, G.S., Dixon, T.H., Farina, F., Bilham, R., Calais, E. & Mann, P. (2000). GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 437–440, doi:10.1029/1999GL005436.
- Douglas, J., & Mohais, R. (2009). Comparing predicted and observed ground motions from subduction earthquakes in the Lesser Antilles. *Journal of Seismology*, 13(4), 577-587.
- Draper, G. (2008). Some speculations on the Paleogene and Neogene tectonics of Jamaica. *Geological Journal*, 43(5), 563-572.
- Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski (2012). The global CMT project 2004-2010. Centroidmoment tensors for 13, 017 earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200-201, 1-9, 2012. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Frankel, A. (1995). Mapping seismic hazard in the central and eastern United States. *Seismological Research Letters*, 66(4), 8-21.
- Frankel, A., Harmsen, S., Mueller, C., Calais, E., & Haase, J. (2011). Seismic hazard maps for Haiti. *Earthquake Spectra*, 27(1_suppl1), 23-41.
- Garcia, J. and V. Poggi (2017a). A harmonized Earthquake Catalogue for Central America and the Caribbean region. CCARA Project. GEM Technical Report, Pavia, July 2017,
- Garcia, J. and V. Poggi (2017b). A database of focal mechanisms for Central America and the Caribbean region. CCARA Project. GEM Technical Report, Pavia, July 2017,
- Gardner, J. K., and L. Knopoff (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. Seismol. Soc. Am.* 64: 1363–1367.
- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362(6410), 58-61.
- Hippolyte, J.-C., Mann, P., and Grindlay, N. R. (2005). Geologic evidence for the prolongation of active normal faults of the Mona rift into northwestern Puerto Rico, in: *Special Paper 385: Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and Offshore Areas*, vol. 385, Geological Society of America, Boulder, Colorado, USA, 161–171, <https://doi.org/10.1130/0-8137-2385X.161>.
- Jansma, P.E., and Mattioli, G.S. (2005). GPS results from Puerto Rico and the Virgin Islands: Constraints on tectonic setting and rates of active faulting, in Mann, P., ed., *Active Tectonics and Seismic*

- Hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and Offshore Areas: Geological Society of America Special Paper 385, p. 13–30.
- Johnson, K. L., Pagani, M., & Styron, R. H. (2021). PSHA of the southern Pacific Islands. *Geophysical Journal International*, 224(3), 2149–2172.
- Kanno T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3): 879–897. doi: 10.1785/0120050138.
- Leonard, M. (2010). Earthquake fault scaling: Relating rupture length, width, average displacement, and moment release, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 100, no. 5A, 1971–1988.
- Leroy, S., Ellouz-Zimmermann, N., Corbeau, J., Rolandone, F., de Lépinay, B. M., Meyer, ... Muñoz, S. (2015). Segmentation and kinematics of the North America-Caribbean plate boundary offshore La Española, *Terra Nova*, 27, 467–478, <https://doi.org/10.1111/ter.12181>.
- Manaker, D. M., E. Calais, A. M. Freed, S. T. Ali, P. Przybylski, G. S. Mattioli, P. Jansma, C. Prépetit, and J. B. De Chabaliér (2008). Interseismic plate coupling and strain partitioning in the northeastern Caribbean, *Geophys. J. Int.*, 174(3), 889–903.
- Mann, P., Burke, K., and Matumoto, T. (1984). Neotectonics of La Española; plate motion, sedimentation, and seismicity at a restraining bend: *Earth Planetary Science Letters*, v. 70, p. 311 – 324.
- Mann, P., Calais, E., Ruegg, J.C., DeMets, C., Jansma, P. & Mattioli, G.S. (2002). Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations, *Tectonics*, 37, doi:0.1029/2001TC001304.
- Mann, P., Hippolyte, J.-C., Grindlay, N.R. (2005). Neotectonics of southern Puerto Rico and its offshore margin. In: *Geol. Soc. Am., Special Paper 385*. 173–214.
- Mann, P., DeMets, C., & Wiggins-Grandison, M. (2007). Toward a better understanding of the Late Neogene strike-slip restraining bend in Jamaica: geodetic, geological, and seismic constraints. *Geological Society, London, Special Publications*, 290(1), 239–253.
- McNamara, D., Meremonte, M., Maharrey, J. Z., Mildore, S. L., Altidore, J. R., Anglade, D., ... & Frankel, A. (2012). Frequency-dependent seismic attenuation within the La Española Island region of the Caribbean Sea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 773–782.
- Pagani, M, K Johnson, and J. Garcia-Pelaez (2020a). Modelling subduction sources for probabilistic seismic hazard analysis. In: *Geological Society, London, Special Publications 501*
- Pagani, M., Garcia-Pelaez, J., Gee, R., Johnson, K., Poggi, V., Silva, V., Simionato, M., Styron, R., Viganò, D., Danciu, L. and Monelli, D. (2020b). The 2018 version of the Global Earthquake Model: hazard component. *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl), pp.226-251.
- Pagani, M. and Marcellini, A., 2007. Seismic-hazard disaggregation: a fully probabilistic methodology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), pp.1688–1701.
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., Viganò, D., (2014). OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk)

- Software for the Global Earthquake Model. *Seismological Research Letters* 85, 692– 702. doi:10.1785/0220130087
- Pasyanos, M.E., T.G. Masters, G. Laske, and Z. Ma (2014). LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth, *J. Geophys. Res.*, 119 (3), 2153–2173, DOI: 10.1002/2013JB010626.
- Peñarubia, H. C., Johnson, K. L., Styron, R. H., Bacolcol, T. C., Sevilla, W. I. G., Perez, J. S., ... & Allen, T. I. (2020). Probabilistic seismic hazard analysis model for the Philippines. *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl), 44–68.
- Pindell J.L. and 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 2009; v. 328; p. 1–55 doi: 10.1144/SP328.1
- Pubellier, M., Mauffret, A., Leroy, S., Vila, J. M., & Amilcar, H. (2000). Plate boundary readjustment in oblique convergence: Example of the Neogene of La Española, Greater Antilles. *Tectonics*, 19(4), 630648.
- Rodríguez-Zurrutero A., J.L. Granja-Bruña, A. Muñoz-Martín, S. Leroy, U. ten Brink, J.M. GorosabelAraus, L. Gómez de la Peña, M. Druet, A. Carbó-Gorosabel (2020). Along-strike segmentation in the northern Caribbean plate boundary zone (La Española sector): Tectonic implications, *Tectonophysics*(2018), <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228322>
- Saint Fleur, N., Feuillet, N., Grandin, R., Jacques, E., Weil-Accardo, J., and Klinger, Y. (2015). Seismotectonics of southern Haiti: A new faulting model for the 12 January 2010 M7.0 earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 10273–10281, <https://doi.org/10.1002/2015GL065505>.
- Scherbaum F, Cotton F, Smit P (2004). On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: the case of rock motion. *Bull Seism Soc Am* 94(6): 2164–2185
- Schorlemmer, D., Gerstenberger, M. C., Wiemer, S., Jackson, D. D., & Rhoades, D. A. (2007). Earthquake likelihood model testing. *Seismological Research Letters*, 78(1), 17–29.
- Schorlemmer, D., Zechar, J. D., Werner, M. J., Field, E. H., Jackson, D. D., Jordan, T. H., & RELM Working Group. (2010). First results of the regional earthquake likelihood models experiment. In *Seismogenesis and Earthquake Forecasting: The Frank Evison Volume II* (pp. 5–22). Springer, Basel.
- Strasser, F. O., M. C. Arango, and J. J. Bommer (2010). Scaling of the Source Dimensions of Interface and Intraslab Subduction-zone Earthquakes with Moment Magnitude. In: *Seismological Research Letters* 81, pages 941–950.
- Styron, R. and García-Pelaez, J. and Pagani, M. (2020). CCAF-DB: The Caribbean and Central American Active Fault Database, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 1–42, <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-46>
- Styron, R, and Pagani, M. (2020). The GEM Global Active Faults Database." *Earthquake Spectra*, 36, no. 1_suppl, 160 –180, doi:10.1177/8755293020944182.
- Symithe, S., Calais, E., de Chabaliér, J.-B., Robertson, R., Higgins, M. (2015). Current block motions and strain accumulation on active faults in the Caribbean. *J. Geophys. Res.* 120, 1–27.

- Terrier-Sedan, M., & Bertil, D. (2021). Active fault characterization and seismotectonic zoning of the La Española island. *Journal of Seismology*, 25(2), 499–520.
- Uhrhammer, R. (1986). Characteristics of Northern and Central California Seismicity, *Earthquake Notes*, 57(1): 21
- Weatherill, G. A. (2014). OpenQuake Ground Motion Toolkit - User Guide. Global EarthquakeModel (GEM). Technical Report.
- Weatherill, G., Pagani, M. and Garcia, J. (2016). Exploring Earthquake Databases for the Creation of Magnitude-Homogeneous Catalogues: Tools for Application on a Regional and Global Scale, *Geophysical Journal International* 206 (3), 1652–1676.
- Weichert, D. H. (1980). Estimation of the Earthquake Recurrence Parameters for Unequal Observation Periods for Different Magnitudes. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 70.4, pages 1337 – 1346
- Wells, D. L., & 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 K. J. Coppersmith (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. In: *Bull. Seism. Soc. Am.* 75.4, pages 939–964
- Zechar, J. D., Gerstenberger, M. C., & Rhoades, D. A. (2010). Likelihood-based tests for evaluating space–rate–magnitude earthquake forecasts. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(3), 1184–1195.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., and Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898–913.