

Los Terremotos, Causas, Consecuencias y ¿Cómo afrontarlos?

Palacio de
gobierno de Haití.
Foto: Osiris de León.



Por: R. OSIRIS DE LEÓN
Ingeniero Geólogo
ACADEMIA DE CIENCIAS DE LA REPUBLICA DOMINICANA

Las causas de los terremotos

El planeta tierra se formó hace unos 4,567 millones de años, a partir de una gran explosión universal que concentró una densa masa de polvo y gases, originando un planeta cuyo núcleo interior está constituido por una masa fundida e incandescente, de minerales ferro magnesianos, cuya temperatura se estima en unos 4,000 a 5,000 grados Celsius.

Los minerales derretidos, presentes en el núcleo de la tierra, pesan menos que los mismos minerales fríos, y eso les obliga a desplazarse hacia la superficie del planeta, pero en la medida en que se acercan a la superficie se enfrían, pesan más y tienden a volver hacia abajo, donde vuelven a calentarse y a pesar menos, y esto les hace volver hacia la superficie, formándose así una interminable corriente convectiva magmática que rompe la corteza terrestre en fragmentos denominados placas tectónicas, los que se desplazan lateralmente, frontalmente o subverticalmente, a una velocidad promedio de 20 milímetros por año, (el movimiento más lento se produce en el Atlántico sur a 11 milímetros por año, mientras los movimientos más rápidos se producen en Chile y Australia a 74 milímetros por año) acumulando energía elástica en los tramos bloqueados de los planos de las fallas geológicas que separan las placas tectónicas, y cuando el empuje logra superar el límite de resistencia



Edificio aplastado en el Centro de Puerto Príncipe. Foto: Osiris de León.

de la roca, el coeficiente de fricción o el bloqueo local, se produce una rotura súbita que libera ondas de compresión (P) y ondas de corte (S), capaces de viajar a través del subsuelo, estremecer fuertemente la superficie del terreno y destruir las edificaciones.

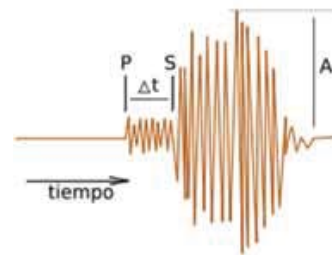
Medición de la intensidad, la magnitud y la energía del sismo

Originalmente las sacudidas sísmicas eran medidas en una escala de intensidad relativa, muy subjetiva, definida por el sacerdote, geólogo y vulcanólogo italiano Giuseppe Mercalli, la cual dependía de la respuesta de la gente y del comportamiento de los objetos y las edificaciones, iba desde intensidad 1 (sismo muy débil e imperceptible para la mayoría) hasta intensidad 12 (sismo catastrófico con destrucción total

y pocos sobrevivientes), pero en el año 1935, el físico norteamericano Charles Richter, junto al geofísico alemán Beno Gutenberg, desarrollaron y publicaron una escala logarítmica que mide la magnitud de un sismo a partir de la amplitud máxima (en milímetros) de las ondas sísmicas registradas en un sismograma, y a partir de la diferencia entre los tiempos de llegadas (en segundos) de las ondas primarias de compresión (P) y las ondas secundarias de corte (S).

$$M = \text{Log } A + 3 \text{ Log } (8\Delta t) - 2.72$$

De esa forma un terremoto de magnitud 8 es diez veces más fuerte que uno de magnitud 7, cien veces más fuerte que uno de magnitud 6 y mil veces más fuerte que uno de magnitud 5, y aunque por cada unidad de incremento en magnitud, la sacudida sísmica es 10 veces mayor, la energía liberada es 31.62 veces mayor ($10^{*1.5} = 31.62$), porque el logaritmo de la energía (Log E) es proporcional a 1.5 veces la magnitud (M). Un sismo de magnitud 7.0 equivale a 31.62 millones de toneladas de dinamita (TNT). $E = (31.62^{*7.0})/1000 = 31,622,776$.



Los daños provocados por un sismo dependen de varios factores:

1. La magnitud del sismo: Mientras mayor sea la magnitud del sismo, mayor será la sacudida sísmica, mayor será la cantidad de energía elástica liberada y mayor será el riesgo de destrucción de las estructuras vecinas construidas sobre suelos flexibles de mala calidad.

2. La ubicación del epicentro del sismo: Mientras más cerca esté ubicado el epicentro del sismo, mayor será la probabilidad de daños a las estructuras construidas sobre suelos arcillosos y arenosos, porque la energía liberada por el sismo se atenúa con la distancia recorrida por las ondas sísmicas, aunque las ondas sísmicas que viajan a través de las rocas pueden amplificarse al llegar a zonas de suelos blandos y producir grandes destrucciones a cientos

de kilómetros de distancia, como el caso de Ciudad de México, en 1985, cuyo epicentro estuvo a 330 kilómetros al noroeste de la ciudad y hubo una gran destrucción de las edificaciones construidas sobre los suelos blandos del antiguo pantano.

3. La ubicación del hipocentro: la posición del hipocentro, es decir, el punto donde se produjo la ruptura a lo largo de la falla geológica activa, incide en el nivel de daños provocados a las estructuras, ya que mientras más superficial es el sismo mayor será la cantidad de energía que llega a la superficie y mayor será el nivel de daños en las estructuras vecinas, y mientras más profundo esté ubicado el hipocentro menor será el nivel de daños a las estructuras fruto de la atenuación de las ondas elásticas de cizallamiento.

4. La direccionalidad de la falla geológica: La dirección de la falla geológica permite que una parte importante de la energía elástica liberada por el sismo viaje preferencialmente a lo largo del plano de la falla geológica responsable del sismo, afectando mayormente a las estructuras vecinas al plano de la falla, ya que el alto nivel de fracturamiento a lo largo del eje de la falla geológica permite que las ondas sísmicas de cizallamiento (Vs) viajen muy lentamente a lo largo de las rocas fracturadas y suelos vecinos, lo que produce amplificación de esas ondas sísmicas y mayores daños a las estructuras vecinas.

5. El tipo de roca o suelo: las rocas rígidas y los suelos flexibles tienen comportamientos muy diferentes cuando las ondas sísmicas de cizallamiento viajan a través del subsuelo, ya que en las rocas rígidas las ondas sísmicas de cizallamiento (Vs) viajan muy rápidamente con muy baja amplitud, mientras en los suelos flexibles las mismas ondas sísmicas de cizallamiento viajan muy lentamente, se amplifican y el suelo vibra largo rato haciendo colapsar muchas estructuras mal construidas. De ahí que el principal responsable del comportamiento sísmico de una estructura es la roca o el suelo del emplazamiento, de forma tal que estructuras malas, construidas sobre rocas buenas, como pasó en Haití, se comportan sísmicamente bien, pero estructuras aparentemente buenas, sin criterios de sismo resistencia, se comportan sísmicamente mal

cuando están construidas sobre suelos flexibles, como pasó en Haití.

6. Las características de las estructuras: el segundo responsable del comportamiento sísmico de una estructura es la propia estructura, ya que una estructura levantada sobre un suelo flexible de mal comportamiento sísmico debe ser construida atendiendo al mal comportamiento sísmico del suelo, y bajo ninguna circunstancia las construcciones levantadas sobre suelos flexibles deben ser estructuralmente similares a las estructuras levantadas sobre rocas rígidas de buen comportamiento sísmico. Al construir sobre suelos flexibles se deben evitar las edificaciones altas, las columnas aisladas susceptibles a esfuerzos cortantes y que producen efectos de pisos suaves, las columnas cortas, las columnas muy esbeltas que soportan gruesas losas de techo, las excentricidades del edificio, los cambios de rigidez entre diferentes áreas o entre diferentes niveles de pisos, los vuelos largos, las zapatas aisladas, los muros frágiles, los insuficientes refuerzos de acero, la mala distribución del refuerzo de acero, la mala articulación del refuerzo de acero, la mala calidad del concreto, el vaciado del concreto en diferentes fechas para un mismo elemento

estructural, etc. Las estructuras construidas sobre suelos flexibles y que muestren algunas de estas vulnerabilidades deben ser reforzadas para que sean sísmo resistentes.

7. La licuefacción de las arenas sueltas: Las arenas sueltas, saturadas de agua, tienden a sufrir un efecto de licuefacción al momento de ser atravesadas por las ondas sísmicas, ya que las ondas sísmicas comprimen las arenas, expulsan el agua intersticial, se pierde una parte del volumen ocupado por el agua, y el edificio construido sobre esas arenas se hunde parcialmente o se vuelca. En estos casos lo recomendable no es el reforzamiento de la estructura porque ello no resuelve el problema del suelo, sino el mejoramiento de las condiciones del suelo, mediante la remoción del horizonte arenoso de mal comportamiento sísmico, o mediante la inyección de una lechada de cemento de rápido fraguado bajo agua, previo a la construcción de la obra. Cuando un ensayo de refracción sísmica sobre estas arenas muestra un efecto de hidro P, es decir, una velocidad de ondas P del orden de 1,550 m/seg., ello sugiere que las ondas P han viajado a través del agua y no a través de la arena, lo que obliga a tener cuidado en la construcción de la obra.



Roca caliza coralina aflorante en Santo Domingo, San Pedro, La Romana y Bávaro.

8. La tixotropía de algunas arcillas: algunas arcillas saturadas de agua tienen la particularidad de comportarse casi como un líquido al momento de una fuerte sacudida sísmica, en un denominado efecto de tixotropía, el cual puede hacer colapsar la estructura durante un terremoto, colapso que no se debe a una mala calidad de la estructura, sino a una mala respuesta del suelo arcilloso con tendencia a la tixotropía. En las zonas de riesgo sísmico, las arcillas tixotrópicas deben ser removidas antes de una construcción para evitar el alto riesgo de colapso al momento de un sísmo de gran magnitud.

Historial sísmico de La Hispaniola

El historial sísmico de nuestra isla Hispaniola registra un fuerte terremoto el 2 de diciembre de 1562, el cual destruyó a Santiago, La Vega y Puerto Plata; un gran terremoto el 9 de mayo de 1673 que afectó a Santo Domingo; un tremendo terremoto el 16 de octubre de 1751, con un posterior maremoto, que destruyó a la ciudad de Compostela de Azua; y otro terremoto el 11 de febrero de 1783, el cual afectó a Santiago de los Caballeros.

Un tremendo terremoto ocurrió el 7 de mayo de 1842 el cual mató a unas 5,000 personas en Cabo Haitiano, Mole de San Nicolás y Port de Paix, afectando también a Santiago de los Caballeros y generando un maremoto que entró en Monte Cristi y Manzanillo. Este terremoto obligó a una parte importante del ejército haitiano a volver a su país para trabajar en las labores de rescate y reconstrucción de las ciudades afectadas en la costa norte de Haití, lo cual fue aprovechado por los independentistas dominicanos para declarar la Independencia dominicana el 27 de febrero de 1844.

El 23 de septiembre de 1887 la isla sufrió un terremoto que afectó a Mole de San Nicolás, y en junio de 1904 otro gran terremoto produjo daños en Samaná, Sánchez y Cabo Haitiano.

El 4 de agosto de 1946 la región nordeste de la isla sufrió el sísmo de mayor intensidad que registra la historia, alcanzando una magnitud de 8.1 en la escala de Richter y produciendo un maremoto que arrasó la comunidad de Matanzas, al sureste de Nagua, matando allí unas 1,800 personas, aunque también afectó gran parte de la costa noreste de la isla, incluyendo a Cabrera, Miches y Sabana

de la Mar; y cuatro días después, el 08 de agosto de 1946, se produjo una réplica de magnitud 7.6 Richter.

El 22 de septiembre de 2003, las ciudades de Puerto Plata y Santiago fueron sacudidas por un sísmo de apenas 6.5 Richter, cuya energía liberada (equivalente a 5 millones de toneladas de dinamita) fue apenas el 15% de la energía liberada por el reciente sísmo de Puerto Príncipe, y, no obstante ser un sísmo menor, aplastó la escuela Gregorio Urbano Gilbert, destruyó varios centros comerciales, hoteles y viviendas de la ciudad de Puerto Plata, y agrietó brutalmente el hospital regional José María Cabral y Báez, de la ciudad de Santiago de los Caballeros, así como cientos de viviendas construidas sobre suelos flexibles de mala respuesta sísmica.

El 12 de enero de 2010 un terremoto de magnitud 7.0 en la escala de Richter, con epicentro a unos 15 kilómetros al suroeste del centro de Puerto Príncipe, y con hipocentro a unos 10 kilómetros de profundidad, destruyó gran parte de la zona sur de la ciudad de Puerto Príncipe, capital de la hermana República de Haití, provocando cerca de 316,000 muertos, unos 350,000 heridos, 300,000 viviendas destruidas, 30,000 comercios colapsados, 5,000 escuelas aplastadas y cerca de un millón y medio de damnificados, siendo esta la mayor tragedia sísmica sufrida por el planeta en los últimos 50 años, y el peor desastre que hayamos sufrido en nuestra Hispaniola a causa de las fuerzas de la naturaleza, desastre que tuvo sus causas en cuatro factores: la corta distancia epicentral, la escasa profundidad hipocentral, las malas respuestas sísmicas de los suelos flexibles de Puerto Príncipe, y las malas respuestas estructurales de muchas edificaciones mal construidas sobre suelos flexibles de mala respuesta sísmica.

Entre el 05 y el 24 de enero de 2012 ocurrieron 10 temblores de tierra, de magnitud variable entre 4.2 y 5.3 Richter, ubicados en las vecindades de San José de Ocoa, en las cercanías de la isla Saona y en la zona sur de Río San Juan, los que de nuevo provocaron agrietamientos en escuelas, hospitales y residencias construidas sobre suelos flexibles y provocaron un extraordinario pánico en una población dominicana carente de la debida información sobre los sísmos y las malas respuestas sísmicas de las obras mal construidas sobre suelos flexibles.



¿Cómo afrontar un terremoto?

Para afrontar de manera exitosa un terremoto lo primero que debemos tomar en cuenta es lo que dice San Mateo en el Capítulo 7:24-27: el hombre prudente edifica su casa sobre la roca, y el hombre insensato edifica su casa sobre la arena, pues las construcciones levantadas sobre roca tienen un excelente comportamiento al momento de un terremoto y muy pocas sufren grietas menores, pero las edificaciones construidas sobre suelos arcillosos o arenosos tienden a colapsar fruto de las bajas velocidades de propagación de las ondas sísmicas de corte (ondas S), lo cual produce amplificación del espectro sísmico y rotura brusca de las columnas de las edificaciones.

Al revisar las edificaciones que colapsaron en Puerto Príncipe el 12 de enero de 2010 y los suelos del área, fue evidente que los colapsos se presentaron en las edificaciones levantadas sobre los suelos arcillosos flexibles de la llanura sur y occidental de la ciudad, sobre los suelos margosos flexibles de las colinas del área sur, sobre los suelos granulares sueltos, de origen coluvial, de las colinas del área sur, y sobre los suelos arcillosos de la llanura de la ciudad de Leogane, apreciándose que en esta ciudad,

situada al oeste de Puerto Príncipe, colapsó el 90% de las edificaciones levantadas sobre la llanura arcillosa costera.

Paradójicamente, al revisar la zona sur de Petion Ville, nos encontramos con una roca caliza crema, de la formación Sombrero, muy bien estratificada, y de excelente calidad, donde las edificaciones no sufrieron ningún tipo de daños, ni siquiera grietas en las edificaciones de gentes humildes, levantadas sin ningún tipo de criterio ingenieril, y donde, de manera extraña, los ciudadanos primero construyen un pequeño muro de mampostería, de uno a dos pies de altura, con piedras y cemento de muy mala calidad, y sobre este muro levantan una pared de bloques, usando mortero malo, y sin varillas, y con muy pocas columnas. Esas edificaciones debieron haberse derrumbado, pero no fue así porque la roca caliza impidió que el espectro sísmico se amplificara y entrara a las estructuras para dañarlas.

Principales lineamientos tectónicos de La Hispaniola y aceleraciones esperadas en caso de un terremoto. (R. Osiris de León, 2012).

La inspección de las edificaciones colapsadas y las no colapsadas en Haití, nos dice que construcciones robustas, que ingenierilmente debieron haber resistido, colapsaron dramáticamente al romperse brutalmente todas sus columnas, como resultado de estar levantadas sobre suelos arcillosos flexibles, mientras que edificaciones en condiciones precarias, levantadas artesanalmente sobre las rocas calizas del lado sur, en el mismo eje de la falla tectónica que generó el terremoto, y a muy poca distancia del epicentro, no sufrieron ningún tipo de daños, ni siquiera grietas menores.

La educación sísmica en el Cibao y la preparación

Las ciudades y comunidades del Cibao están levantadas sobre suelos arcillosos de muy mal comportamiento

sísmico y debemos vernos en el espejo de lo ocurrido recientemente en Haití y comenzar a construir sobre roca firme.

El país debe abocarse a un inmediato programa de educación de toda la población, a fin de que cada ciudadano, especialmente los que viven en El Cibao, estén familiarizados con el riesgo sísmico regional, con la debilidad de sus suelos y la vulnerabilidad de sus edificaciones, mayormente sus escuelas, sus hospitales y a las edificaciones levantadas en las cercanías de las fallas sísmicamente activas, principalmente en los bordes norte y sur del valle del Cibao.

Las escuelas públicas y privadas de esta región debían impartir la asignatura “Riesgo sísmico y desastres naturales”; las iglesias debían recordar en sus prédicas semanales que el libro del Apocalipsis nos habla de los terremotos y de sus efectos “y hubo un gran terremoto y la décima parte de la ciudad se derrumbó”, y que en tal virtud debíamos



Viaducto de Hanshin, Kobe, Japón, colapsado con el sismo de Kobe en 1995. Foto: Fuente externa.

prepararnos para el día en que llegue ese terremoto. Las emisoras de radio y de televisión, con el apoyo de las empresas públicas y privadas, debían incluir mensajes promocionales que eduquen a la población respecto al riesgo sísmico y sobre los criterios para identificar los lugares más seguros en caso de terremotos, especialmente las áreas donde se genere un triángulo de vacío que proteja la vida:

Si al momento de un terremoto usted está sobre la cama tírese instantáneamente al piso, al lado de la cama, no debajo; si usted está en la bañera tírese instantáneamente al piso, al lado afuera de la bañera; si está en la cocina tírese instantáneamente al piso, al pie del gabinete de la cocina; si usted está en la oficina, tírese de inmediato al piso, al pie del escritorio; en fin, tírese rápido al piso, al pie del objeto más grande y más sólido que haya cerca de usted,

pues si se cae la losa del techo o la pared lateral, caerá sobre el objeto y generará un triángulo de vacío donde estará usted protegido. También mantenga dos botellas de agua en cada habitación, pues en caso de sobrevivir a un sismo, el agua le ayudará a mantenerse hidratado hasta que le rescaten de los escombros.

Recordemos que en el terremoto de Haití colapsaron unas 5,000 escuelas, de ahí que todas las edificaciones públicas y privadas que albergan a muchas personas, como escuelas, liceos, universidades, hospitales, estadios, iglesias, ayuntamientos, centros comerciales, centros de convenciones, zonas francas, etc., debían ser revisadas de inmediato por la Oficina Nacional para la Evaluación Sísmica de la Vulnerabilidad de las Infraestructuras y Edificaciones (ONESVIE), para reforzarlas adecuadamente, porque todas han sido construidas sin criterios sísmo resistentes. En este país no se hacen estudios dinámicos de suelos, y

las empresas, al igual que el Ministerio de Obras Públicas, sólo se conforman con unos sondeos mecánicos.

Ya sabemos que la mayor parte de la energía elástica de un terremoto viaja en forma de ondas de corte y esa es la energía que produce el cizallamiento y el colapso de las columnas. A menor velocidad de propagación de las ondas sísmicas de corte, mayor riesgo de que las columnas de la edificación colapsen brutalmente, y en los suelos cohesivos las ondas sísmicas de corte viajan muy lentamente, a veces a menos de 200 metros por segundo.

Debemos revisar el nuevo código de construcción sísmo resistente, tomando en consideración la reciente experiencia del sismo de Haití, ya que después de esa catástrofe muchos criterios constructivos deben ser cambiados diametralmente.

En las escuelas, universidades, iglesias, hospitales, centros comerciales, ayuntamientos y empresas privadas debían realizarse simulacros de evacuación, cada tres meses, para crear una cultura de adecuada respuesta al momento de un terremoto, y los organismos de socorro, como defensa civil, cruz roja y cuerpo de bomberos, debían entrenarse permanentemente en operaciones de rescate entre escombros, disponer de micro cámaras de video instaladas en cables largos y flexibles, adquirir micrófonos y geófonos de alta sensibilidad para detectar voces, gemidos, ruidos o movimientos bajo los escombros y así poder responder adecuadamente en los momentos posteriores al terremoto.

Los hospitales y clínicas privadas debían almacenar suficiente sangre, suero hidratante, materiales antisépticos, antibióticos e inyecciones antitetánicas para poder responder con prontitud, frente a la gran cantidad de heridos que usualmente produce un terremoto.

Las empresas constructoras y vendedoras de viviendas debían ser obligadas a proveerse de una póliza de seguros contra terremotos, antes de vender las viviendas, como forma de proteger la inversión de los ciudadanos que compran de buena fe, sin conocer hasta qué punto la vivienda adquirida es segura en caso de terremoto.

Eso obligaría a estas empresas a realizar todos los estudios dinámicos de los suelos y a utilizar verdaderos diseños sísmo resistentes, considerando las reales condiciones de los suelos flexibles del país y el alto riesgo sísmico del

Cibao y la costa Norte, al igual que los suelos flexibles de las zonas norte y oeste de Santo Domingo. Las empresas aseguradoras requerirían esas garantías técnicas antes de emitir la póliza de seguros contra terremotos.

El Ministerio de Obras Públicas debía obligar a los ingenieros a someter tres presupuestos para cada proyecto de edificación, uno con el tamaño solicitado y diseño sísmo resistente, otro del tamaño solicitado y sin diseño sísmo resistente, y otro de menor tamaño, con diseño sísmo resistente y costo similar al de la edificación sin diseño sísmo resistente. De seguro que la gente va a preferir una edificación más pequeña, que sea resistente a los terremotos, en lugar de una edificación más grande, sin diseño sísmo resistente, la cual si está sobre suelo podría colapsar al momento de un gran terremoto.

El gobierno debía adquirir al menos 500,000 casas de campaña para almacenarlas y así tener capacidad para albergar provisionalmente a las personas que queden sin hogares; y las presas de Tavera y Bao, ubicadas al sureste de Santiago, debían ser revisadas y estudiadas minuciosamente, y modelar su comportamiento frente a una alta excitación sísmica cuyo epicentro se encuentre en la zona vecina, ya que ambas presas están construidas con materiales arcillosos flexibles posicionados sobre una falla sísmicamente activa, y en caso de rotura sísmica de una de ellas, o de ambas a la vez, la inundación del río Yaque podría transportar más de 100,000 metros cúbicos de agua por segundo y eso sería catastrófico para las comunidades de Baitoa, Sabana Iglesia y para todas las viviendas ubicadas en las márgenes del río Yaque del Norte.

Iglesia muy dañada en el centro de Puerto Príncipe.
Foto: Osiris de León.



¿Qué hacer en ANTES de un terremoto?

- Decida cómo y dónde se reunirá su familia, si llegaran a separarse.
- Identifique los objetos más grandes y más fuertes presentes en cada espacio de su casa u oficina y que sean seguros.
- Ubique los lugares peligrosos: ventanas, espejos, objetos colgantes y muebles altos que no estén bien sujetos.
- Haga simulacros: practique la ocurrencia de un sismo y colóquese usted y su familia en los lugares que ha determinado son seguros.
- Mantenga a mano una lista de los teléfonos de emergencias, incluyendo números de celulares.