

Geología de Santiago de los Caballeros (República Dominicana) para el estudio de microzonación sísmica

*Geology of Santiago de los Caballeros, Dominican Republic,
applied to seismic microzoning study*

MIGUEL LLORENTE ISIDRO¹
m.llorente@igme.es

MYRIAM BELVAUX⁴
m.belvaux@brgm.fr

ENRIQUE BERNÁRDEZ³
enrique.bernardez@uda.cl

DIDIER BERTIL⁴
d.bertil@brgm.fr

JOSÉ ANTONIO FERNÁNDEZ MERODO²
jose.fernandez@igme.es

LUIS LAÍN HUERTA²
l.lain@igme.es

EUSEBIO LOPERA CABALLERO²
e.lopera@igme.es

SANTIAGO MUÑOZ TAPIA⁵
smunoz@sgn.gov.do

AGATHE ROULLÉ⁴
a.roulle@brgm.fr

RESUMEN

Tras el terremoto de Haití de 2010 dio comienzo una iniciativa para estudiar los posibles efectos de los terremotos en la ciudad de Santiago de los Caballeros (República Dominicana); la segunda ciudad más importante del país y que ya fue reconstruida y reubicada en 1562 tras un terremoto. El daño debido a un terremoto ocurre asociado a un conjunto de factores, entre ellos, la aceleración del suelo.

1 Instituto Geológico y Minero de España (Santiago de Compostela).

2 Instituto Geológico y Minero de España (Madrid).

3 Universidad de Atacama. Chile.

4 Bureau de Recherches Géologiques et Minières. France.

5 Servicio Geológico Nacional. República Dominicana.

El efecto de la atenuación de la distancia en un radio de unos pocos kilómetros suele ser mucho menos relevante que el efecto de la variación en las propiedades de los suelos. Este artículo recoge los resultados obtenidos de los estudios de peligro sísmico y microzonificación sísmica en la ciudad de Santiago de los Caballeros: i) cuantificación del peligro sísmico regional debido a la falla septentrional; ii) un nuevo mapa geológico y iii) la cartografía de zonas de respuesta sísmica homogénea y susceptibilidad a la licuefacción.

Palabras clave: efectos de sitio, geotecnia, licuefacción, peligro sísmico, sismos.

ABSTRACT

After the Haiti quake of 2010 an initiative started to better understand shaking effects in the city of Santiago de los Caballeros (Dominican Republic); a city that was devastated after an earthquake and rebuilt in a new site in 1562. It is well known that damage because of an earthquake occurs associated to a number of factors, ground acceleration is amid them. Within the range of a few kilometers, the effect of distance attenuation might be far less relevant than the effect of varying properties of soils. This paper gathers results obtained from the seismic hazard and microzonation studies developed in the city of Santiago: i) quantification of regional seismic hazard dominated by the Septentrional fault, ii) a new geological mapping of superficial formations, and iii) mapping of zones of homogeneous seismic response and liquefaction susceptibility.

Keywords: seismic hazard, earthquakes, geotechnics, site effects, liquefaction.

INTRODUCCIÓN

La isla de La Española, compartida por la República Dominicana y Haití, está ubicada en la zona del límite convergente de la placa caribeña con la norteamericana y presenta una importante actividad tectónica. Fruto de dicha actividad fue el terremoto de Haití del 12 de enero de 2010, que ocasionó un gran desastre del que el país aún no ha logrado recuperarse. Como consecuencia de aquél evento, se movilizó ampliamente la opinión pública y en la República Dominicana, en 2010, se tomó la decisión de realizar un estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Santiago de Los Caballeros (un área rectangular de 133 km²) situada en una zona de fallas activas denominada “Zona de Falla Septentrional” (ZFS) y segunda ciudad más importante del país después de Santo Domingo, la capital. En el pasado, la ciudad se ha visto afectada por seísmos muy significativos, incluyendo el más antiguo conocido de 1562 y por el que la ciudad fue reconstruida a unos kilómetros al sur de su ubicación anterior, alejándose de la ZFS. Este estudio se realizó en el marco de los proyectos de cartografía geotemática desarrollados en los programas SYSMIN I y SYSMIN II, financiados por el Fondo Europeo de Desarrollo con la Oficina Nacional para los Fondos Europeos (ONFED) como autoridad contratante, con la Supervisión de la Dirección General de Minería, la Coordinación por parte de una Unidad Técnica de Gestión (UTG), y con los socios IGME, BRGM e INYPSA.

MÉTODO DE ESTUDIO

La peligrosidad, de acuerdo a UNISDR 2009 y conforme a la interpretación de INSPIRE (Comisión Europea 2013; Thomas et al. 2014) es un concepto que atañe a la magnitud o intensidad de un proceso y su probabilidad de ocurrencia. En este sentido, la peligrosidad sísmica se puede abordar desde la perspectiva macrosísmica (o peligrosidad sísmica regional), útil para el desarrollo normativo entre otras aplicaciones (p.ej. CNIG 2014); o desde la perspectiva microsísmica, útil para el planeamiento urbano o el cálculo de riesgo entre otras muchas aplicaciones (Lee et al., 2003). La perspectiva microsísmica persigue la determinación de regiones de similar comportamiento en relación a la respuesta local (espectro de respuesta local) como consecuencia de una sacudida sísmica de diseño (espectro de respuesta de base). Para poder abordar un estudio microsísmico es necesario seguir un esquema de trabajo como el que se presenta en la Figura 1.

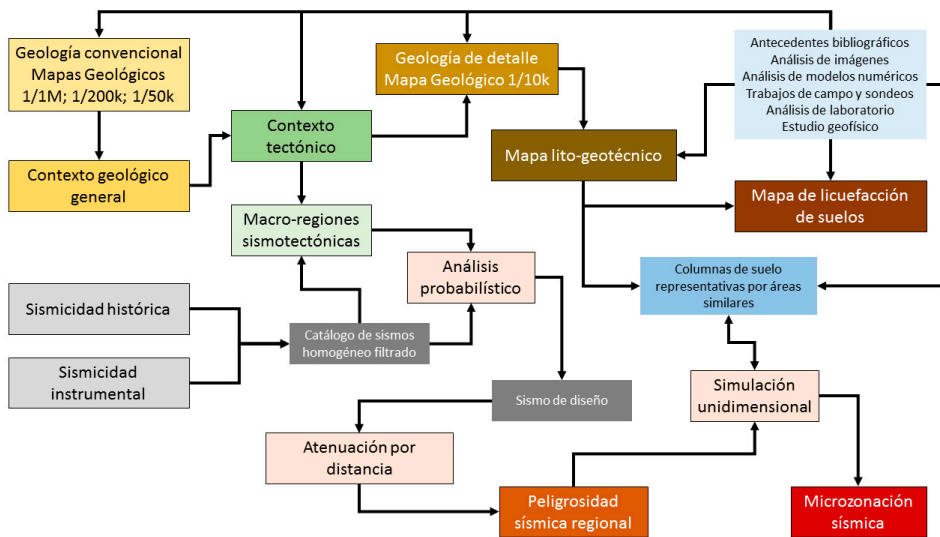


Figura 1. Esquema general del método de trabajo. I: intensidad, XYZ: coordenadas hipocentrales. M: magnitud de sismos. MF: mecanismos focales..

En primer lugar es necesario conocer el contexto geológico o geodinámico general, pues ello permite contextualizar adecuadamente el área de estudio. En este caso, el contexto geológico proviene de los programas de cartografía geotemática a escala 1/50.000 y anteriores, derivados de los programas SYSMIN. En segundo lugar, es necesario conocer el contexto sísmico, lo que implica generar un catálogo sísmico homogéneo que incluya tanto fuentes de datos de naturaleza histórica como derivadas de registros instrumentales. Con estos dos puntos de partida se puede ya abordar un estudio probabilístico, cuyo finalidad es

la generación de un “sismo de diseño”, es decir, identificar el sismo teórico que daría lugar a las mayores aceleraciones del suelo y que cumpla un determinado umbral de probabilidad (en general $T=475$ años o lo que es lo mismo, un sismo cuya tasa de excedencia sea de un 10% en 50 años). Siguiendo con este resultado, un modelo de atenuación de la aceleración sísmica por efecto de la distancia considerando su propagación por un medio rocoso homogéneo, es lo que da lugar a la macrozonificación sísmica o peligrosidad sísmica regional.

Por otro lado, para poder conocer los efectos locales de un terremoto, es necesario conocer los materiales geológicos que conforman dicha localización a la mejor resolución posible. Para ello se llevan a cabo métodos clásicos en geología para la elaboración de un mapa a escala 1/10.000, que en este caso incluye, necesariamente, una caracterización geomecánica y una caracterización geofísica siguiendo los métodos correspondientes, lo que da lugar a dos productos: en primer lugar el mapa geológico y, derivado de éste, un mapa de unidades litogeotécnicas. Las unidades litogeotécnicas cumplen dos funciones. Por un lado, la función de guía para definir “columnas de suelo representativas”, es decir, aquella columna unidimensional de suelo que sería característica de una determinada zona debido a la respuesta sísmica que desarrollaría al ser sometida a la oscilación del terremoto de diseño. Por otro lado, es la base para la interpretación de las unidades superficiales en relación a su respuesta potencial o capacidad para licuefactarse. La expresión del comportamiento sísmico homogéneo local en forma de mapa, es el mapa de microzonificación sísmica, que muestra los espectrogramas que serían representativos en distintas parcelas de la zona de estudio. No obstante, un estudio microsísmico puede incluir el estudio de otros efectos, ya sean co-sísmicos o inducidos, tales como movimientos del terreno, roturas o agrietamientos en superficie (por afloramiento de fallas) y otros. En este estudio se ha abordado la licuefacción de los suelos de Santiago, pero por limitaciones de presupuesto, no se acometió la temática de los movimientos del terreno. Si bien este modelo conceptual del método se representa en forma de continuum, muchos de los pasos son realmente procesos iterativos complejos en los que cada parte se retroalimenta de su propio resultado. Así por ejemplo, el diseño de las campañas de campo depende en gran medida de los antecedentes, y conforme avanzan los trabajos, se adaptan estas campañas a los resultados. En los apartados subsiguientes se presentan los resultados de cada una de estas fases ordenadas linealmente: la contextualización geodinámica y sísmica, el análisis sísmico probabilístico, la geología y, finalmente, la microzonificación sísmica.

CONTEXTO GEODINÁMICO

La Isla de La Española se encuentra en el límite de las placas Norteamericana con Caribeña (Figura 2). La convergencia de las placas caribeña y norteamericana es oblicua de unos 20 mm/año (DeMets et al., 2000), con un contexto general transpresivo, habiendo zonas de subducción al norte y sur de la isla, mientras que en su interior predominan los desgarres transpresivos (Mann et al., 1984; Dolan et al., 1998; Manaker et al., 2008). En la actualidad dos de las zonas de falla transpresiva tienen una importante actividad tectó-

nica, la Falla de Enriquillo que ha causado el reciente terremoto de Haití (12/01/2010) y la Zona de Falla Septentrional, cuya traza superficial pasa a escasos kilómetros de la ciudad de Santiago de los Caballeros.

El límite entre las placas Caribeña y Norteamericana, en la región de La Española, pasa de un régimen de desgarre senestro de dirección N75°E al Oeste (fallas de Islas Cisne, Oriental y Enriquillo-Plantain Garden) a una estructura transpresiva de dirección N95°E hacia el Este (trinchera de los Muertos y de Puerto Rico, Figura 2; Mann et al. 1984). Esta zona de transición está dividida entre las zonas de subducción de las costas norte y sudeste de La Española y las fallas direccionales que atraviesan las porciones norte y sur de la isla. Como consecuencia, el desplazamiento relativo de placas es acomodado en estructuras tectónicas de diferente naturaleza: fallas direccionales senestrales de La Española hacia el oeste (zonas de falla de Islas Cisne, Oriente, Enriquillo-Plantain Garden y Septentrional); y la zona de subducción de La Española hacia el este (trinchera de los Muertos y de Puerto-Rico), aunque recientemente esta zona está siendo reinterpretada sin subducción, asociándose la depresión a un margen de deformación compresivo con prismas de acreción en un cinturón de deformación (Granja Bruña et al. 2014) con potencial sismogénico, coherente con otras regiones de similares características y más consistente con los modelos de anomalías gravimétricas (Granja Bruña et al. 2010).

La Zona de Falla Septentrional (ZFS, Figura 2), recorre la parte norte de la isla con una dirección ESE-ONO. El movimiento de la falla es transpresional senestro con un desplazamiento de unos 8 ± 5 mm/año de acuerdo con Manaker et al. (2008), resaltando la incertidumbre en la cuantificación del desplazamiento. El desplazamiento es coherente, al sumarlo con los 7 mm/año propuesto para la de Enriquillo, con el valor global de 20 mm/año determinado para la placa caribeña por De Mets et al. (2000).

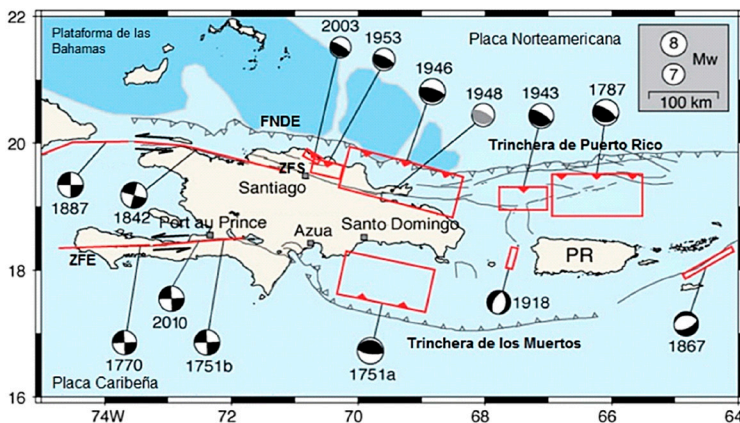


Figura 2. Localización de los principales accidentes tectónicos y mecanismos focales para algunos de los principales terremotos históricos. FNDE: Frente Norte de Deformación de la Española; ZFE: Zona de Falla de Enriquillo; ZFS: Zona de Falla Septentrional; PR: Puerto Rico. Modificado de Ali et al. (2008).

Las dos regiones o dominios tectonoestratigráficos separados por la falla tienen caracteres muy distintos. Al Norte, la cordillera septentrional, con importantes relieves, presenta una estructura geológica compleja, con materiales de edades muy variables, desde Cretácico Inferior a Plioceno, frecuentemente afectados por fuertes buzamientos, y con una tectónica transpresiva, con fallas que delimitan bloques con fuertes desplazamientos. Al Sur, el Valle del Cibao se caracteriza por un relieve muy suave, prácticamente plano y una estratigrafía y tectónica mucho más sencillas, con relleno exclusivamente neógeno, que presenta buzamientos muy bajos y tectónica frágil, con desplazamientos mucho menos importantes que los de la Cordillera Septentrional.

CONTEXTO SÍSMICO

Sismicidad histórica e instrumental

La actividad tectónica ligada a la zona de Falla Septentrional en las proximidades de la ciudad de Santiago ha dado lugar a importantes terremotos en época prehistórica e histórica, recogidos en los catálogos MIDAS y NOAA. Estudios neotectónicos realizados mediante zanjas en la parte central de la falla por Prentice et al. (1993) y Mann et al. (1998) indican que la última ruptura importante tuvo lugar hace unos 800 años y desde entonces se han acumulado unos 5 m de deformación, siendo muy elevada la probabilidad de un gran seísmo. Una parte de la energía acumulada, probablemente muy pequeña, se liberó en terremotos históricos, entre otros el que dio lugar a la destrucción total de la antigua ciudad de Santiago de los Caballeros el 2 de diciembre de 1562. Aun así la ciudad sufrió otras destrucciones por terremotos en 1776 y 1783. En el año 1842 tuvo lugar el terremoto de mayor intensidad asociado a la Zona de Falla Septentrional. Con una intensidad de VIII-IX provocó nuevamente la destrucción de Santiago y otras ciudades de la isla, además de un maremoto que ocasionó la inundación de Montecristi y Manzanillo (Kelleher, 1973; Dolan, et al. 1998).

Para este estudio se ha compilado un catálogo sísmico unificado (Bertil et al., 2010, Figura 3) basado en distintos catálogos (MIDAS, ISC, NEIC/USGS, NOAA, Engdahl y Villaseñor (2002)). Este catálogo sísmico integra tanto la sismicidad histórica como la instrumental abarcando en total el periodo entre el año 1564 y el año 2010, para una ventana entre los 75° y los 68°O de longitud y los 17° y los 21°N de latitud, lo que incluye la totalidad de la isla de La Española. El catálogo contiene cerca de 2.400 eventos, de los cuales casi 700 están asociados a una magnitud M_w convertida. La magnitud mínima del catálogo es 3,5 y la máxima es 8,1. Muchos datos históricos en este catálogo no presentan estimaciones de magnitud, principalmente réplicas de los mayores eventos.

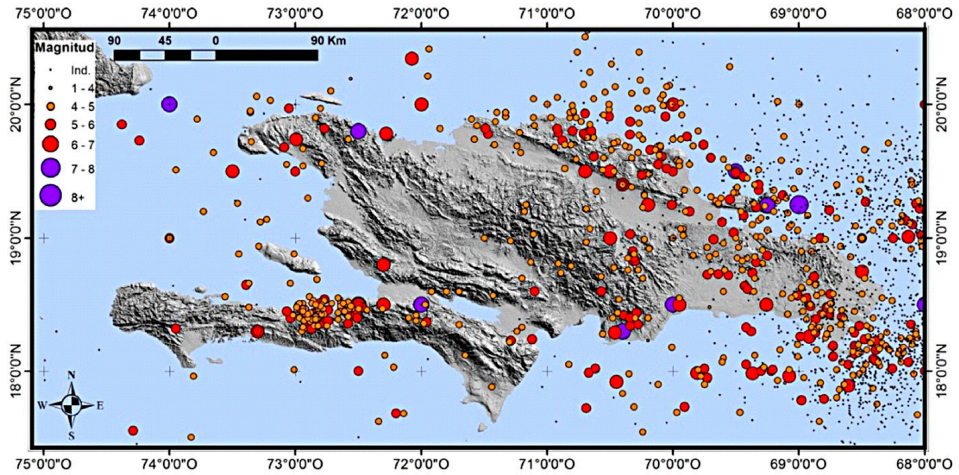


Figura 3. Epicentros de los sismos recolectados para el periodo 1564-2010 (basado en el catálogo unificado de Bertil *et al.*, 2010).

Fuentes sismogénicas

En una región tectónica activa como la isla de La Española, todas las observaciones se utilizaron para describir las fuentes sismogénicas y delimitar unidades o zonas sismo-tectónicas. Para la identificación de las fuentes sismogénicas potenciales, se tuvieron en cuenta aspectos tales como el contexto geodinámico general; la situación geográfica; la sismicidad asociada (histórica e instrumental); el grado de actividad tectónica, tipo de deformación y tasa de movimiento; o la geología y geometría de la zona y del plano de falla.

Las estructuras tectónicas que acomodan parte del desplazamiento relativo de las placas Caribeña-Norteamericana en la zona central de La Española e inmediaciones y que pueden generar un peligro sísmico significativo son cinco: 1. La Zona de falla Enriquillo (o zona de falla Enriquillo-Plantain Garden); 2. La Zona de falla Septentrional; 3. La Fosa de los Muertos; 4. El sistema de fallas Norte-Española, es decir, la extensión occidental de la fosa de Puerto Rico al norte de La Española; y 5. En el seno de la isla de La Española, una zona de transición entre diferentes regímenes incluyendo la Cordillera Central.

Cada una de estas zonas de fallas activas ha sido responsable de grandes seísmos que han destruido varias poblaciones, entre las que se encuentra la ciudad de Santiago de Los Caballeros en diciembre de 1562. Las intensidades de los terremotos o de sus réplicas están en al rango de VII a IX y mayor (Kelleher *et al.*, 1973; Dolan y Wald, 1998).

La zona de falla Enriquillo es una estructura E-O que atraviesa la parte sur de la isla de La Española (Mann *et al.*, 1995). Del catálogo se pueden asociar a esta estructura entre cinco y seis sismos importantes (I_0 de VIII o mayor).

La zona de falla Septentrional es una estructura de dirección E-O a ESE-ONO que atraviesa el norte de La Española, paralela al límite de placas. En esta zona se han identificado al menos tres eventos de $I_0 > VIII$.

Para este trabajo la traza de la falla Septentrional ha sido cartografiada a partir del modelo de Mann et al. (2002), los datos SRTM30_PLUS topográficos y batimétricos (Becker y Sandwell, 2006) y las imágenes satélite LANDSAT. Se han identificado dos ramificaciones que se conectan al norte de la República Dominicana: la rama oriental tiene una longitud de 820 ± 80 km y la rama occidental tiene una longitud cartográfica de 395 ± 40 km. Utilizando las relaciones de Wells y Coppersmith (1994), la zona de falla alcanza una magnitud máxima en torno a $8,3 \pm 0,3$ y $7,9 \pm 0,3$ Mw para los segmentos oriental y occidental de la falla. Frankel et al. (2010) asumen una longitud menor para estos segmentos y utilizan una magnitud máxima de 7,8 Mw para ambos segmentos.

La fosa de Muertos está orientada aproximadamente E-O, entre el estrecho Anegada al este y la cuenca de San Pedro al oeste (sur de La Española). Según McCann (2006) es posible que esta zona genere un gran terremoto en 1751 (M 8 estimada) y prodújese un tsunami.

La zona intraplaca de transición de la cordillera viene marcada por la falla inversa de Matheux Neiba incluida en el trabajo de Frankel, et al. (2010). Es una de las fallas inversas que subyacen bajo las montañas en Haití (Mann et al., 1995). Se incluye en la zona de transición “intraplaca” de la región de la Cordillera donde la geometría no se conoce bien (Maneker et al., 2008). La sismicidad registrada es difusa y superficial, y si bien parece que en 1911 se produjo un sismo de Mw=7, el tiempo de recurrencia para grandes terremotos en esta zona es más largo que en las fallas Enriquillo o Septentrional.

El sistema zona de falla Norte Española-subducción Puerto Rico señala el límite entre los microbloques (Gonave y La Española-Puerto Rico) y la placa Norteamericana. Aunque la intensa sismicidad instrumental en la zona de falla Norte Española puede ser atribuida principalmente al sector oriental de la estructura, esta actividad sísmica parece decrecer fuertemente hacia el oeste, ahora bien, la ausencia de una red sísmica en Haití no permite corroborarlo.

La región de estudio incluye también algunas unidades sismotectónicas poco activas y asociadas a una sismicidad moderada.

Zonación sismotectónica

De acuerdo a los criterios antes citados, se ha construido un modelo de 13 fuentes sismotectónicas (Bertil et al., 2010; Figura 4 y Tabla 1). Se han definido dos tipos de zonaciones: la primera distingue las zonas sismogénicas superficiales. En la segunda, la geometría de fuentes sísmicas tiene en cuenta las variaciones de profundidad asociadas a la subducción al Norte de la isla y en la zona de Muertos.

En este modelo, las fallas de Enriquillo y Septentrional se han tenido en cuenta individualmente en la zonación, ya que para estas fallas superficiales principales a las que se asocian sismos históricos importantes, se dispone de datos de tasa de desplazamiento, las cuales permiten calcular los parámetros de actividad sísmica según la metodología

descrita por Anderson y Luco (1983). Esta metodología aplica una zona de margen en el entorno de las fallas principales, donde se presupone la existencia de fallas anexas más pequeñas en las cuales pueden generarse sismos de magnitud baja a moderada.

Las otras fallas activas intraplacas superficiales de La Española son menos conocidas y se engloban en amplias zonas sísmicas poligonales, donde la sismicidad observada es más difusa y ahí los parámetros de actividad sísmica se calculan a partir de catálogos de sismicidad por aproximaciones estadísticas del tipo Weichert (1980). La Tabla 1 resume las magnitudes máximas según cada zona sísmica (Figura 4).

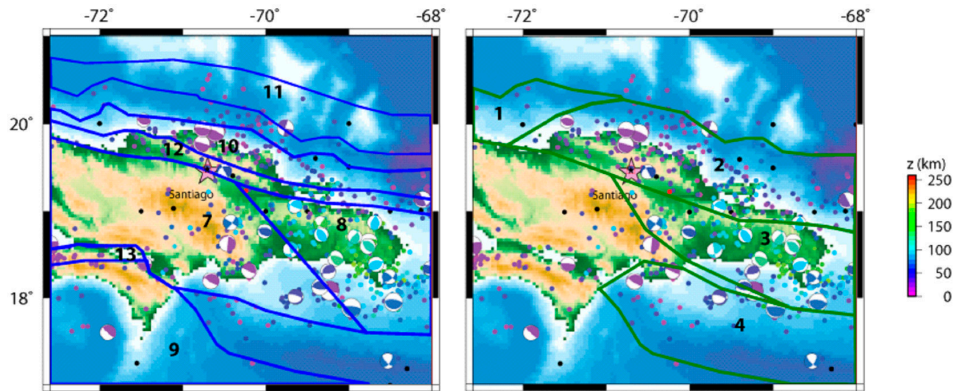


Figura 4. Modelo de zonación en 13 fuentes sísmicas; zonación en superficie a la izquierda, zonación en profundidad a la derecha. La sismicidad recopilada (Figura 3) está representada en función de la profundidad. Los mecanismos focales se toman del catálogo Harvard CMT: 1976-2010 (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).

Tabla I. Unidades o zonas sismotectónicas y sismogénicas.

N.	Nombre	Mw máxima observada (año correspondiente)	Mw máxima e incertidumbre
1	Subducción Norte interfase Oeste	6,6 (1962)	8,0 ± 0,2
2	Subducción Norte interfase Este	8,1 (1946)	8,3 ± 0,3
3	Lámina Subductiva Norte	7,0 (1946)	7,5 ± 0,5
4	Cabalgamiento de Muertos	8,0 (1751)	8,2 ± 0,25
5	Background Septentrional	5,5	
6	Background Enriquillo	5,5	
7	Transición Cordillera	7,0 (1911)	7,5 ± 0,2
8	Intraplaca Este Española	5,5 (1989)	7,0 ± 0,5
9	Background Sur Haití Muertos	5,8 (1939)	6,05 ± 0,25
10	Prisma de acreción Norte	6,4 (2003)	6,65 ± 0,25
11	Convexidad externa	4,9 (1987-2003)	6,0 ± 0,5
12	Zona de falla Septentrional	8,0 (1842)	8,15 ± 0,15
13	Zona de falla Enriquillo	7,5 (1751-1770)	7,8 ± 0,3

EL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO

Evaluar el peligro sísmico desde una perspectiva probabilística consiste en calcular la tasa anual de excedencia de una intensidad (o aceleración) en un lugar concreto. En la aproximación desarrollada por Cornell (1968), la actividad sísmica se supone aleatoria en el tiempo y en el espacio y homogénea dentro de cada zona sismogénica. Este cálculo se ha realizado con el programa Crisis v. 2003 (Ordaz et al. 2003). En cuanto a las relaciones de atenuación, se utilizaron las mismas relaciones que fueron utilizadas por Frankel et al. (2010): tres para las fallas corticales (Boore & Atkinson, 2008; Campbell & Bozorgnia 2008; y Chiou & Youngs, 2008), y tres para la subducción (Zhao et al. 2006; Youngs et al. 1997; Atkinson & Boore, 2003). Se asoció una ponderación a cada una de estas relaciones para la consideración de los errores epistémicos (un $1/3$ para las fallas corticales y un $1/2+1/4+1/4$ para las zonas de subducción respectivamente).

El cálculo de la amenaza se efectúa en una cuadrícula de 35 puntos en la ciudad de Santiago cubriendo una superficie de 112 km². El periodo de retorno utilizado es el clásico de los trabajos en sismicidad de 475 años. El resultado se puede observar en el mapa de aceleración pico del suelo (PGA, por sus siglas en inglés *peak ground acceleration*, Figura 5). Se han seleccionado dos puntos de referencia, para representar el espectro de amenaza uniforme en los sectores de peligro más y menos elevados de la ciudad (PGA de 0,35g y 0,42g respectivamente).

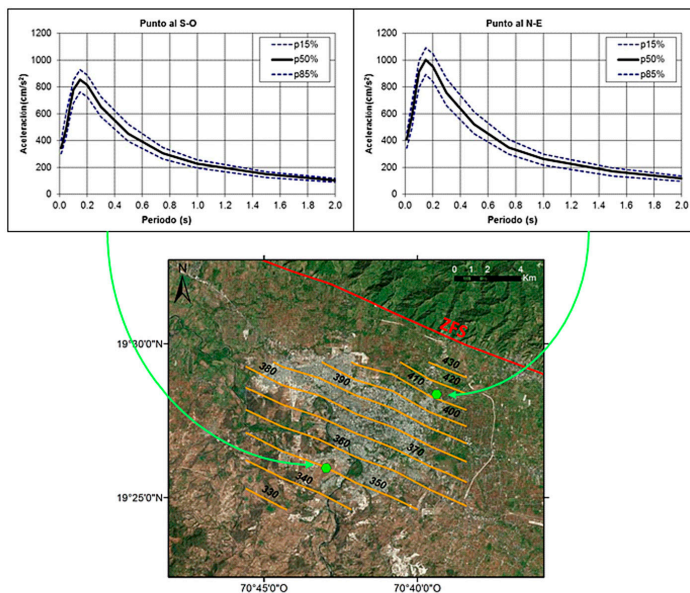


Figura 5. Espectros de peligro sísmico, puntos de cálculo y mapa de isoclinas de aceleración pico del suelo (PGA, de 330 a 430 cm/s² SO-NE con equidistancia 10 cm/s²) de la ciudad de Santiago de los Caballeros para T 475 años. Los espectros son representados para las aceleraciones medias y los percentiles 15% y 85%. La línea roja indica el trazado de la ZFS.

GEOLOGÍA Y GEOTECNIA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Campañas de campo y laboratorio de geotecnia

Los trabajos previos de geología en la zona de estudio proceden principalmente de los productos derivados de los programas SYSMIN de cartografía geotemática a escala 1/50.000 y las síntesis geológicas correspondientes a menores escalas (Urien, 2010). Por otro lado, existen algunos trabajos previos a mayor escala, en particular los mapas 1/13.000 de Franco y Peña (2003), la recopilación de sondeos de Penson (1973) y otros documentos (informes, esquemas y trabajos geotécnicos) a los que se consiguió acceso sobre el terreno en el ámbito de la obra civil u obras singulares (carreteras, puentes, edificios relevantes). En total se reunió la información de 55 sondeos con profundidades de entre 2 y 27 m, sumando un total de unos 360 m; junto con sus respectivas interpretaciones y ensayos. En origen, tan sólo estaba disponible una base topográfica convencional a pequeña escala, por lo que fue necesario realizar un nuevo mapa topográfico, con una actualización del callejero, a escala 1/10.000 a partir de fotorrestitución de pares estereoscópicos aéreos verticales de la ciudad. Para completar la información, se levantaron 214 puntos de observación entre afloramientos, zanjas y obras, con una buena distribución espacial y se realizaron 18 sondeos geomecánicos con recuperación continua de testigo (con profundidades entre los 18 y los 70 m; sumando un total de unos 640 m).

De la campaña geotécnica se derivaron un total de 461 ensayos de laboratorio y 344 ensayos *in situ*. Los ensayos de laboratorio han sido granulometrías (88), límites de Atterberg (88), contenido de humedad natural (83), clasificación de suelos (88), compresión uniaxial simple (21) y densidad (93). El tipo de ensayo *in situ* ha sido el *Standard Penetration Test* (SPT), que se ejecutaba a intervalos regulares cada 1,5 m y excepcionalmente a intervalos mayores cuando la técnica resultaba inapropiada por profundidad o por tipología de materiales. La campaña geofísica también aportó información relevante para la elaboración del mapa geológico y geotécnico. Se hicieron 57 medidas por el método SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*; Nazarian y Stokoe, 1984) y 150 medidas tipo H/V (conocidas como método de ruido de fondo, o método de Nakamura, 1989).

Los suelos de Santiago presentan un peso específico de 1,79 a 1,14 gr/cm³ y una humedad natural del 35 al 10%. En cuanto a los límites de Atterberg para los casos estudiados, el límite líquido es el que más variabilidad presenta, con un máximo de 66 y un mínimo de 10; mientras que el límite plástico se mantiene bastante constante entre 17 y 25. El índice de plasticidad indica que predominan los materiales muy plásticos, destacando algunas muestras con valores muy elevados (máximo IP = 43). Además, sobre el terreno se ha podido comprobar que algunos niveles son expansivos, especialmente las arcillas de Licey (con hinchamientos en ocasiones superiores al 20%; IGME, 2010).

La cartografía geológica y lito-geotécnica (Figura 6) muestra, tres grupos grandes rasgos: los materiales pertenecientes a la Cordillera Septentrional; los neógenos del Valle del Cibao y los cuaternarios recientes. Se puede encontrar una descripción más porme-

norizada de estas unidades tanto en el Sistema de Información Documental del IGME, donde existe una copia de los informes técnicos, así como en el Servicio Geológico Dominicano (Comisión Europea, 2011).

Cordillera Septentrional

En el área de estudio, tan sólo aparece en una pequeña superficie (de unos 0,3 km²) de la esquina NE, perteneciendo todo ello al miembro La Pocilguita de la Unidad de Altamira - La Toca. Está constituida principalmente por lutitas con cemento calcáreo, gradación positiva y estructuras tractivas turbidíticas. La edad de estos materiales es Mioceno y su potencia total se calcula en unos 300 m (Urien 2010).

Neógeno y cuaternario marino del Valle del Cibao

La mayor parte de la zona de estudio corresponde a los materiales neógenos y cuaternarios marinos del Valle del Cibao. La Cuenca del Cibao configura, de forma conjunta con la Cordillera Septentrional, una gran estructura sinclinal cuyo eje transcurre aproximadamente paralelo a la propia cuenca (Mann et al., 1991). La potencia estimada de la serie sedimentaria es de 5.000 a 6.000 m, y está integrada por las Formaciones Bulla, Cercado, Gurabo y Mao (Mioceno inferior-Pleistoceno), de las cuales tan sólo afloran en la zona de estudio las formaciones Gurabo y Mao.

Formación Gurabo

La formación Gurabo (Mioceno superior – Piacenciense, Bernárdez, 2004) está constituida por lutitas más o menos carbonatadas, con alternancias de argilitas y limolitas, por lo general en capas decimétricas, a las que Saunders et al. (1986) atribuyen una potencia de 425 m. Hacia techo se interdigitan con las calizas de la Formación Mao Adentro, no representadas en el área de este estudio. La Formación Gurabo muestra una secuencia de profundización hacia techo, que se inicia en un sistema para-arrecifal y finaliza en un medio de plataforma siliciclástica externa, por debajo de las Calizas de Mao Adentro (McNeill et al., 2008). Los afloramientos ocupan generalmente las riberas del río Yaque del Norte (o río Yaque) en la zona urbana y periurbana de Santiago, así como los cortes antrópicos de carreteras, que ofrecen las mejores secciones (Figura 6).

De acuerdo con Urien (2010) la potencia de la formación puede alcanzar los 200 metros en el marco de la Hoja de Santiago de Los Caballeros, estando muy alterados los 10 a 30 metros más próximos a superficie. El contacto con la Formación Cercado subyacente, no visible en el área estudiada, es una discordancia angular según Urien (2010). A techo, la Formación Gurabo, está en contacto con la Formación Mao (Piacenciense y Gelasense), la Unidad de Lacey al Medio (Pleistoceno post Gelasense) y otros materiales cuaternarios. El contacto con la Formación Mao es una marcada discontinuidad.

Formación Mao

En la hoja de Santiago (Urien, 2010) la Formación Mao aparece dividida en tres subunidades según el predominio litológico, y que se han reconocido en la presente cartografía. La Formación Mao, de unos 100m de potencia en el área cartografiada, encuentra a techo la discordancia basal de los materiales cuaternarios. Según Bernárdez (2004), la edad es pleistocena Gelasiense a Calabriense y está constituida fundamentalmente por un conjunto siliciclástico heterogéneo, en que las litologías predominantes son areniscas, conglomerados y limolitas con algunas intercalaciones de arcillas y de limos calcáreos. Los limos suelen tener una participación arenosa importante y en ocasiones presentan fauna y flora marina y costera. La formación presenta características sedimentarias propias de medios deltaicos progradantes desde el Sur, principalmente en zonas próximas a su desembocadura, en cuencas con creación continua del espacio de acomodación y altas tasas de acumulación sedimentaria.

En la cartografía realizada la Formación Mao ocupa fundamentalmente el tercio central de la hoja, definiendo su representación cartográfica una amplia banda de orientación NO-SE (Figura 6).

Cuaternarios recientes

Además de los depósitos que se describen a continuación, durante el cuaternario más reciente se ha desarrollado una importante alteración de los materiales depositados previamente. Esta alteración, ligada principalmente a las oscilaciones del nivel freático provoca una oxidación de la materia orgánica y sulfuros contenidos en los sedimentos lutíticos, así como una disolución del cemento y los bioclastos carbonatados, siendo reconocible por el cambio de coloración, de grisáceo más o menos oscuro a pardo amarillento. Esta alteración provoca una importante modificación de las características litológicas y geotécnicas de los materiales, por lo que su máxima profundidad ha sido representada en los cortes geológicos con una línea roja discontinua. La profundidad de este nivel oscila por lo general entre los 10 y los 20 metros, pero puede puntualmente superar los 30 m o encontrarse limitada a un efecto muy superficial.

Abanico aluvial

Los afloramientos de abanicos aluviales se sitúan en el borde norte de la hoja, correspondiendo al piedemonte de la Cordillera Septentrional. Se interdigitan con la Unidad de Licey, constituyendo la parte proximal de la misma. Están constituidos por depósitos conglomeráticos con cantos de naturaleza fundamentalmente carbonatada y areniscas calcáreas procedentes de la Cordillera Septentrional.

Unidad de Licey

La Unidad Licey ocupa aproximadamente un tercio de la superficie cartografiada, fundamentalmente en su mitad oriental. Morfológicamente se caracteriza por dar lugar a

una llanura, con muy suave pendiente, dirigida casi uniformemente hacia el suroeste. La mayor parte de su superficie está ocupada por terrenos de cultivo, desarrollándose sobre ella suelos negros muy fértiles. Al norte se interdigita con la unidad de abanicos aluviales, y en superficie se dispone siempre sobre la formación Mao, si bien en sondeos se ha detectado sobre la Formación Gurabo y sobre las terrazas medias, con las que se interdigita. Los afloramientos, muy escasos, se ubican en las incisiones naturales de los arroyos principales o en cimentaciones de edificios. La litología que fundamentalmente constituye esta unidad son arcillas pardas masivas que cuando son excavadas por los arroyos dan lugar a fuertes pendientes que con frecuencia presentan deslizamientos rotacionales. Generalmente están saturadas en agua hasta un metro por encima del nivel de drenaje. Entre estas arcillas se intercalan niveles, de hasta un metro de potencia por lo general, de arcillas con arenas de diversa granulometría, llegando a veces a microconglomerados. Los cantos y granos están siempre flotando en la matriz arcillosa y nunca presentan ningún tipo de ordenación.

Conos de deyección

Son abanicos aluviales de reducidas dimensiones que se sitúan en la desembocadura de pequeños arroyos. Los principales se sitúan en las proximidades del río Yaque, sobre sus terrazas bajas y corresponden a tres arroyos de muy poca longitud y que han quedado colgados por la excavación de la red principal por su muy significativa diferencia de entidad (la cuenca del río Yaque, a su paso por Santiago de los Caballeros, es de casi 2.000 km², un 30% de su tamaño total). Su composición es arenosa-fangosa y la potencia del depósito es muy escasa, probablemente no superando los dos metros de máxima. Otro pequeño cono de este tipo se ha identificado por su expresión topográfica al oeste de los Cerros de Gurabo.

Terrazas medias-altas

Se ha agrupado en este epígrafe varios niveles de terrazas separados verticalmente del cauce actual cuya correlación resulta compleja. Así por ejemplo en la parte sur de la hoja se han identificado en la margen oriental del río Yaque tres niveles de terrazas, ninguno de los cuales es directamente correlacionable con los dos niveles que se pueden identificar inmediatamente al oeste de dicho río. La litología más característica son los conglomerados de cantos rodados de tamaño variable flotantes en una matriz de arenas sueltas. La composición de los cantos es fundamentalmente de rocas ígneas y metamórficas procedentes de la cordillera central. Volumétricamente son más importantes los tramos de arenas y limos. En superficie estos materiales suelen encontrarse muy recubiertos y los afloramientos son muy escasos. En algunos puntos se han observado niveles de limos con arenas finas con huellas de raíces y gasterópodos continentales. Resulta especialmente interesante para el objeto de este trabajo, la presencia de estratificación ondulante generada por procesos de licuefacción.

Terrazas bajas

Las terrazas aluviales bajas están en relación directa con la red hidrográfica actual o la llanura de inundación. Sus afloramientos se sitúan en las proximidades del cauce del río Yaque. Estas terrazas están constituidas por cantos de tamaño centimétrico y decimétrico, polimícticos, de rocas intrusivas, metamórficas y volcánicas procedentes directa o indirectamente de la Cordillera Central. Ocasionalmente se encuentran cantos de calizas coralinas. La matriz de arenas gruesas no está consolidada. Estas terrazas pueden ser inundadas durante las grandes crecidas del río Yaque como ocurrió durante la Tormenta Olga de diciembre 2007. En la actualidad el río Yaque circula encajado en estas terrazas, que llegan a una profundidad netamente mayor que la actual de excavación del cauce.

Llanura de inundación y canales abandonados

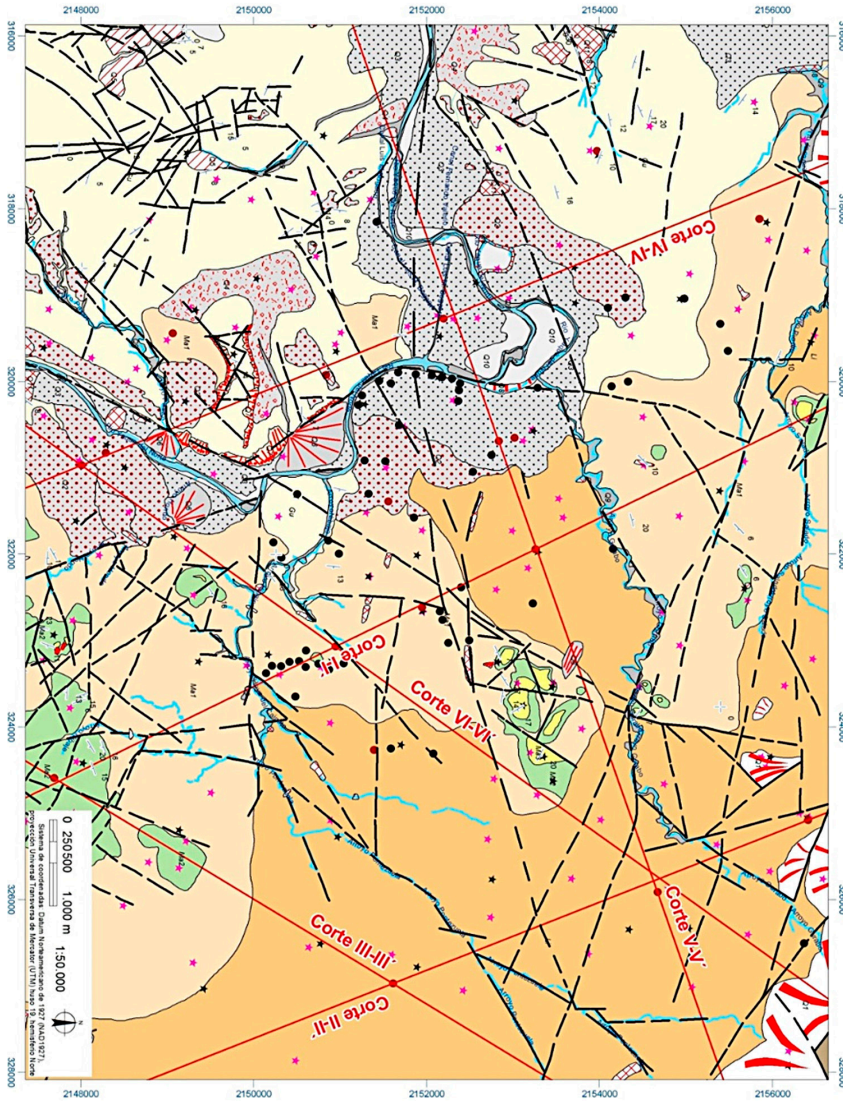
Las facies de llanura de inundación se concentran en las orillas de las partes anchas del curso del río Yaque. Debido al régimen subtorrencial del río, los depósitos están constituidos fundamentalmente por cantos redondos de tamaño centimétrico a métrico y son clasto-soportados con muy poca matriz arenosa. El mayor desarrollo de estos depósitos se concentra aguas abajo del centro de Santiago, donde el río, después de dibujar un fuerte meandro, cambia la dirección Sur-Norte que tiene aguas arriba, a la Este-Oeste que mantiene hasta su desembocadura.

Aluviones de fondo de valle

Los aluviones de fondo de valle están presentes en los principales arroyos, estando constituidos en general por depósitos de energía moderada, fundamentalmente fangosos y arenosos de colores pardos oscuros, con abundante materia orgánica y algunas lentes conglomeráticas. Su potencia es de poco más de un par de metros. Los aluviones del río Yaque son de mayor energía y están constituidos por cantos redondeados de diámetro muy variable y con muy poca matriz arenosa en superficie. En la cartografía se han incluido con estos depósitos las barras laterales y centrales del río, con más participación de material arenoso.

Aluvial-Coluvial

Son depósitos que ocupan zonas de escaso relieve y parecen corresponder a un retrabajamiento de coluviones y suelos por escorrentía superficial difusa. Tienen una potencia por lo general menor de un metro y están constituidos principalmente por limos y arcillas con cantos dispersos y en los que no se aprecia ningún tipo de ordenación.



Leyenda

- Fallas
- Buzamientos**
- ⊕ Buzamiento subhorizontal
- ⊖ Buzamiento
- Contactos geológicos
- Cortes geológicos
- Sondeos realizados
- Sondeos recopilados
- ★ Puntos SASW
- ★ Puntos H/V

Geología (tramas)

- Descripción**
- Abanico aluvial
 - Antropico: escombros y basuras
 - Glacis aluvial: limos y gravas
 - Aluvial-Coluvial: Limos y gravas
 - Terrazas bajas: Conglomerados, arenas y limos
 - Terrazas medias-altas: conglomerados, arenas y limos
 - Hidrografía

Geología (Color)

- Descripción**
- Llanura de inundación: limos, arenas, conglomerados
 - Aluviones de fondo de valle: limos, arenas y gravas
 - Coluvión: cantos y bloques en matriz lutítica
 - Cono de deyección: arenas, lutitas y cantos
 - Unidad Licey: arcillas plásticas
 - Formación Mao, Unidad Palo Amarillo: calizas coralinas
 - Formación Mao: areniscas y conglomerados
 - Formación Gurabo: argilitas y limolitas calcáreas
 - Formación Mao: areniscas lutíticas, lutitas y gravas
 - Miembro La Pociguila: argilitas calcáreas y calcarenitas

Figura 6. Mapa Geológico de Santiago de los Caballeros.

Glacis aluvial

Estos depósitos ocupan planicies inclinadas en zonas de cabecera de valles en la esquina suroccidental de la hoja. Están constituidos fundamentalmente por limos y arenas limosas con algunos horizontes de gravas. También son frecuentes los niveles con abundantes gasterópodos. Presentan una laminación paralela bastante marcada por lo general, con algunos horizontes de bioturbación de raíces. Su depósito podría corresponder a una escorrentía superficial con flujo laminar. Su potencia puede llegar a superar los 8 m, estando su superficie ocupada por cultivos.

Coluvión

Estos depósitos gravitacionales de ladera se sitúan a pie de fuertes escarpes, situados fundamentalmente en la Formación Gurabo y se componen de cantos de dicha unidad en una matriz de fangos resultante de la descomposición de la misma. Tanto su potencia como su distribución areal son muy reducidas.

Depósitos antrópicos

Tratándose el área cartografiada de un área urbana, los depósitos de origen antrópico son prácticamente omnipresentes, y en la cartografía se han representado únicamente los de mayor volumen o importancia para la evaluación de riesgos. Se han representado depósitos antrópicos de tres tipos; vertederos, escombreras y zahorras de apoyo de grandes construcciones. Los vertederos de Rafey o de Cienfuegos son los más importantes de la comunidad urbana de Santiago. Son acumulaciones de basuras de origen doméstico o industrial, depositadas en las canteras abandonadas de las lutitas de la Formación Gurabo o terrazas medias del río Yaque. Otros vertederos, de mucha menos importancia volumétrica, pero significativos por estar parcialmente ocupados por viviendas, se han cartografiado por distintas partes de la ciudad, especialmente aquellos asentados sobre arcillas de la Unidad de Licey con fuerte pendiente y desnivel, y que sirven de asiento a un número elevado de viviendas. Se han cartografiado otros vertederos de menor importancia pero con área cartografiable, generalmente a orillas de arroyos, pero los vertederos de dimensiones inferiores a los 10 m cuadrados son sumamente numerosos.

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Las condiciones particulares de un lugar pueden cambiar radicalmente el potencial destructivo de un sismo, incluso en distancias muy cortas. Un estudio de microzonificación sísmica consiste en cartografiar las zonas de respuesta sísmica homogénea y proponer movimientos sísmicos de referencia en cada una de estas zonas. Para ello se ha caracterizado el territorio mediante la realización de una campaña geofísica apoyada por los datos geológicos y geotécnicos obtenidos en las fases previas.

Columnas de suelo

Un análisis conjunto de los datos geológicos, geotécnicos y geofísicos, permite la caracterización de las formaciones superficiales, y la determinación de los parámetros geomecánicos necesarios para los estudios de sitio litológicos. Este análisis nos permite considerar 10 zonas tipo para el estudio de los efectos de sitio en la ciudad de Santiago de los Caballeros. Cada una de las 10 zonas consideradas ha sido definida por una o varias columnas de suelo representativas (Roullé et al., 2011).

Las columnas de suelo representativas del terreno se describen por la litología de los horizontes (suelos blandos, suelos rígidos) la estratigrafía (secuencia y potencia) y las características geomecánicas de los horizontes (en valores medios). La velocidad de ondas P, la velocidad de ondas S, el peso específico γ y las curvas de comportamiento dinámico del suelo (rigidez respecto a amortiguamiento respecto a la deformación angular (g); $G(g)/G_{max}$ vs $D(g)$) son características dinámicas de los suelos, necesarias en la simulación del comportamiento de una columna de suelo bajo sollicitación sísmica.

Cuando las profundidades del sustrato sísmico son inciertas, se pueden calibrar con las medidas H/V realizadas sobre el terreno. El método de razón empírica H/V del ruido ambiental, o método Nakamura, permite evaluar la frecuencia de resonancia del suelo (Nakamura, 1989). Además de precisar los espesores de las formaciones cartografiadas, otro método geofísico SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*) permite definir puntualmente un perfil de velocidad de la onda de corte V_s . De hecho, los espesores de las formaciones geológicas y las velocidades de las ondas de cizallamiento constituyen dos parámetros indispensables para la simulación numérica de la respuesta sísmica de columnas de suelo. Se han ejecutado un total de 147 medidas puntuales H/V y 56 perfiles SASW en la zona de estudio.

Se ha simulado el comportamiento del suelo siguiendo un modelo lineal equivalente implementado en CyberQuake (Modaressi et al. 1997). En las simulaciones numéricas 1D en CyberQuake se combinan el espectro de amenaza en suelo firme, definido a partir del estudio de peligro sísmico probabilístico (Figura 5), y las columnas de suelo tipo definidas aquí.

Clases de efectos de sitio litológicos y espectros de respuesta asociados

Los espectros de respuesta específicos en cada zona fueron después representados en un único gráfico para evaluar su semejanza y efectuar los agrupamientos de zonas en caso de respuestas sísmicas equivalentes. Esto nos ha permitido definir para toda la zona de estudio 7 clases de efectos de sitio litológicos donde las características de respuesta de los suelos en el caso de sismo serían distintas. Persisten dos sectores, las zonas n°6 y n°8, donde no se ha podido definir un espectro de respuesta elástica; en estas zonas, los resultados tomados de diferentes métodos son incoherentes el uno con el otro y revelan una fuerte heterogeneidad geométrica y litológica.

La zonificación de clases de suelos a efectos de sitio litológicos y los espectros de respuesta elásticos correspondientes se pueden ver en la Figura 7, en la forma de un mapa de microzonificación sísmica a escala 1/25.000. Su lectura permite conocer en cada punto de la ciudad, las zonas de respuesta sísmica homogénea.

Los resultados indican que el conjunto del territorio de Santiago es susceptible de aumentar las amplificaciones debidas a los efectos de sitio litológicos, en distintos grados y para periodos diferentes. Por ejemplo la clase 0, al oeste de la ciudad, que corresponde principalmente a la formación Gurabo, manifestaría efectos de sitio que pueden afectar más a los edificios de una o dos plantas. Las terrazas a lo largo del río Yaque (terrazas bajas y altas terrazas) muestran escasos efectos de sitio pero que podrían afectar principalmente a edificios con dos o cuatro plantas. Las arcillas de la unidad Licey, de gran espesor, es probable que amplifiquen las vibraciones sísmicas para períodos superiores y por tanto que afectan a edificios más altos (de tres a nueve pisos). Ningún lugar de la ciudad puede ser asimilado a un sitio rocoso según la reglamentación sismorresistente nacional (MOPC, 2011).

Licuefacción de suelos

No existe una metodología general o consensuada para realizar análisis de licuefacción de suelos, pues es un problema complejo. Youd y Perkins (1978) realizaron una clasificación de la susceptibilidad basada en criterios geológicos, mientras que Wakamatsu (1992) incluía condiciones geomorfológicas y genéticas. Otros documentos de referencia de los que se pueden obtener recomendaciones son: Eurocode 8 (1988); AFPS, (1993); TC4-ISSMGE, (1999); CDC-DMG, (1997); y el Chinese Building Code, (1974).

Las recomendaciones en estos documentos tratan de evaluar tanto cualitativa como cuantitativamente, y de forma más o menos detallada, la peligrosidad asociada a la licuefacción. Los trabajos de Seed e Idriss (1971) y Youd e Idriss (1997) son las referencias comunes a todos ellos.

Los factores principales que controlan la susceptibilidad a la licuefacción durante sacudidas sísmicas violentas son: el tipo de depósitos (formación, edad, grado de cementación), las propiedades de los suelos (granulometría, porcentaje de poros, densidad relativa, módulo de corte dinámico) y la profundidad de los acuíferos.

Los ambientes deposicionales de sedimentos controlan la distribución de tamaño de las partículas y, en parte, la densidad relativa y la distribución estructural de partículas. Las características de tamaño de grano de un suelo influyen en su susceptibilidad a la licuefacción. La arena fina tiende a ser más susceptible que limos y gravas. Todo suelo sin cohesión, sin embargo, puede ser considerado potencialmente líquido cuando la influencia de la distribución del tamaño de grano no se considera. En general, los suelos cohesivos que contienen aproximadamente más del 20% de arcilla pueden ser considerados no licuefactables.

En general, las características del suelo y los procesos que causan una susceptibilidad menor a fenómenos de licuefacción también causan mayor resistencia de penetración. Por lo tanto, evaluar la resistencia de penetración de una muestra de suelo en un sondeo, es un indicador útil de susceptibilidad a la licuefacción. En el trabajo se realizaron SPTs en suelos a razón de uno cada 1,5 metros hasta los 40m y por debajo uno cada 3 m.

Como conclusión se puede resumir que las zonas donde existen terrenos que son susceptibles a sufrir fenómenos de licuefacción corresponden a:

- Zonas donde aparecen materiales granulares sueltos y uniformes tales como depósitos fluviales, coluviales y eólicos así como depósitos antrópicos. Comúnmente corresponden a sedimentos recientes Plio-cuaternarios, abanicos aluviales, depósitos de playa y dunas y otros depósitos de semi-gravedad.
- Zonas en las que la profundidad del nivel freático está cerca de la superficie, marismas, puertos, antiguos valles inundados y cauces actuales de los ríos.

Por otro lado, algunos estudios de paleo-licuefacción indican presencia de estructuras de licuefacción asociados a terremotos antiguos a lo largo del valle del Ciabo Oriental (Tuttle et al., 2003). El fenómeno de licuefacción ha sido observado en algunos materiales de la ciudad, es por lo tanto plausible pensar que un futuro terremoto pueda volver a inducir licuefacción en materiales depositados más recientemente y poco compactados.

Atendiendo a todas estas premisas y de acuerdo a los datos de los que se dispone, el análisis de la susceptibilidad cualitativa a la licuefacción permite distinguir 3 niveles de susceptibilidad (alta, media y baja o nula). La susceptibilidad cualitativa así expresada, debe entenderse como una probabilidad relativa de que en una determinada región tenga lugar el fenómeno respecto a otra adyacente. Las regiones o zonas, se agrupan por sus características geológicas, litológicas y geotécnicas considerando las recomendaciones de las diversas fuentes citadas.

Se ha podido observar que la mayor parte de la ciudad es poco susceptible al fenómeno. Las zonas de mayor susceptibilidad se asocian con los numerosos rellenos antrópicos y depósitos de fondo de barranco en las márgenes de los afluentes del río Yaque del Norte y en las márgenes del propio Yaque del Norte. Muchos de los puntos identificados como de alta susceptibilidad vienen a coincidir con asentamientos urbanos marginales, regiones que son ocupadas por infra-viviendas, un aspecto que es importante tener en cuenta a la hora de planificar actuaciones futuras.

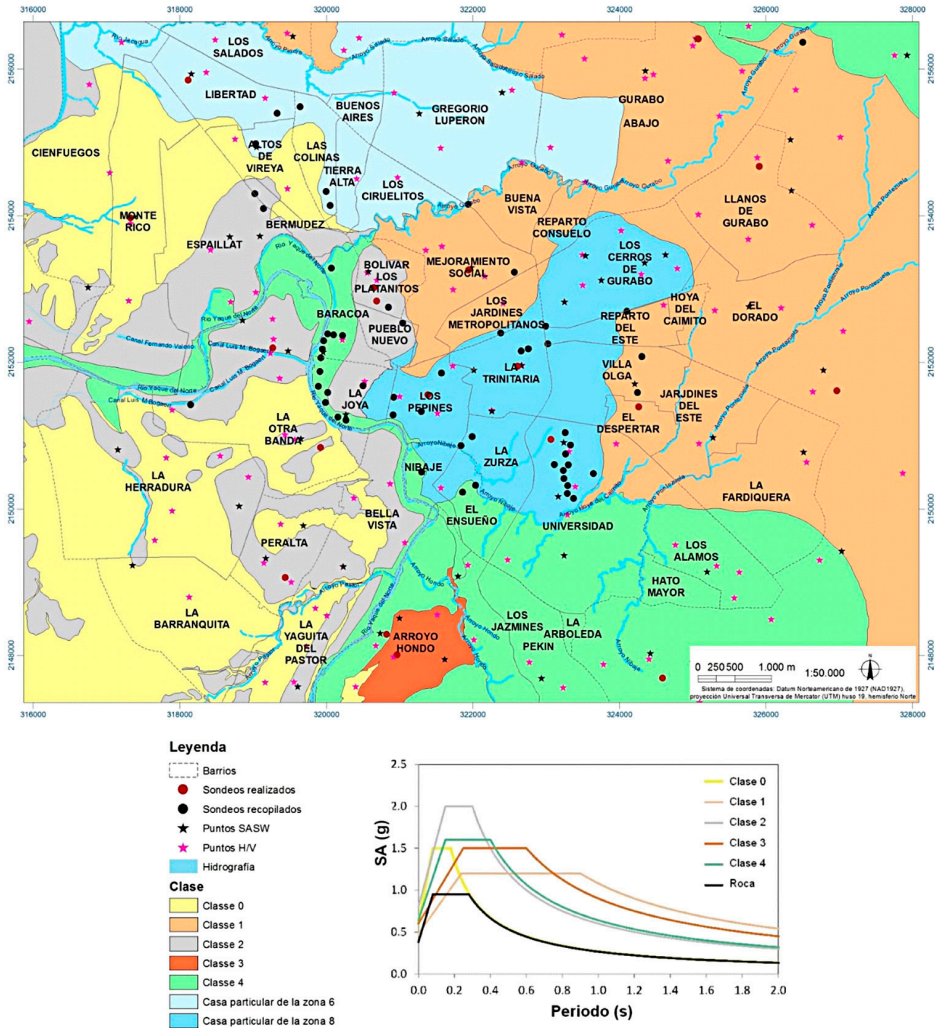


Figura 7. Zonificación de las diferentes clases de efectos de sitio litológicos para la ciudad de Santiago de los Caballeros.

CONCLUSIONES

Gracias a este trabajo se ha mejorado el conocimiento de la geología superficial en la ciudad de Santiago de los Caballeros. Además, en caso de terremoto en la falla del norte, se ha podido observar que el papel de la geología es fundamental para entender los fenómenos de amplificación de las vibraciones sísmicas, así como de la licuefacción del suelo. Concretamente, el periodo en el que se alcanza la mayor aceleración del suelo

para los distintos materiales de Santiago de los Caballeros varía entre los 0,1 a 0,6 s, lo que representa periodos en general mayores que en el caso de roca, con un máximo de amplificación sísmica x2 respecto a los valores en roca (o por efecto exclusivo de la atenuación por distancia). Esto viene a poner de relieve que la amplificación sísmica es muy significativa en la ciudad, concentrándose los valores más altos de aceleración en las zonas situadas más al oeste y al sur y a aquellas ligadas a los depósitos aluviales (Belvaux et al., 2011). Es precisamente hacia el sector oeste hacia donde evoluciona la ciudad y los espectros de aceleración obtenidos por este trabajo deberían tenerse en cuenta a la hora de planificar nuevas edificaciones e infraestructuras.

Por último conviene incidir que en el centro histórico se ha observado mayor incertidumbre en las medidas geofísicas y por consiguiente en los resultados de amplificación sísmica por efecto de sitio. Esta mayor incertidumbre responde a una configuración geológica propia de abanicos coalescentes, con rápidas transiciones de facies, añadido a una importante urbanización que dificulta la interpretación. En esta zona (marcada como caso especial de zona 8, Figura 7) sería conveniente realizar nuevos ensayos para minimizar los efectos de incertidumbre mencionados.

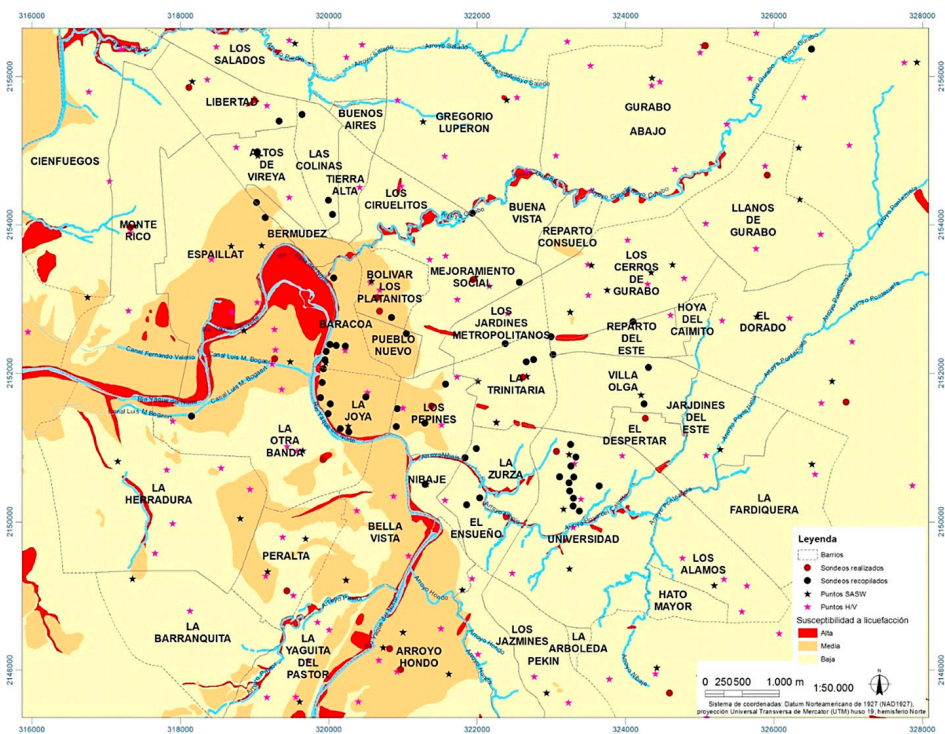


Figura 8. Mapa de susceptibilidad a la licuefacción de Santiago de los Caballeros, República Dominicana.

BIBLIOGRAFÍA

- AFPS (1993): *Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique*. Association Francaise du Genie Parasismique. París. Francia.
- Ali, S.T.; Freed, A.M.; Calais, E.; Manaker, D.M. y McCann, W.R. (2008): *Coulomb stress evolution in Northeastern Caribbean over the past 250 years due to coseismic, postseismic and interseismic deformation*. *Geophysical Journal International*, 174, pp. 904-6918.
- Anderson, J.G. y Luco, J.E. (1983): *Consequences of slip rate constants on earthquake occurrence relations*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, pp. 471-496.
- Atkinson G.M. y Boore D.M. (2003): *Empirical ground-motion relations for subduction zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), pp. 1703-1729.
- Becker, J.J. y Sandwell D.T. (2006): *SRTM30_PLUS, data fusion of SRTM land topography with measured and estimated seafloor topography*. Scripps Institution of Oceanography, University of California in San Diego, SRTM30_PLUS V2.0.
- Belvaux, M.; Bertil, D.; Roullé, A.; Lopera, E.; Laín-Huerta, L.; Llorente-Isidro, M.; Fernández-Merodo J.A.; Bernárdez E.; Hernaiz Huerta P.P. (2011): *Regional and local seismic hazard mapping for seismic risk mitigation of Santiago de los Caballeros (Dominican Republic)*. 19th Caribbean Geological Conference, Le Gosier, Guadeloupe, French West Indies, 21-24 March 2011, abstract #96, p. 70.
- Bernárdez, E. (2004): *Mapa geológico de la república Dominicana a escala 1:50.000. Hoja de Mao (5974-I)*. Proyecto K de Cartografía Geotemática de la República Dominicana. Programa SYSMIN. Dirección General de la Minería. Santo Domingo. 65 pp. 1 mapa 1:50.000.
- Bertil, D.; Lemoine, A.; Winter, T.; Belvaux, M. (2010): *Microzonificación sísmica de Santiago, Republica Dominicana. Amenaza regional*. Informe. BRGM/RC-59107-FR, 100 p.
- Boore, D.M. y Atkinson, G.M. (2008): *Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s*. *Earthquake Spectra*, 24(1), pp. 99-138.
- Campbell, K. W. y Bozorgnia Y. (2008): *NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10s*. *Earthquake Spectra*, 24(1), pp. 139-171.
- CDC-DMG (1997): *Recommended procedures for implementation of DMG special publication 117, guidelines for analysing and mitigating liquefaction in California*. California Department of Conservation, Division of Mines and Geology EEUU.
- Chinese Building Code (1974): *Earthquake resistant design code for industrial and civil buildings*. TJ11-74, China Build.

- Chiou, B.S.J. y Youngs, R.R. (2008): *An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra*. Earthquake Spectra, 24(1), pp. 173-215.
- Comisión Europea (2011): *Mapa de Peligrosidad Sísmica de Santiago de los Caballeros República Dominicana, Memoria Técnica*. Trabajo inédito. 700 pp, 18 mapas/esquemas. Trabajo realizado por la DIGECOOM, IGME, BRGM, INYPSA.
- Cornell, C. A. (1968): *Engineering Seismic Risk Analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America, 58, pp. 1583-1606.
- Darendeli, M.B. (2001): *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. Tesis Doctoral, University of Texas, Austin, USA.
- DeMets, C.; Jansma, P.E.; Mattioli, G.S.; Dixon, T.H.; Farina, F.; Bilham, R.; Calais, E. y Mann, P. (2000): *GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion*. Geophysical Research Letters, 27, 437-440.
- Dolan, J.F. y Wald D.J. (1998): *The 1943-1953 north-central Caribbean earthquakes: active tectonic setting, seismic hazards, and implications for Caribbean-North America plate motions*. En Dolan, J.F. y Mann P. (eds): *Active strike-slip and collisional tectonics of the northern Caribbean plate boundary zone*. Geological Society of America, special paper, 326, pp. 143-169.
- Dolan, J.F.; Mullins, H.T. y Wald D.J. (1998): *Active tectonics of the northcentral Caribbean: oblique collision, strain partitioning, and opposing subducted slabs*. En Dolan, J.F. y Mann P. (eds): *Active strike-slip and collisional tectonics of the northern Caribbean plate boundary zone*. Geological Society of America, special paper, 326, pp. 1-62.
- Engdahl, E.R. y Villaseñor, A. (2002): *Global Seismicity: 1900-1999*. En Lee, W.H.K.; Kanamori, H.; Jennings, P.C. y Kisslinger, C. (eds.): *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Part A, Chapter 41, pp. 665-690, Academic Press.
- Erikson, J. P.; Pindell, J. L.; Karner, G. D.; Sonder, L. J.; Fuller, E. Y. y Dent, L. (1998): *Neogene Sedimentation and Tectonics in the Cibao Basin and Northern Española: An Example of Basin Evolution near a Strike-Slip-Dominated Plate Boundary*. Journal of Geology, 106, 473-494.
- Eurocode 8 (1988): *Design provisions for earthquake resistance of structures*. Part 1-1: generale rules for the representation of of seismic actions. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects.
- CEN (2004): *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*. Comité Européen de Normalisation (BS EN 1998-1:2004). 232 pp.
- CNIG (2014): *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012*. Centro Nacional de Información Geográfica. 272 pp. NIPO: 162-17-015-9 DOI: 10.7419/162.05.2017.
- Comisión Europea (2013): *Data specification on Natural Risk Zones—technical guidelines*. European Commission, Joint Research Centre, D2.8.III.12_v3.0, 135. <https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/nz>

- Franco, O. y Peña, L. (2003): *Recopilación - evaluación de los datos geotécnicos-geológicos y reconocimiento geológicos superficial de la zona urbana y peri-urbana norte de Santiago de los Caballeros, para la preparación de mapas de amenazas geológicas sísmicas*. Ayuntamiento Municipal de la Ciudad de Santiago de los Caballeros. Informe inédito, 52 pp.
- Frankel, A.; Harmsen, S.; Mueller, C.; Calais, E. y Haase, J. (2010): *Documentation for initial seismic hazard maps for Haiti*. USGS Open-File Report 2010-1067, 12 p.
- Granja Bruña, J.L.; Carbó-Gorosabel, A.; Llanes Estrada P.; Muñoz-Martín, A.; ten Brink, U.S.; Gómez Ballesteros, M.; Druet, M. y Pazos, A. (2014): *Morphostructure at the junction between the Beata ridge and the Greater Antilles island arc (offshore Hispaniola southern slope)*. *Tectonophysics* 618 (2014) 138-163.
- Granja Bruña, J.L.; Muñoz-Martín, A.; ten Brink, U.S.; Carbó-Gorosabel, A.; Llanes Estrada, P.; Martín-Dávila, J.; Córdoba, M.; Barba, D. y Catalán Morollón, M. (2010): *Gravity modeling of the Muertos Trough and tectonic implications (north eastern Caribbean)*. *Marine Geophysical Reseraches*, 31, 263-283. DOI: 10.1007/s11001-010-9107-8.
- IGME (2010): *Sondeos geotécnicos para microzonificación sísmica, Santiago de los caballeros, República Dominicana*. CAP-2585, GEOCIVIL, Noviembre 2010, 348 p.
- ISC (2013): *On-line Bulletin*. International Seismological Centre, Thatcham, United Kingdom. <http://www.isc.ac.uk>.
- Kelleher, J.; Sykes, L. y Oliver, J. (1973): *Possible criteria for predicting earthquake locations and their application for major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean*. *Journal of Geophysical Research*, 78, pp. 2547-2585.
- Lee, W.H.K; Kanamori, H.; Jennings, P. y Kisslinger C. (eds 2003): *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*. Parte 2. Academic Press. 1000 pp.
- Manaker, D.M.; Calais, E.; Freed, A.M.; Ali, S.T.; Przybylski, P.; Mattioli, G.S.; Jansma, P.E.; Prépetit, C. y De Chabaliere, J.B. (2008): *Interseismic plate coupling and strain partitioning in the Northeastern Caribbean*. *Geophysical Journal International*, 174, pp. 889-903.
- Mann, P.; Burke, K. y Matumoto, T. (1984): *Neotectonics of Hispaniola: plate motion, sedimentation, and seismicity at a restraining bend*. *Earth and Planetary Science letters*, 70, pp. 311-324.
- Mann, P.; Calais, E.; Ruegg, J.C.; DeMets, C.; Jansma, P.E. y Mattioli, G.S. (2002): *Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS Measurements and geological observations*. *Tectonics*, v. 21, n. 6, 1057, doi:10.1029/2001TC001304.
- Mann, P.; Draper, G. y Lewis, J. F. (1991): *Geologic and tectonic development of the North America-Caribbean Plate boundary in Española*. *Special Paper Geological Society of America*, 262, p. VII-XVII.
- Mann, P.; Prentice, C.S.; Burr, G.; Pea, L.R. y Taylor, F.W. (1998): *Tectonic geomorphology and paleoseismology of the Septentrional fault system, Dominican Republic*. En: Dolan, J.F. y Mann, P. (eds.): *Active Strike-Slip and Collisional Tectonics of the*

- Northern Caribbean Plate Boundary Zone*. Geological Society of America Special Paper 326 (63-124).
- Mann, P.; Taylor, F.W.; Lawrence Edwards, R. y Ku, T.L. (1995): *Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike-slip faults: an example from the northeastern Caribbean plate margin*. *Tectonophysics*, 246, pp. 1-69.
- McCann, W.R. (2006): *Estimating the threat of tsunamigenic earthquakes and earthquake induced landslide tsunami in the Caribbean*. Paper presented at NSF Caribbean Tsunami Workshop, World Scientific, San Juan, Puerto Rico.
- McNeill, D. F.; Klaus, J.S.; Evans, Ch.C. y Budd, A.F. (2008): *An Overview of the Regional Geology and Stratigraphy of the Neogene Deposits of the Cibao Valley, Dominican Republic*. En: Nehm, R.H. y Budd A.F. (eds): *Evolutionary Stasis and Change in the Dominican Republic*. *Neogene Topics in Geobiology* 30, (21-45). Springer.
- MIDAS-IPGH, en Tanner, J.G. y Shepherd J.B. (1997): *Seismic Hazard in Latin America and the Caribbean*. Vol. 1: Project Catalogue and Seismic Hazard Maps, IRDC, Ottawa, 143 pp. <http://midas.upr.clu.edu/mds-ipgh.html>
- Modaressi, H.; Foerster, E. y Mellal, A. (1997): *Computer aided seismic analysis of soils*. Proceedings of the 6th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, NUMOG VI, Montréal, Québec, Canada July 2-4.
- MOPC (2011). *Reglamento para el análisis y diseño sísmico de estructuras*. Decreto No.201-11, 24 Marzo 2011, Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 62 p.
- Nakamura Y. (1989): *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 30, 1, 25-32.
- Nazarian, S.; y Stokoe, K.H. (1984): *Nondestructive testing of pavements using surface waves*. Transportation Research Record 993, pp. 67-79.
- NOAA *Global Seismicity Catalog CD-ROM*. National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration, <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/earthqk.shtml>
- Ordaz, M.; Aguilar, A.; y Arboleda, J. (2003): *Crisis 2003 ver. 3.0.1. Program for computing seismic hazard*. Universidad de México.
- Penson, E. (1973): *El Subsuelo de la Ciudad de Santiago*. Primer Congreso Dominicano de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores, CODIA, 102 pp.
- Prentice, C.S.; Mann, P.; Taylor, F.W.; Burr, G. y Valastro, S. (1993): *Paleoseismicity of the North American – Caribbean plate boundary (Septentrional fault), Dominican Republic*. *Geology*, 21, pp. 49-52.
- Roullé, A.; Vanoudheusden, E.; Belvaux, M.; Auclair S. (2011): *Microzonificación sísmica de Santiago – Republica Dominicana. Amenaza sísmica local*. Informe BRGM/RC-59685-FR, 103 p.

- Saunders, J.B.; Jung, P.; y Biju-Duval, B. (1986): *Neogene paleontology in the northern Dominican Republic; I, Field surveys, lithology, environment, and age*. *Bulletins of American Paleontology*, 89(323), 1-79.
- Seed, H.B. e Idriss I.M. (1971): *Simplified procedures for evaluating soil liquefaction potential*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 97, n° SM9, pp 1249-1273.
- TC4-ISSMGE (Japón, 1999): *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard*. Revised edition, Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering (TC4) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Thomas, R.; Harrison, M.; Barredo, J.I.; Thomas, F.; Llorente Isidro, M.; Pfeiffer, M.; y Cerba, Otakar (2015): *Towards a cross-domain interoperable framework for natural hazards and disaster risk reduction information*. *Nat Hazards* (2015) 78:1545–1563. DOI 10.1007/s11069-015-1786-7.
- Tuttle, M.P.; Prentice, C.S.; Dyer-Williams, K; Pefra, L.R. y Burr G. (2003): *Late Holocene Liquefaction Features in the Dominican Republic: A Powerful Tool for Earthquake Hazard Assessment in the Northeastern Caribbean*. *Bulletin of the seismological Society of America*, Vol. 93, No. I, pp. 27-46.
- UNISDR 2009: *Terminología sobre el riesgo de desastres*. Estrategia Internacional Para la Reducción del Riesgo de Desastres de las Naciones Unidas. 43pp. Disponible en <http://www.unisdr.org/publications>
- Urien, P. (2010): *Mapa Geológico de la República Dominicana escala 1: 50.000, Hoja de Santiago de Los Caballeros (6074-II)*. Proyecto SYSMIN II. Dirección General de la Minería. 200 pp., 1 mapa 1:50.000.
- Wakamatsu, K. (1992): *Evaluation of Liquefaction Susceptibility based on Detailed Geomorphological Classification*. *Proceedings, Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*, Vol.B, pp. 1443-1444, 1992.
- Weichert, D. (1980): *Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70, pp. 1337-1347.
- Wells, D.L. y 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, pp. 974-1002.
- Youd, T.L. e Idriss, I.M. (Eds) (1997): *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*. Salt Lake City, UT, January 5-6, 1996, NCEER Technical Report NCEER-97-0022, Buffalo, N.Y.
- Youd, T.L. y Perkins, D.M. (1978): *Mapping of Liquefaction Induced Ground Failure Potential*. *J. GED, ASCE*, Vol.104, No.4, pp. 433-446.
- Youd, T.L. y Perkins, D.M. (1987): *Mapping of Liquefaction Severity Index*. *Journal of Geotechnical Engineering*. 113(11): 1374-1392.

- Youngs, R. R.; Chiou S.J.; Silva W. J. y Humphrey J. R. (1997): *Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes*. Seismological Research Letters, 68(1), pp. 58-73.
- Zhao, J. X.; Zhang, J.; Asano, A.; Ohno, Y.; Oouchi, T.; Takahashi, T.; Ogawa, H.; Irikura, K.; Thio, H. K.; Somerville, P. G. y 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), pp. 898-913.