

Aspectos científicos y lecciones para Colombia luego del sismo de Tohoku, Japón, en marzo 11 de 2011 (Mw 9.0)

Scientific aspects and lessons for Colombia following the Tohoku, Japan, earthquake on March 11, 2011 (Mw 9.0)

Jhon Jairo Sánchez Aguilar¹ & Jorge Enrique Clavijo Ramírez²

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia,

Cra. 30 No 45-03, Edif. Manuel Ancizar, Bogotá, Colombia, Fax: 57+ 1+ 3165390

¹jjsancheza@unal.edu.co

²jeclavijor@unal.edu.co

Jhon Jairo Sánchez Aguilar & Jorge Enrique Clavijo Ramírez (2011): Aspectos científicos y lecciones para Colombia luego del sismo de Tohoku, Japón, en marzo 11 de 2011 (Mw 9.0). GEOLOGÍA COLOMBIANA, Edición Especial, 36 No. 1, pp 23-36

Manuscrito recibido: 20 de mayo 2011; aceptado: 9 de agosto 2011

Resumen

Se describen los efectos superficiales y ambientales del terremoto de Tohoku, Japón (marzo 11, 2011, Mw 9.0) y el impacto local y global de la sacudida sísmica y tsunami subsecuentes. Este evento, sin precedentes implicó principalmente: sacudida sísmica que superó 2.9 g en algunas áreas, tsunamis con olas > 25 m e inundación > 5 km en varias prefecturas, desplazamientos estáticos métricos, ondas visibles en el suelo, agrietamientos extensos, vórtice en aguas superficiales, oscilaciones globales centimétricas y cambios en la inclinación del eje terrestre. Los efectos superficiales ocasionaron el mayor desastre después de la segunda guerra mundial: cifras combinadas de fatalidades y desaparecidos > 28.000, daños severos a infraestructuras nucleares y costos de recuperación que superan US\$300.000 mil millones. Estos efectos en el país más industrializado invitan a reflexionar cuidadosamente acerca de la perspectiva colombiana y a concluir que: (1) es importante hacer preparativos a nivel comunitario y personal, revisar y ampliar los planes de prevención y mitigación del riesgo, trabajar en la implementación de altos estándares para las construcciones y educarnos respecto a las amenazas geológicas para responder apropiadamente durante situaciones de emergencia y (2) eventos geológicos grandes como los mega sismos requieren de la cooperación multinacional e interdisciplinaria para su estudio e investigación.

Palabras clave: Sismo de Tohoku, sacudida sísmica, tsunami, Colombia, prevención y mitigación.

Abstract

We describe the surface and environmental effects from the Tohoku, Japan, earthquake (march 11, 2011, Mw 9.0) and the local and global effects of subsequent seismic shaking and tsunami. This unprecedented event implied mainly: shaking over 2.9 g in some areas tsunami waves exceeding 20 m and 5 km inundation in several prefectures, cm-level static displacements, visible ground waves, extensive surface cracks, a shallow water vortex, cm-level global surface oscillations and changes in the Earth's figure axis. The surface effects resulted in the largest disaster after WWII: a combined dead and unaccounted for count in excess of 28,000, severe damage to nuclear facilities and recovery costs over \$US 309 billion. These effects in the most industrialized nation call to carefully reflect on the Colombian perspective. We conclude that is important to make preparations both at the community and personal level: to review

and expand current disaster prevention and mitigation plans, to work in the implementation of high design and building standards and to educate ourselves on geological hazards to be able to appropriately respond during emergency situations.

Key words: Tohoku earthquake, tsunami, seismic shaking, Colombia, prevention and mitigation.

INTRODUCCIÓN

El 11 de marzo de 2011 ocurrió el terremoto de Mw = 9.0 en la región de Tohoku, Japón, con epicentro a 130 km al este de la ciudad de Sendai, como consecuencia de ruptura a lo largo de la interface entre las placas Pacífica y Norteamericana (Figura 1). Aunque la magnitud de Richter es una medida importante del tamaño de un sismo, particularmente para el público en general, el tamaño del sismo se determina de forma más precisa por medio del llamado momento sísmico M_0 , el cual es geológica y físicamente más significativo, porque es proporcional al producto de la dislocación o deslizamiento en la falla (D), al área de la falla que desliza (S) y a la rigidez de las rocas (μ), es decir, $M_0 = \mu DS$. El momento sísmico se mide en dinas.cm y para el sismo de Tohoku, el momento sísmico estimado es de $\sim 5.31 \times 10^{29}$ dinas.cm. Así pues en la llamada escala de magnitud de momento sísmico $M_w = \log(M_0)/1.5 - 10.73$ (Kanamori 1977), el tamaño del sismo es $M_w \geq 9.0$. La radiación de ondas sísmicas se originó por ruptura de una falla con aproximadamente 500 km de longitud y al menos 50 km de ancho la cual al desplazarse perturbó también el fondo del océano, produciendo el fenómeno conocido como tsunami.

El tsunami es en realidad una serie de olas producidas por perturbación grande y súbita del agua durante terremotos, erupciones volcánicas, impactos de asteroides y deslizamientos que afecten lagos o el océano. En el caso de terremotos en zonas de subducción la perturbación viene desde abajo y una vez producido el desplazamiento de la columna de agua arriba del epicentro, se generan olas en el mar que se expanden en todas direcciones. Cuando se propagan en mares profundos y amplios, las olas de tsunami no tienen amplitudes significativas, usualmente decenas de cm, pero al acercarse a las costas, donde la profundidad del agua disminuye, la disminución de velocidad es compensada por un aumento significativo en la altura de la ola, llegando a presentarse como muros de agua de varios metros de altura que tienen capacidades de impacto e inundaciones simplemente devastadoras. En virtud a su longitud de onda, las olas de tsunami

pueden viajar a increíbles velocidades promedio de ~ 800 km/h (\geq a un jet comercial) y obviamente arriban primero a las costas localizadas cerca al epicentro del sismo, usualmente entre 15 y 30 minutos después. Las olas de tsunami pueden propagarse por toda la cuenca oceánica en cuestión (en este caso, el océano Pacífico) atenuando algo su energía, aunque no mucha, y aunque las alturas de olas son mucho menores lejos del epicentro, pueden verse aumentadas por efectos locales como la configuración del fondo del mar (batimetría) y la forma de la costa.

Método y datos

Para recopilar la información sobre aspectos científicos del sismo de Tohoku se recurrió principalmente a consulta a través de Internet, dado que el sismo es de ocurrencia reciente y aún no hay muchas publicaciones relacionadas. Sin embargo, todas las fuentes consultadas son autoritativas y los datos, cálculos y modelos son proporcionados por investigadores de trayectoria en universidades e institutos acreditados. Ejemplos de los datos y su fuente son el catálogo de localizaciones de la secuencia sísmica, proporcionado por National Earthquake Information Center-NEIC (USGS 2011), la determinación del mecanismo focal y el tamaño de los sismos por parte de Global Centroid-Moment-Tensor Project-GCMT (GCMT 2011). Las descripciones de efectos superficiales están basadas en datos de instituciones como National Aeronautics and Space Administration-NASA y National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention-NIED (NASA 2011; NIED 2011). Las descripciones de efectos ambientales fueron recopiladas de agencias informativas mundialmente reconocidas como Associated Press, Reuters, y periódicos como The New York Times (AP 2011; Reuters 2011; The New York Times 2011). Los datos de impacto económico y social provienen del World Bank (World Bank 2011) y United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs-OCHA (UN 2011). En cada caso los autores dan los créditos apropiados por información o datos.

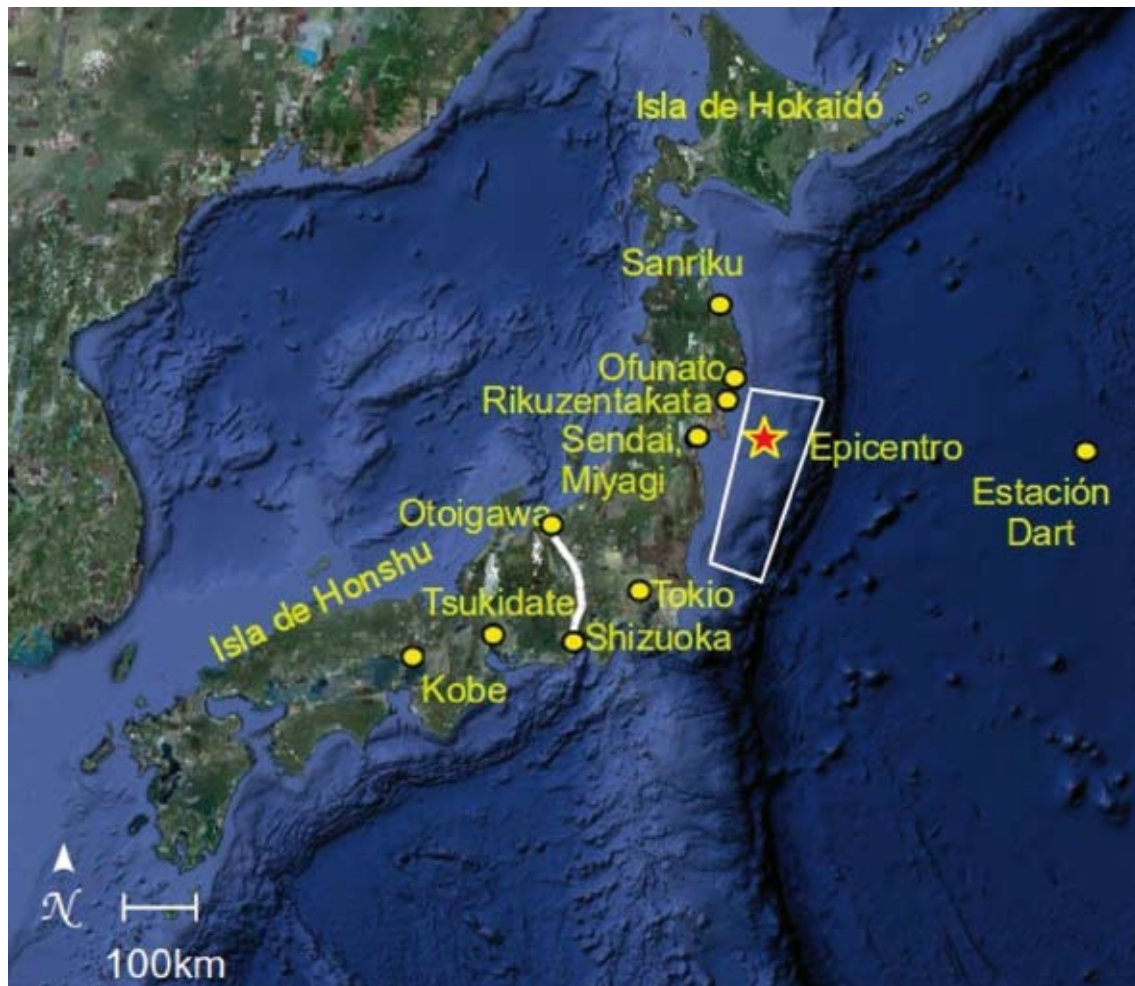


Figura 1. Mapa de Japón. Estrella = epicentro del sismo principal. Polígono = zona de ruptura. Línea blanca continua = Línea Tectónica Itoigawa-Shikuoka. Los círculos amarillos marcan las localidades mencionadas en el texto.

RESULTADOS

La secuencia sísmica

La actividad reciente en Japón incluyó una secuencia sísmica completa, con un precursor de $M_w = 7.3$ ocurrido en marzo 9 (identificado como un sismo principal, pero re-evaluado posteriormente a precursor) y que incluyó una corta sucesión de sismos con magnitudes en el rango 4.2-6.0. El sismo principal ocurrió en marzo 11 a las 5:46 UT (2:46 p, hora local) con epicentro a 130 km al este de la ciudad de Sendai, prefectura de Miyagi, en la región de Tohoku. La determinación preliminar indicaba una magnitud $M_w = 8.9$ (USGS 2011), pero la

revisión posterior de formas de onda permitió establecer un tamaño mayor, con un momento sísmico total de 5.31×10^{29} dina.cm (GCMT 2011), indicando que el sismo alcanzaba una magnitud $M_w = 9.0$ y ubicándolo como el quinto sismo más grande del registro instrumental (IRIS 2011). La actividad posterior se caracterizó por una rápida e intensa sucesión de sismos, iniciando con una réplica temprana de magnitud $M_w = 7.9$ ocurrida sólo 30 minutos después del sismo principal. La Figura 2 muestra la evolución temporal de la secuencia sísmica de Tohoku. La frecuencia de ocurrencia de réplicas se caracterizó por un comportamiento temporal acorde con ley de Omori, relación empírica que establece que la frecuencia de réplicas decrece con el recíproco del tiempo luego del sismo principal (Omori 1894; Utsu

1961, Utsu et al. 1995). De igual manera, la réplica mayor cae dentro de la predicción de la ley de Båth, que establece que la diferencia en magnitud entre un sismo principal y su réplica más grande es aproximadamente constante (típicamente 1.1-1.2), independientemente de la magnitud del sismo principal (Båth 1965, 1966; Richter 1958).

EL SISMO Y SU ORIGEN

El epicentro fue localizado a 129 km al este de Sendai y 373 km al noreste de Tokio en las coordenadas 38.322°N y 142.369°E, con foco a 24 km de profundidad (USGS 2011; ERI 2011). El mecanismo focal es compatible con ruptura a lo largo de una falla inversa con la siguiente orientación $193^\circ < \phi < 202^\circ$, $9^\circ < \delta < 14^\circ$, y $81^\circ < \lambda < 94^\circ$, donde ϕ , δ y λ son el rumbo, buzamiento y ángulo de deslizamiento, respectivamente, de acuerdo a las

determinaciones de varias agencias (USGS 2011; ERI 2011; GCMT 2011). Estos parámetros implican una falla sub-horizontal, con eje de presión en dirección casi E-W. La distribución de réplicas y modelos basados en sismología y GPS indican una falla de aproximadamente 500 km × 200 km, con ruptura bilateral al norte y sur del epicentro y dislocaciones que en lugares excedieron 50 m, concentrada en la región del plano de falla alrededor del epicentro (Simons et al. 2011; Sato et al. 2011; Wei et al. 2011; Romano et al. 2011). Los cálculos de evolución temporal de la fuente indican que la ruptura principal duró entre 150 y 200 s, con variaciones espaciales en fuentes de radiación sísmica de alta frecuencia (Ide et al. 2011; Meng and Ampuero 2011; Kiser and Ishii 2011). Algunos modelos indican que la velocidad de ruptura progresó lentamente hacia el noreste a velocidades de

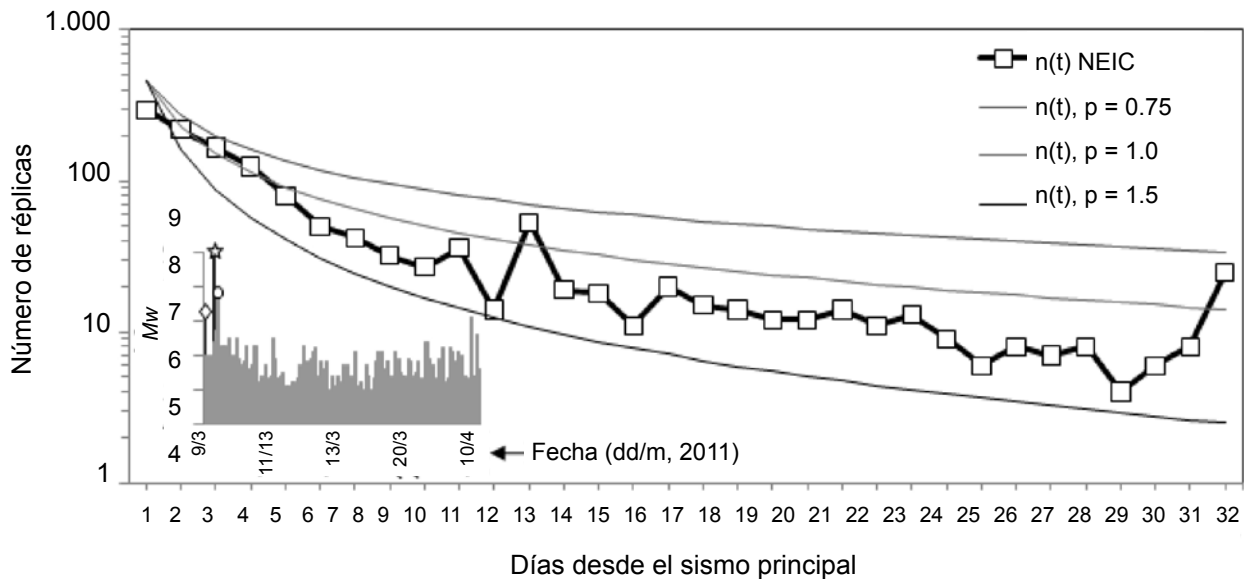


Figura 2. Evolución temporal de la secuencia sísmica de Tohoku. Cuadros blancos: número de réplicas $M_w > 4.0$ por día después del sismo principal (09/03/2011-11/04/2011). Las líneas de colores negro, verde y rojo muestran la predicción de una ley de tipo potencial similar a la ley modificada de Omori $n(t) = k/(t+c)^p$, donde $n(t)$ es el número de réplicas en un día t determinado, k es una constante de amplitud, c es el parámetro time-offset (aquí asumido casi igual a cero), y p es la constante que modifica la ley de Omori. Usualmente $0.75 < p < 1.5$. La ocurrencia de réplicas es aproximadamente regular hasta el día 9, donde oscila por unos días para luego estabilizarse. El incremento en el número diario de réplicas al final de la gráfica se debe a la secuencia de una réplica grande ($M_w 7.1$, abril 7). El inserto muestra la evolución del tamaño de los sismos en la secuencia con respecto al tiempo. Líneas negras con símbolo: precursor (diamante), sismo principal (estrella) y réplica mayor (círculo). Líneas grises: otros sismos en la secuencia. La magnitud de la réplica mayor es $M_{w\text{réplica mayor}} = 9.0 - 1.1 = 7.9$, de acuerdo a la relación empírica de Båth. Datos: NEIC.

1,0-1,5 km/s y luego hacia el suroeste a velocidades normales de 2,5-3,0 km/s (Wang and Mori 2011).

EFFECTOS SUPERFICIALES Y AMBIENTALES

La súbita actualización de movimiento acumulado durante siglos en la zona acoplada entre las placas Pacífica y Norteamericana a la latitud de la ruptura, produjo sacudida sísmica intensa que estaba en el rango 0.05 g – 2.9 g en la zona norte de la isla de Honshu. La aceleración máxima fue detectada en la estación Tsukidate, a 183 km del epicentro (aceleración máxima = 2,933 gal ~2.9 g, Nied 2011). Gran parte de la isla de Hokaido, al norte de la ruptura, también experimentó aceleraciones significativas. Los desplazamientos dinámicos del suelo durante el terremoto excedieron 200 cm cerca a la zona epicentral y excedieron 50 cm a lo largo de 400 km de la costa de Honshu. Estos datos son consistentes con fotos y reportes de testigos quienes describieron ondas visibles en el suelo en la región epicentral (Figura 3). Las aceleraciones y desplazamientos decaen súbitamente al sur y occidente de la línea tectónica de Itoigawa-Shizuoka (Figura 1), implicando que las ondas se atenuaron fuertemente en ese rasgo estructural (Eri 2011). Los datos en redes de estaciones de GPS como GEONET, indican que la región de la isla de Honshu cerca al epicentro se desplazó de manera permanente

al menos 6 m abajo y al sureste (ARIA Project-JPL and Caltech 2011; Yokota 2011). Las medidas de posición del piso oceánico y de un punto de referencia submarino indican impresionantes desplazamientos de 24-31 m hacia el este-sureste- a 100-.

Los espectros de respuesta calculados con datos de movimiento fuerte en diferentes regiones, muestran que en Tokio la amplitud espectral alcanzó niveles moderados de ~40cm/s en una amplia banda de períodos entre 0.5 y 20s, lo cual produce afectación menor a múltiples tamaños y configuraciones de edificaciones, incluyendo casas de madera (<0.5s), edificios pequeños (~1s) y rascacielos (varios segundos) (Furumura y Takemura, 2011). Cerca a la zona epicentral, el nivel de respuesta espectral alcanzó valores equivalentes a 100 cm/s también en un amplio rango de períodos. El daño por sacudida sísmica a múltiples infraestructuras fue evidente en un amplio sector de la isla de Honshu. La sacudida sísmica también produjo variaciones de tipo ambiental: agrietamiento de dimensiones métricas en la región epicentral, licuefacción y perturbación de la circulación marina superficial en forma de un vórtice de diámetro hectométrico.

Los sismos grandes en zonas de subducción pueden cambiar levemente la geometría del planeta. Durante el sismo de Tohoku los efectos incluyeron: incremento global de 0.2 mm en el nivel medio del mar causado



Figura 3. Evidencia de ondulaciones y desplazamientos métricos en el suelo durante el sismo de Tohoku. Foto: G-News

por la elevación del piso oceánico (Bilham 2011), desplazamiento de 17cm en la inclinación del eje de figura terrestre, cambio en la velocidad de rotación del planeta, acortando la duración del día en $1.8\mu s$ (NASA 2011), desplazamientos cíclicos de varios centímetros producidos en la parte externa del globo debido al paso de las ondas superficiales y las vibraciones de orden planetario debidas a la excitación de los modos esferoidales de muy largo período, como OS2 (el llamado modo football), con período de 54 minutos y OS0 (modo balloon) con período de 20 minutos y cuya amplitud inicial se habrá atenuado en un 90% sólo hasta mayo de 2011 (Van Camp and Rivera 2011).

El tsunami

Las olas de tsunami se propagaron velozmente, arribando a la estación boya DART 21418, ubicada a ~700 km al este de la zona epicentral 25 minutos después del origen del sismo con alturas cercanas a 2 m. En ciudades muy afectadas como Ofunato la primera ola arribó entre 20 y 25 minutos después del sismo (Fujii y Satake 2011) con alturas que excedieron 20 m como resultado de efectos de amplificación local debido a la forma de la costa (JSCE 2011). En localidades muy afectadas como la prefectura de Miyagi, la inundación alcanzó hasta 5km tierra adentro en una franja paralela a la costa mayor a 84km. Los datos de boyas y mareógrafos indican que el tsunami se propagó por toda la cuenca del Pacífico, causando afectación en algunas zonas donde la amplificación local es un factor, como en la ciudad de Crescent City, California, donde la primera ola arribó 9 horas después del sismo con alturas cercanas a 2 m (Noaa 2011).

Aspectos sorprendentes de los efectos del sismo y el tsunami

Aunque de manera general se aceptaba que los mega sismos en zonas de subducción ocurrían donde la placa oceánica era relativamente joven, esta noción comenzó a ser rebatida luego del sismo de Mw 9.1 en 2004 en Sumatra. Evidentemente el reciente terremoto ocurrió en una de las regiones del planeta donde el piso oceánico es tan antiguo como puede llegar a ser, aproximadamente 140 millones de años (NGDC 1996), por tanto el sismo de Tohoku representa el cambio de un paradigma geológico y debemos comenzar a reevaluar y estudiar con más detalle aquellas regiones del planeta que eran concebidas como incapaces de producir tal acumulación de movimiento

y liberación de energía, porque tal presunto ya no es aceptable (Monastersky 2011).

Aunque la zona de subducción en Japón es símicamente muy activa y este país ha experimentado las consecuencias de sismos y tsunamis destructivos en el pasado (Tabla 1), el sismo de Tohoku no tiene precedentes en la historia reciente de Japón porque la mayoría de sismos y tsunamis grandes han ocurrido en otras regiones del planeta: Chile, 1960 (Mw 9.5) y 2010 (Mw 8.8); Alaska (1964, Mw 9.2); Indonesia (2004, Mw 9.1); Rusia (1952, Mw 9.0) y en la frontera Colombo-Ecatoriana (1906, Mw 8.8), de manera que no es fácil poner en perspectiva lo ocurrido en el país asiático.

Japón ha implementado los sistemas de monitoreo de terremotos y deformaciones terrestres más sofisticados del mundo, allí la investigación en sismología ha sido la base para descubrimientos y formulaciones muy importantes (en múltiples áreas como el diseño de estructuras sismo-resistentes y tsunami-resistentes y la predicción y pronóstico de sismos) y lidera en la aplicación y establecimiento de programas de prevención y mitigación de las consecuencias de eventos geológicos como los sismos y tsunamis. No obstante, los efectos del sismo y el tsunami excedieron por mucho las medidas de preparación. En localidades como Rikuzen-Takata (Prefectura de Iwate) más del 80% de las casas fueron devastadas por el tsunami, lo cual impresiona, dado que los preparativos para tsunamis incluían un muro de contención de 6.5 m de altura. En la población de Minami-Sanriku (Prefectura de Miyagi) donde el 70% de las casas fueron destruidas, los reportes indican que el tsunami fue mucho más alto que el muro de contención de 8m y que aunque el plan de prevención de desastres estaba diseñado para una ola de 6.5 m, el tsunami del 11 de marzo pudo exceder los 15 m (UN, 2011).

La sacudida sísmica intensa y el impacto del tsunami desencadenaron simultáneamente colapso de infraestructuras, inundaciones, incendios, pérdidas de miles de vidas humanas, interrupción de los servicios básicos (acueducto, energía eléctrica, comunicaciones), emergencia por posible radiación ionizante, y afectación a la economía global, por lo que Japón atravesó la crisis más grande desde la segunda guerra mundial y de manera preliminar se estimó que los costos de la crisis fueron superiores a 235.000 millones de dólares e incluso alcanzaron los 300.000 millones de dólares (UN 2011; The World Bank 2011). En términos de vidas

humanas las cifras indican más de 28.000 fatalidades (USGS 2011). Las compañías aseguradoras obviamente enfrentarán el reto de cubrir muchas pólizas por bienes asegurados que fueron destrozados y los estimados iniciales oscilan entre 15.000 y 35.000 millones de dólares para pagar sólo bienes afectados por la sacudida sísmica, sin incluir los daños por incendios subsecuentes, tsunami, deslizamientos o accidentes nucleares.

Expectativas frente a sismos y tsunamis

Dada la tradición milenaria en cuanto a sismos y tsunamis en Japón (la palabra tsunami de hecho es de origen Japonés, significa “ola de puerto”) y la calidad y cantidad de instrumentación (Figura 4), datos y estudios que se han producido, es razonable preguntar si los científicos y los tomadores de decisiones, así como la comunidad Japonesa en general, tenían expectativas acerca de la ocurrencia de un sismo y tsunami de tal magnitud como los ocurridos en marzo 11. La respuesta surge al inspeccionar los catálogos de sismos, los reportes y documentación acerca de sismos y tsunamis y al analizar las medidas que se habían tomado para preparar a la población en caso de recurrencia de estos fenómenos. Sismos de gran tamaño han ocurrido en Japón a lo largo de su historia y han producido devastación, la cual ha

resultado por causas directas e indirectas de la sacudida y los tsunamis (Tabla 1).

Lecciones y perspectivas para Colombia

Como Japón, el territorio colombiano también está bajo la influencia directa del llamado “anillo de fuego del Pacífico” y también se ha visto afectado por terremotos en tiempos históricos y recientes. Aunque aparece de manera ocasional, la sacudida sísmica con origen en diversas partes de nuestra geografía afecta seriamente la vida y la economía. Solo basta recordar los efectos de unos pocos sismos moderados como el de la ciudad de Popayán (Cauca) el 31 de marzo de 1983 ($M_w = 5.6$), o el de Páez (Cauca) en junio 6 de 1994 ($M_w = 6.8$), o el de enero 25 de 1999 ($M_w = 6.1$) cerca a la ciudad de Armenia (Quindío), y el impacto nacional causado por estos eventos.

Un sismo más lejano en el tiempo, pero de gran magnitud, ocurrió en 1906 ($M_w 8.8$) y tuvo su epicentro a 200km al occidente de Esmeraldas en la costa ecuatoriana, cerca a la frontera con Colombia (Figura 5). Hasta la ocurrencia de los sismos de Maule, Chile (febrero 27 de 2010, $M_w 8.8$) y Tohoku, Japón (marzo 11 de 2011, $M_w 9.0$), el

Tabla 1. Efectos de algunos sismos notorios en Japón. Modificado de Stein & Wysession (2003)

Localidad	Fecha	Tamaño *	Efectos
Sanriku	Junio 15, 1896	$M_s = 8.5$	Tsunamis de 35 m de altura afectaron 10.000 casas, murieron 26.000 personas a lo largo de la costa de Sanriku, en la isla de Honshu. Un sismo similar en Sanriku en marzo 2, 1933 produjo un tsunami de 25 m durante el cual murieron 3.000 personas.
Tokio	Septiembre 1, 1923	$M_s = 8.2$	En la bahía de Sagami, a 80 km al sur de Tokio. Los incendios aislados causados se unieron para convertirse en la principal causa de fatalidad (143.000 personas). Un tsunami de 12 m impactó la bahía de Sagami.
Kobe	Enero 16, 1995	$M_s = 6.8$	5.502 fatalidades, 36.896 heridos, 310.000 sin hogar. Destrucción masiva de la ciudad portuaria más grande del planeta: 193.000 edificaciones. Costo de los daños: ~100.000 millones de dólares (ahora el segundo sismo más costoso hasta la fecha).

* M_s es magnitud de ondas superficiales, calculada a partir de la amplitud de ondas registradas con período de 20 s. Aproximada para los sismos más antiguos.

sismo de Esmeraldas estaba clasificado como el quinto sismo más grande del registro instrumental en todo el planeta. La ruptura sobre la falla que produjo este sismo ha sido estimada en 500 km de largo x 150 km de ancho, localizándose aproximadamente paralela a la línea de costa entre la población de Manta, Ecuador, hasta la ciudad de Buenaventura, en Colombia (Kelleher 1972; Kanamori and McNally 1982). Este sismo ocurrió como

consecuencia de la ruptura de un segmento en la interface entre las placas Nazca y Suramericana. La placa Nazca forzosamente se hunde bajo la placa Suramericana a una velocidad que puede exceder 50 mm/año (H. Mora, Com. Pers.) e incluso llegar a 79 mm/año, una tasa relativamente alta. El sismo de Esmeraldas también generó un tsunami cuya altura local se ha estimado en al menos 5m, destruyendo 49 casas y causando entre

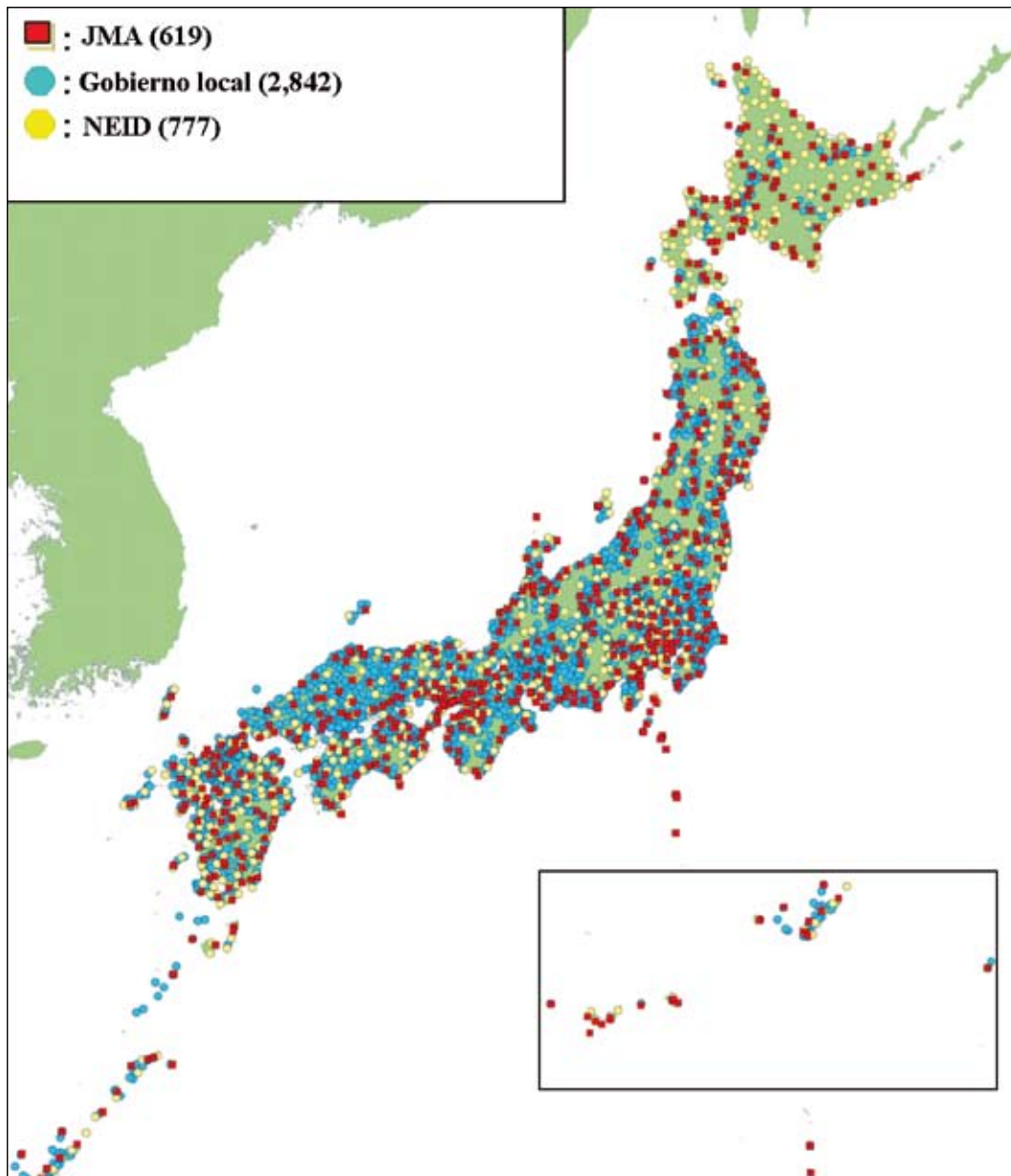


Figura 4. Mapa de Japón con la ubicación de instrumentos usados para monitoreo de sismos y estimación de intensidades de sacudida. Cuadros rojos: Estaciones de JMA (Japan Meteorological Agency). Círculos cian: Estaciones del gobierno local. Círculos amarillos: Estaciones de NIED. Fuente: JMA.

500 y 1.500 fatalidades en Colombia (USGS 2011). Igualmente, las olas de tsunami se propagaron por la cuenca del océano Pacífico, siendo reportadas en Centro América, Hawaii, San Francisco y Japón. En lo que tiene que ver con efectos planetarios, la información es más limitada (dado el año en que ocurrió el sismo), pero los registros de sismogramas en Göttingen,

Alemania, indican desplazamientos verticales del suelo del orden centimétrico (Kanamori and McNally 1982). Es importante mencionar que al igual que en Japón, el sismo de 1906 en la zona de subducción de Colombia-Ecuador no ha sido el único generador de tsunami, otros sismos importantes ocurrieron allí en 1942 ($M_w \approx 7.6$),

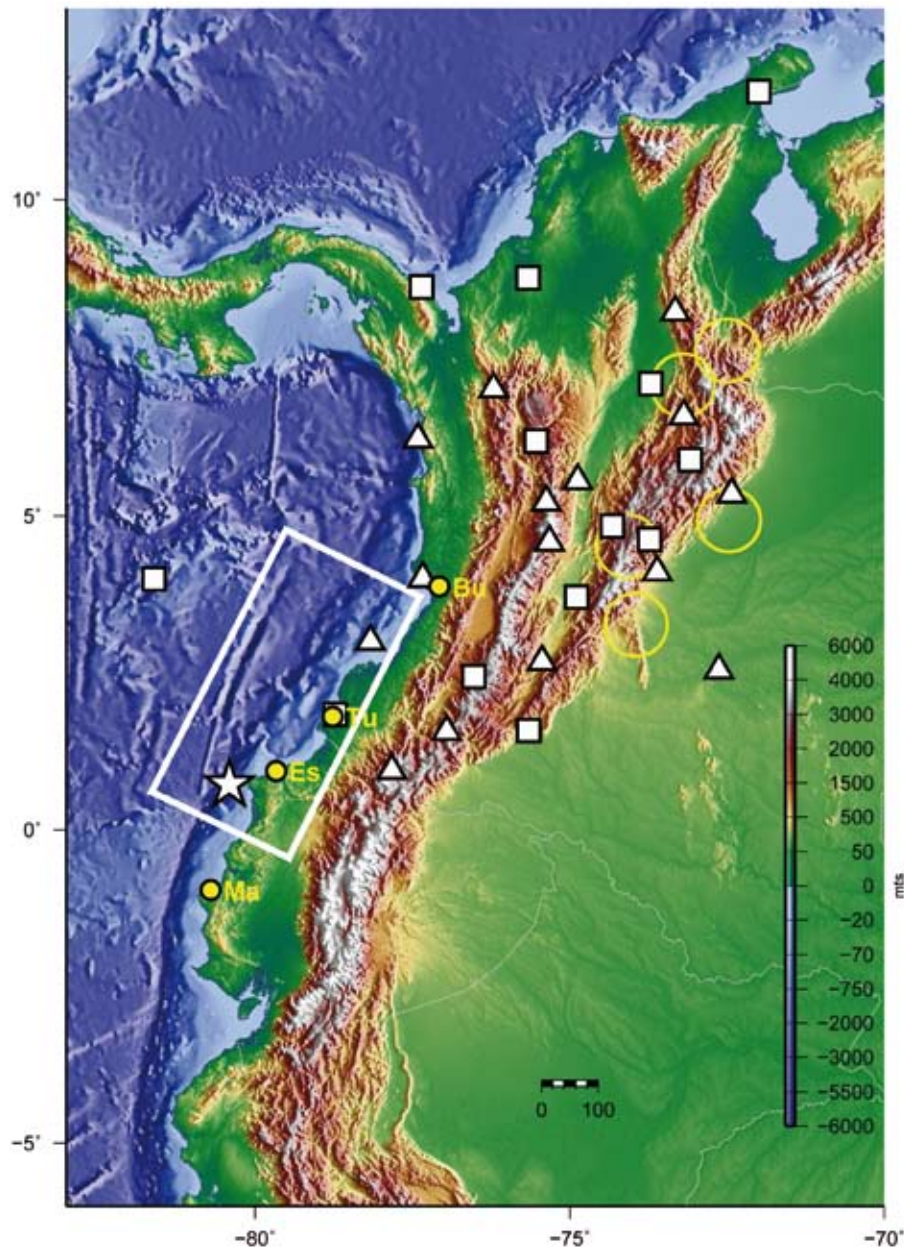


Figura 5. Mapa del noroccidente de Sur América con la localización y área de ruptura aproximada del sismo de enero 31 de 1906. Estrella = epicentro del sismo principal Polígono=zona de ruptura aproximada (modificados de Kanamori and McNally, 1982). Cuadrados rellenos, triángulos rellenos y círculos amarillos: Localización de las estaciones de banda ancha, corto período y subredes, respectivamente, de la RSNC. Círculos negros con relleno amarillo: poblaciones (Bu = Buenaventura, Tu = Tumaco, Es = Esmeraldas, Ma = Manta). La escala del mapa está en km y los datos de elevaciones y batimetría en m.

1958 ($M_w = 7.7$) y 1979 ($M_w = 8.2$), este último con tsunami asociado.

Los eventos de Japón en marzo de 2011 y lo ocurrido en la frontera Colombia-Ecuador en 1906 inevitablemente nos llevan a reflexionar, no sólo acerca de lo científico, sino también acerca de lo social. En términos de lo geológico, debemos comenzar a reevaluar algunos aspectos relacionados a la generación de tsunamis en la costa colombo-ecuatoriana: (1) la noción de que los sismos grandes están restringidos a zonas de subducción de la litosfera oceánica joven, como por ejemplo la región del Pacífico Colombo-Ecuatoriana (donde de hecho ocurrió el mega sismo de 1906), sino que también debemos considerar áreas como la región noreste del Caribe, donde la placa Norteamericana subduce bajo la placa Caribe, las tasas de movimiento relativo son lentas y la litósfera oceánica es más antigua, condiciones diferentes a las de la zona Pacífica y (2) es necesario considerar otros procesos que pueden generar tsunamis, como los grandes deslizamientos submarinos, acerca de los cuales también existen evidencias en la zona de subducción entre Nazca y Suramérica sobre la latitud entre Colombia y Ecuador (Ratzov et al. 2007). Desde el punto de vista científico-social los grandes eventos geológicos como los mega sismos y las súper-erupciones volcánicas deben ser vistos como fenómenos sin fronteras, que para su estudio e investigación requieren la cooperación internacional e interdisciplinaria. Por ejemplo, el sismo de Tohoku causó efectos locales inmediatos, pero tuvo impacto regional ya que el tsunami se propagó por todo el océano Pacífico y causó afectación a miles de kilómetros. Desde otro punto de vista la devastación por el sismo y el tsunami causaron impacto económico a nivel regional y global. De manera similar, el sismo de Esmeraldas en 1906 representó ruptura a lo largo de una falla que traslapa la frontera entre dos países y su impacto también fue de orden regional.

Es importante igualmente que hagamos preparativos, los cuales deben ser a nivel de comunidad y a nivel familiar y personal. En lo que tiene que ver con preparaciones comunitarias, es importante que se revisen, se amplíen y se difundan los planes de prevención y mitigación de emergencias causadas por sacudida sísmica y tsunamis, no sólo en la costa Pacífica, sino en toda Colombia (dado que irrefutablemente, un sismo grande y tsunami causan impacto a nivel regional). Es igualmente importante trabajar en el mejoramiento y refuerzo de la infraestructura, asegurándonos de aplicar altos y

estrictos estándares en el diseño y puesta en obra de las construcciones, tanto en zonas urbanas como rurales. A nivel personal y familiar una buena idea es educarnos en los temas referentes a todas las amenazas geológicas, pero especialmente sismos, tsunamis y erupciones volcánicas, ya que estos fenómenos se han presentado e inevitablemente seguirán ocurriendo en nuestro país. En un buen conocimiento de estos fenómenos y sus posibles impactos a corto y largo plazo está la clave para mejorar nuestro desempeño en situaciones adversas que requieren pensar con calma, pero actuar con rapidez y eficacia.

Finalmente se señala que es muy importante apoyar y fortalecer los actuales programas de monitoreo de amenazas geológicas, particularmente aquellos destinados a seguir la evolución de la sismicidad y actividad volcánica, como la Red Sismológica Nacional de Colombia - RSNC, la Red Nacional de Acelerógrafos - RNA, proyectos como GEORED y la red de Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos (adscritos a Ingeominas). En este sentido, por ejemplo, es muy recomendable el despliegue de instrumentos como los sismómetros de fondo oceánico (OBS - Ocean Bottom Seismometers) para mejorar la capacidad de monitoreo y detección de eventos sísmicos y otros fenómenos en las regiones costeras colombianas. Igualmente debe continuarse el apoyo a las iniciativas de investigación, docencia y extensión que estén relacionadas al estudio de deformaciones terrestres, sismos, tsunamis y actividad volcánica, entre otros, ya que estas actividades permiten ampliar y profundizar el conocimiento en torno a fenómenos que aunque se presenten de manera espaciada en el tiempo, pueden en cuestión de minutos, dejar comunidades o países enteros seriamente afectados.

CONCLUSIONES

- La secuencia sísmica de Tohoku exhibió completitud, con ocurrencia de sismos precursoros, sismo principal y réplicas. La frecuencia de ocurrencia de réplicas sigue la ley de Omori y la réplica mayor se ajusta a la predicción de la ley de Bath.
- El sismo de Tohoku ocurrió en un ambiente geológico donde la litosfera oceánica antigua de la placa Pacífica subduce bajo la placa Norteamericana lo cual implica que la noción de que los mega sismos están

restringidos a subducción de litosfera oceánica joven no es aceptable de ahora en adelante.

- Las consecuencias de la sacudida sísmica y el tsunami para la nación más industrializada y preparada del mundo indica que todas las expectativas respecto a efectos superficiales fueron ampliamente superadas.
- En Colombia debemos mejorar, ampliar y revisar los planes de prevención y mitigación de efectos de amenazas geológicas y fortalecer los proyectos de

investigación y monitoreo relacionados a sismos y tsunamis, entre otros fenómenos.

- Igualmente, es importante trabajar en alcanzar los más altos estándares en el diseño y puesta en obra de infraestructuras en zonas rurales y urbanas en toda Colombia.
- Los mega sismos y las súper-erupciones son eventos geológicos que requieren para su estudio e investigación de cooperación multinacional e interdisciplinaria.

REFERENCIAS

- Aria Project-JPL and CALTECH (2011): <http://www.seismolab.caltech.edu/> (último acceso 12/4/2011).
- Associated Press-AP (2011): <http://www.ap.org/> (último acceso 13/03/2011).
- Båth, M. (1965): Lateral inhomogeneities in the upper mantle, *Tectonophysics*, 2, 483–514, doi:10.1016/0040-1951(65)90003-X.
- Båth, M. (1966): Earthquake energy and magnitude, *Physics and Chemistry of the Earth*, 7, 115–165, doi:10.1016/0079-1946(66)90003-6.
- Bilham, R. (2011): <http://cires.colorado.edu/~bilham/Honshu2011/> (último acceso 12/4/2011).
- Earthquake Research Institute-University of Tokyo-ERI (2011): <http://eri.u-tokyo.ac.jp> (último acceso 3/4/2011).
- Fujii, Y. and K. Satake (2011): <http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/> (último acceso 5/4/2011).
- Furumura, X., and Takemura, X. (2011): Earthquake Research Institute-University of Tokyo-ERI, http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/eng/ (último acceso 12/4/2011).
- Global Centroid-Moment-Tensor Project-GCMT (2011): <http://www.globalcmt.org/> (último acceso 15/3/2011).
- Ide, S., A. Baltay & G. C. Beroza (2011): Shallow Dynamic Overshoot and Energetic Deep Rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 332, pp 1426-1429.
- Incorporated Research Institutions for Seismology-IRIS (2011): <http://www.iris.edu> (último acceso 10/4/2011).
- Japan Society of Civil Engineers-JSCE (2011): <http://www.jsce-int.org/> (último acceso 5/4/2011).
- Kanamori, H. (1977): The energy release in great earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 82, pp 2981-2987.
- Kanamori, H. & McNally, K. C. (1982): Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombia coast, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72, pp 1241-1253.
- Kelleher, J. A. (1972): Rupture zones of large South America earthquakes and some predictions, *Journal of Geophysical Research*, 77, pp 2087-2103.
- Kiser, E. & Ishii, M. (2011): Preliminary Back-Projection Results for the 2011 Tohoku Earthquake, Conference proceedings of the 2011 Annual Meeting of the Seismological Society of America, 13-15 April, Memphis, Tennessee.
- Meng, L. & Ampuero J. (2011): Rupture Complexity of the 2011 M9 Tohoku-Oki Earthquake Revealed by High-resolution Seismic Array Processing, Conference proceedings of the 2011 Annual Meeting of the Seismological Society of America, 13-15 April, Memphis, Tennessee.
- Monastersky, R. (2011): Giant shock rattles ideas about quake behaviour, *Nature*, 471, 274, doi:10.1038/471274a.
- National Aeronautics and Space Administration-NASA (2011): <http://www.nasa.gov> (último acceso 1/4/2011).
- National Geophysical Data Center-NGDC (1996): Age of the Ocean Floor, World Data Center for Marine Geology and Geophysics Report MGG-12.
- National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA (2011): NOAA Center for Tsunami Research, <http://nctr.pmel.noaa.gov/index.html> (último acceso 5/4/2011).
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention-NIED (2011): Kyoshin Network K-Net, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/> (último acceso 25/3/2011).
- Omori F. (1894): On the aftershocks of earthquakes, *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7, pp 111–200.
- Ratzov, G., M. Sosson, J.-Y. Collot, S. Migeon, F. Michaud, E. Lopez, & Y. Le Gonidec (2007): Submarine Landslides Along the North Ecuador – South Colombia Convergent Margin: Possible tectonic Control, in: V. Lykousis, D. Sakellariou and J. Locat (eds.), *Advances in Natural and Technological Hazards Research, Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 3 International Symposium, Springer, 424 p., New York.
- Reuters (2011): <http://www.reuters.com/> (último acceso 13/3/2011).
- Richter, C. F. (1958): *Elementary seismology*, W. H. Freeman & Co, 768 p., San Francisco.

- Romano, F., Piatanesi, A., Lorito, S. & D'Agostino, N. (2011): Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Rome, <http://www.supersites.earthobservations.org/sendai.php> (último acceso 12/4/2011).
- Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki & A. Asada (2011): Displacement Above the Hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 332, 1395.
- Stein, S. & M. Wysession (2003): *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*, Blackwell Publishing, Oxford, 498 p.
- Simons, M., S. E. Minson, A. Sladen, F. Ortega, J. Jiang, S. E. Owen, L. Meng, J-P. Ampuero, S. Wei, R. Chu, D. V. Helmberger, H. Kanamori, E. Hetland, A. W. Moore & Frank H. Webb (2011): The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries, *Science*, 332, 1421-1425.
- The New York Times (2011): <http://www.nytimes.com/> (último acceso 25/3/2011).
- The World Bank (2011): <http://www.worldbank.org/> (último acceso: 5/4/2011).
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs-OCHA (2011): Japan Earthquake & Tsunami, Situation Reports No. 10, 11, and 16.
- United States Geological Survey-USGS (2011): National Earthquake Information Center-NEIC, <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/> (último acceso abril 1, 2011).
- Utsu, T. (1961): A statistical study of the occurrence of aftershocks, *Geophysical Magazine*, 30, pp 521-605.
- Utsu, T., Ogata, Y. & Matsu'ura, R. S. (1995): The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, *Journal of Physics of the Earth*, 43, pp 1-33.
- Van Camp, M. & Rivera, L. (2011): Excitation of the gravest modes of the Earth after the 2011 Japanese earthquake (Mw=9.0) and comparison with two other events: Sumatra-Andaman (2004, Mw=9.2) and Chile (2010, Mw=8.8), <http://www.iris.edu/news/events/japan2011/> (último acceso 12/4/2011).
- Yokota, (2011): http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/eng/ (último acceso 12/4/2011).
- Wang, D. & Mori, J. (2011): Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/~mori/Sendai/sendai.htm> (último acceso 12/4/2011).
- Wei, S., Sladen, A. & the ARIA group. (2011): <http://www.seismolab.caltech.edu/> (último acceso 12/4/2011).