
Universidad de Chile

Departamento de Geofísica

Sismología

GF 4001-2

Profesor: Sergio Ruíz

Cátedra: Tsunamis
Hermann Schwarze
2023



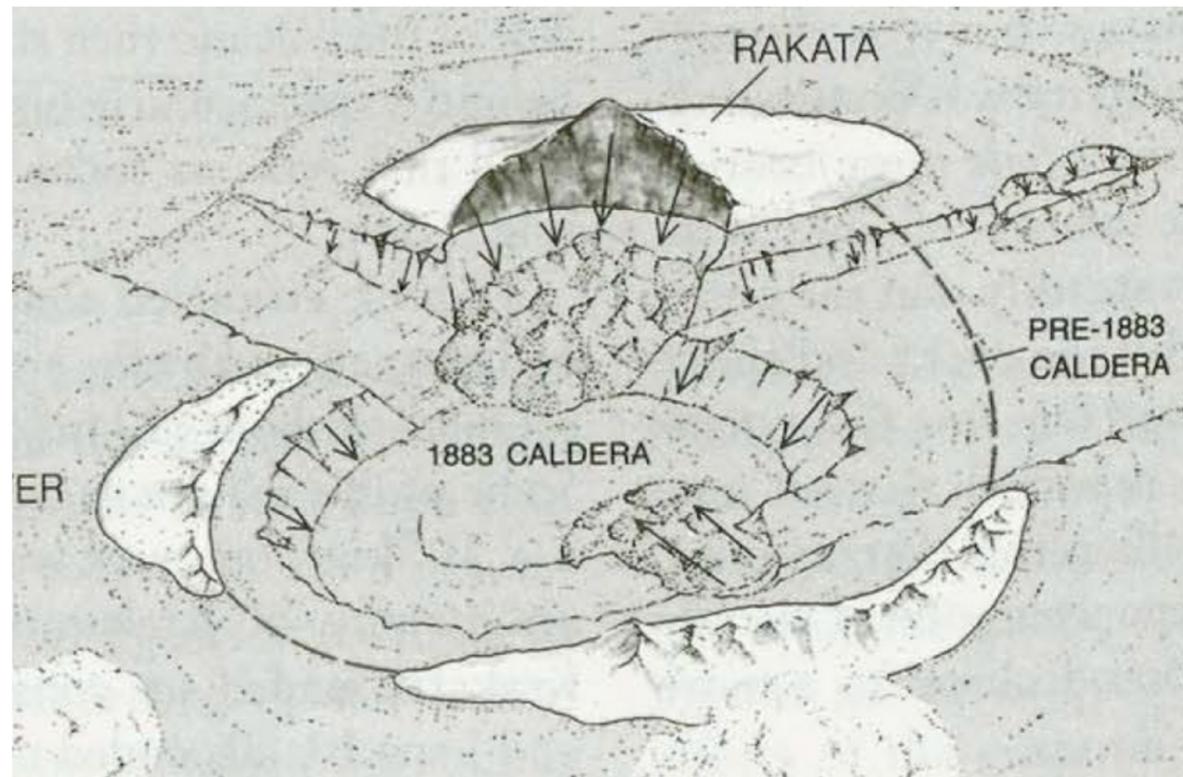
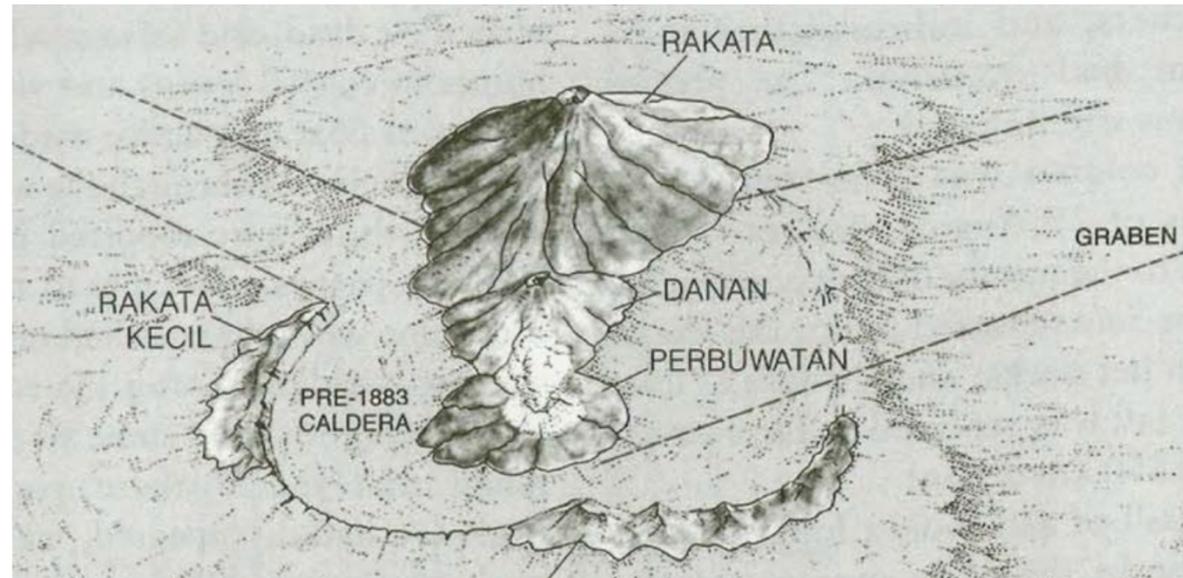
TSUNAMI:

Los tsunamis son trenes de ondas de gravedad generadas por eventos geológicos extremos. Ocurren en los océanos, fiordos y lagos. Son el resultado del desplazamiento de enormes masas de agua, casi siempre de forma vertical, en donde la única fuerza restauradora es la fuerza de gravedad.

津波

El término "tsunami" viene de la combinación de los Kanji japoneses " 津 [tsu]=puerto - 波 [nami]=olas". Este es el concepto más acuñado en la literatura científica, aunque también popularmente se les conoce como maremotos .

Principales fuentes tsunamigénicas



- Fuentes sísmicas
- Erupciones volcánicas. (submarinas y subaereas)
- Eventos de remoción en masa (landslides).
- Liberación catastrófica de gas en el lecho marino.
- Variaciones extremas de presión atmosférica.
- Caída de meteoritos sobre el mar.

Características de los terremotos tsunamigénicos

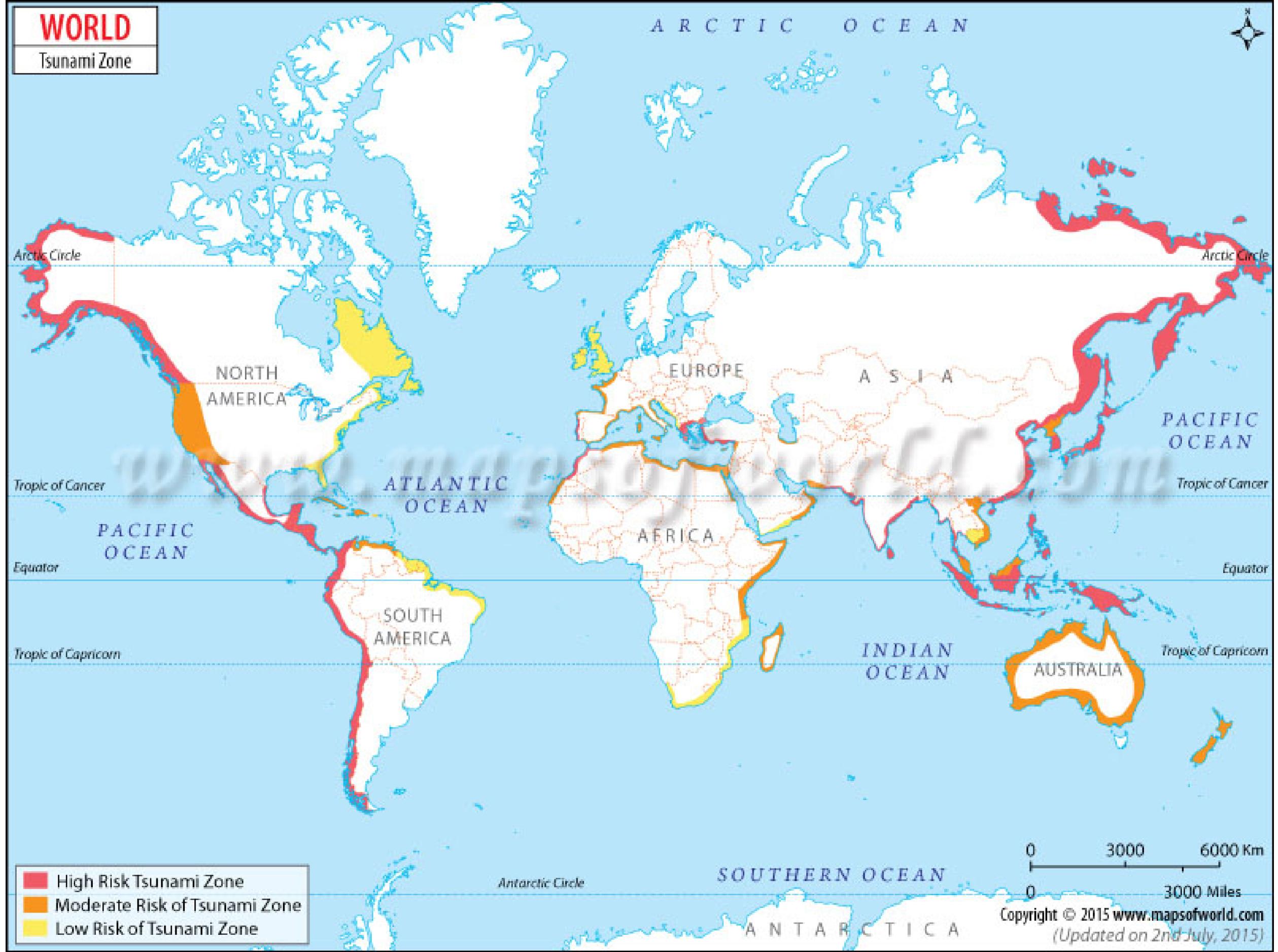
Table 1.1 Twenty-first-century tsunamis

No	Date	Earthquake magnitude (M_w)	Maximum water height (m)	Number of victims	Location of event
1	23/06/2001	8.4	8.8	26	Peru
2	24/12/2004	9.1	50.9	227899	Indonesia, Sumatra
3	17/07/2006	7.7	20.9	802	Indonesia, South Of Java
4	15/11/2006	8.3	21.9	0	Russia, Central Kuril Islands
5	13/01/2007	8.1			
6	01/04/2007	8.1	12.1	52	Solomon Islands
7	21/04/2007	6.2	7.6	10	Chile
8	15/08/2007	8.0	10.05	3	Peru
9	29/09/2009	8.1	22.35	192	Samoa
10	27/02/2010	8.8	29	156	Chile
11	25/10/2010	7.8	16.9	431	Indonesia, Sumatra
12	11/03/2011	9.0	55.88	18482	Japan
13	28/10/2012	7.7	12.98	1	Canada, British Columbia
14	06/02/2013	7.9	11	10	Solomon Islands
15	01/04/2014	8.2	4.4	0	Chile

- La mayor parte de los tsunamis provienen de una fuente sísmica y suelen formarse sobre los márgenes de subducción.
- Todos los terremotos submarinos pueden generar tsunamis, pero para efectos prácticos, se considera que sólo los eventos con $M_w > 7.5$ (ONEMI), están asociados a riesgo de inundación.

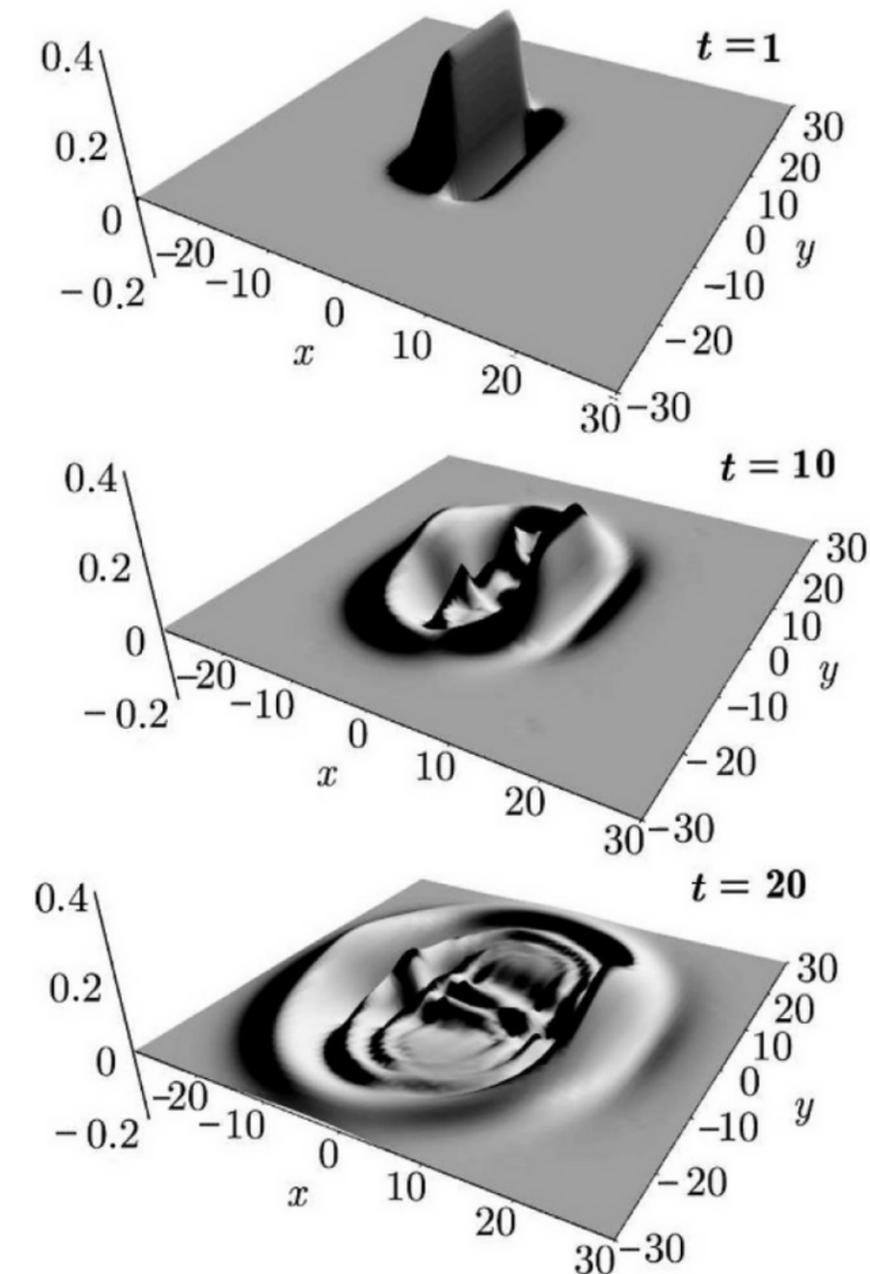
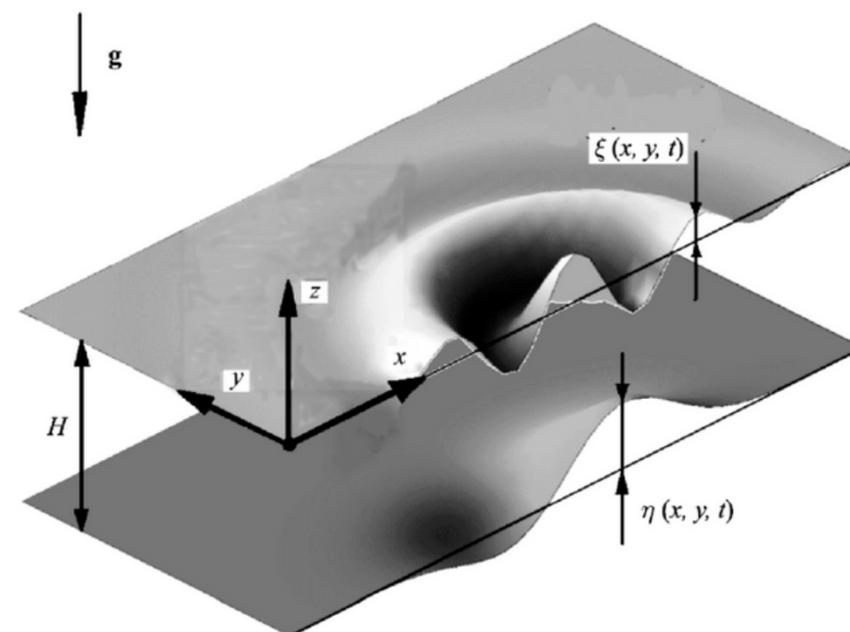
WORLD

Tsunami Zone



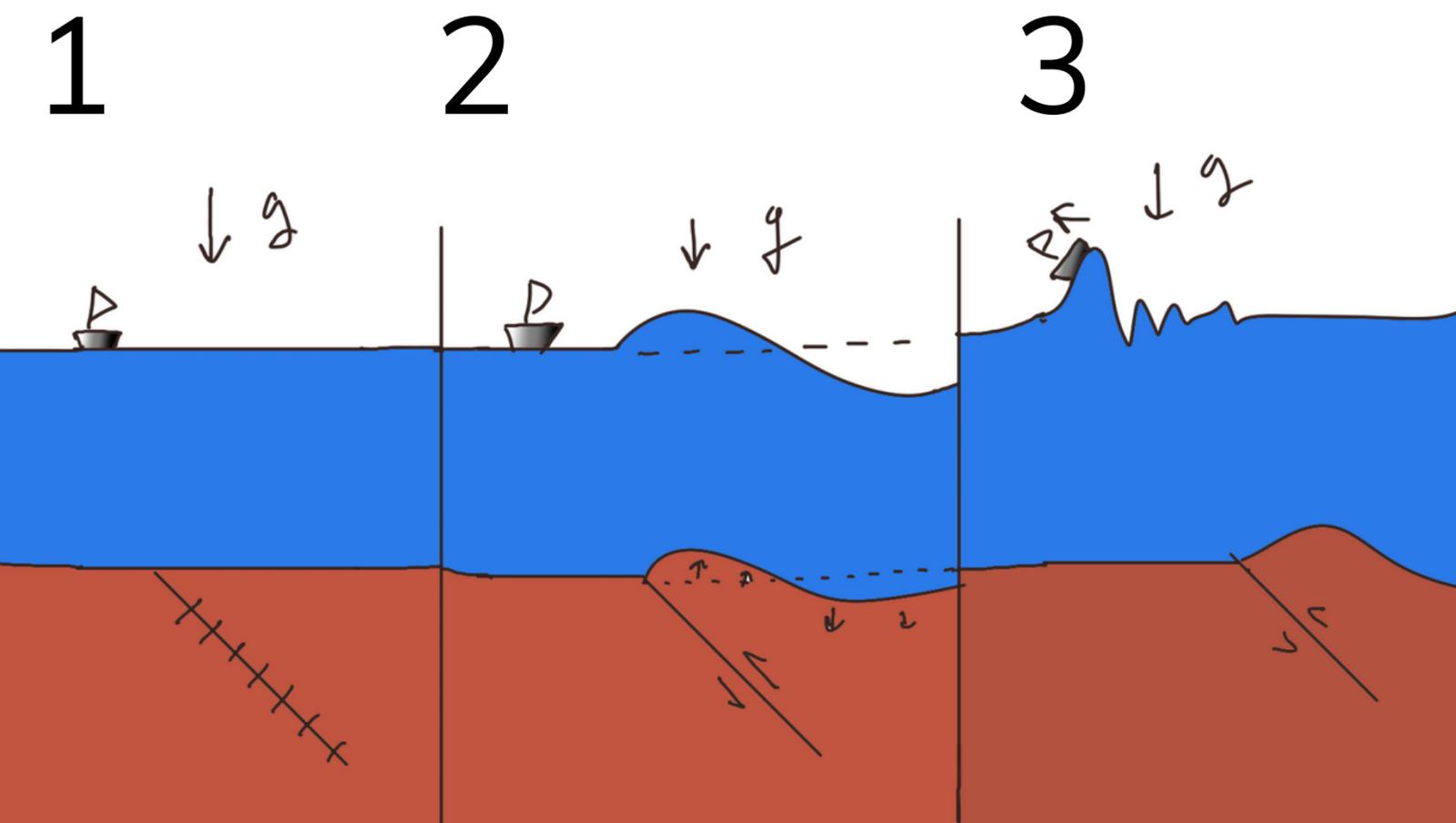
Características de la fuente tsunamigénica

- El Potencial tsunamigénico se refiere a la capacidad que tiene un terremoto para generar un tsunami y qué tan eficiente es en ese proceso.
- Normalmente la velocidad a la que ocurre la deformación del fondo del mar es lo suficientemente rápida como para que, desde la percepción del océano, ésta ocurra de forma instantánea, se puede asumir que en el instante inicial la perturbación en la superficie libre del mar es una copia de la deformación del lecho marino.



Características de los terremotos tsunamigénicos

Los terremotos tsunamigénicos generan deformación vertical en el fondo del lecho marino ubicado sobre la fuente. Ésta es una deformación elástica producida por la dislocación sísmica en el plano de falla.

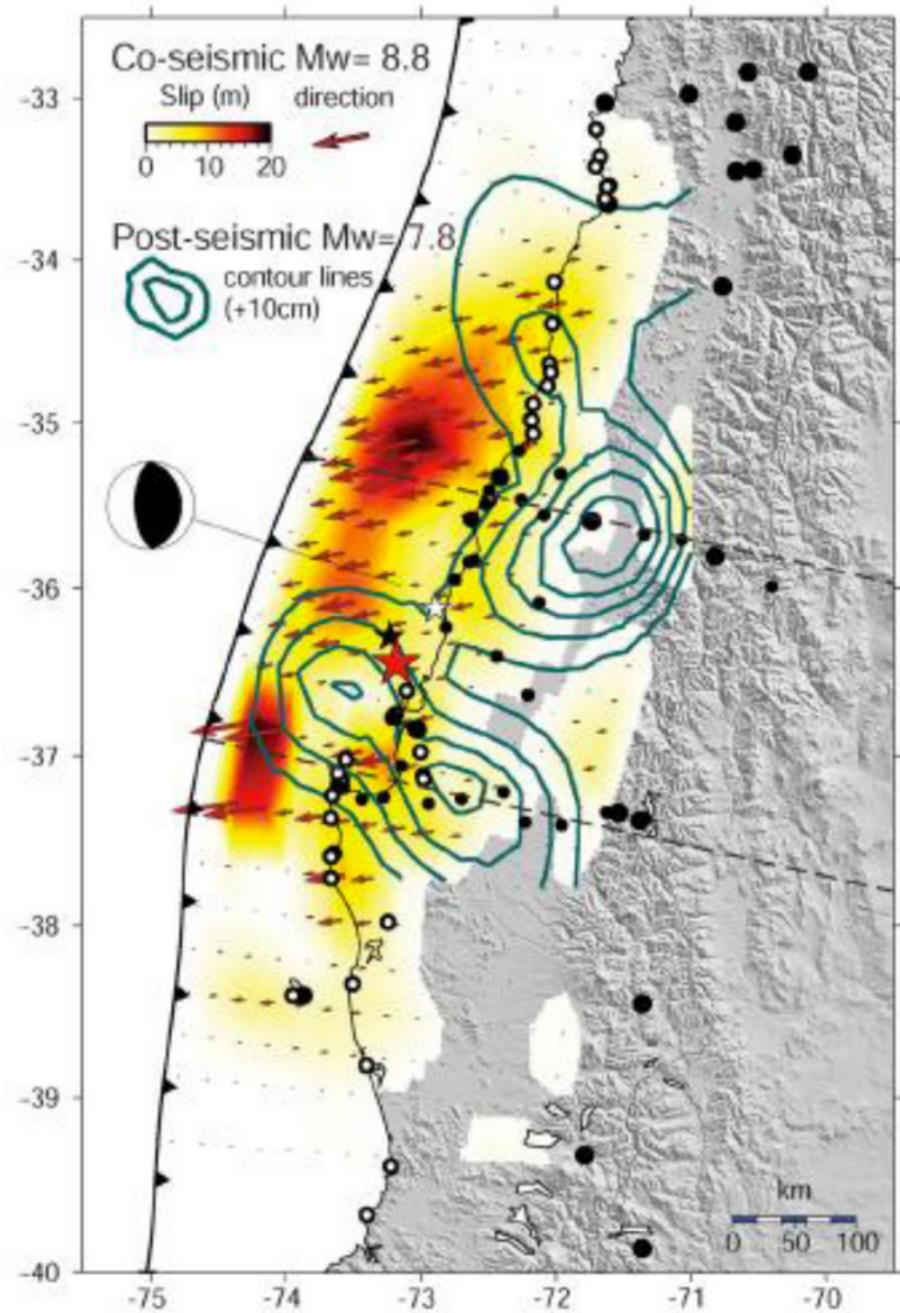


1) Estado de reposo, previo a la dislocación. En este momento la falla se encuentra trabada.

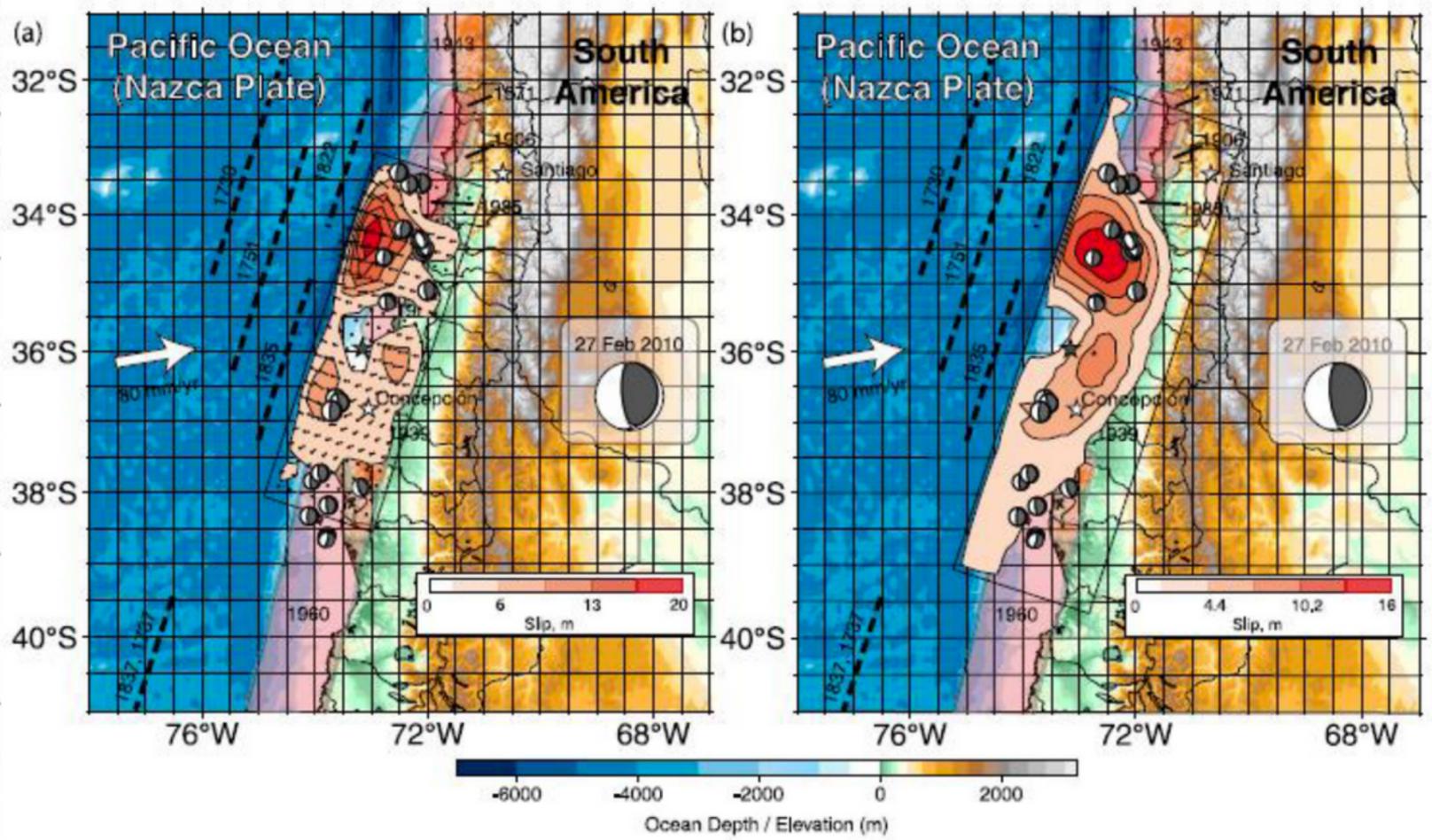
2) El principio de conservación de la masa provoca que el agua desplazada por la deformación vertical del fondo oceánico mueva toda la columna de agua hacia la superficie, perturbándola.

3) Esta perturbación sobre la superficie libre del océano sólo puede ser restaurada por la fuerza de gravedad, la que provocará que la energía transferida desde la deformación del terremoto al agua viaje en forma de ondas de gravedad.

Utilidad del centroide para determinar el riesgo de tsunamis



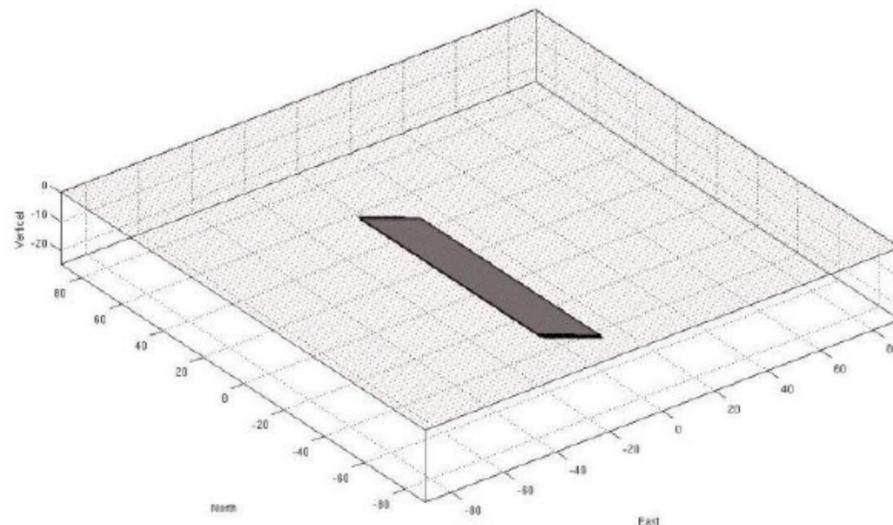
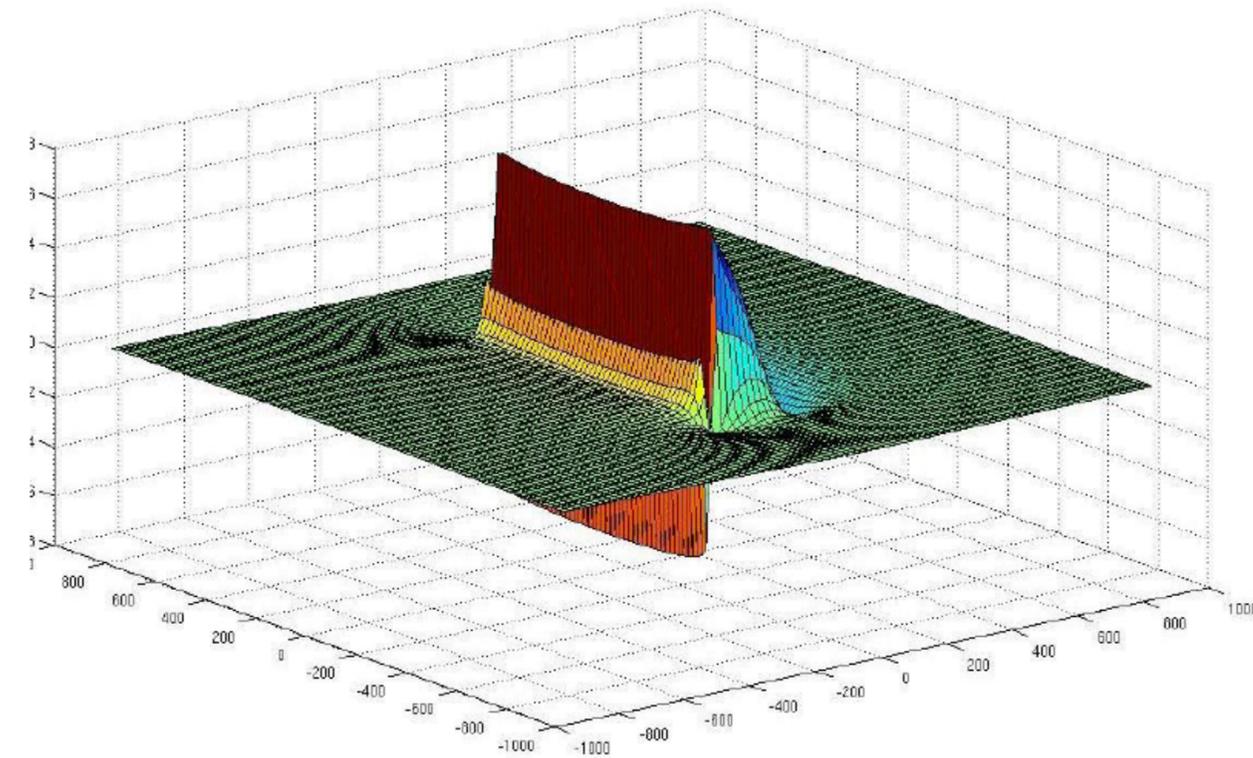
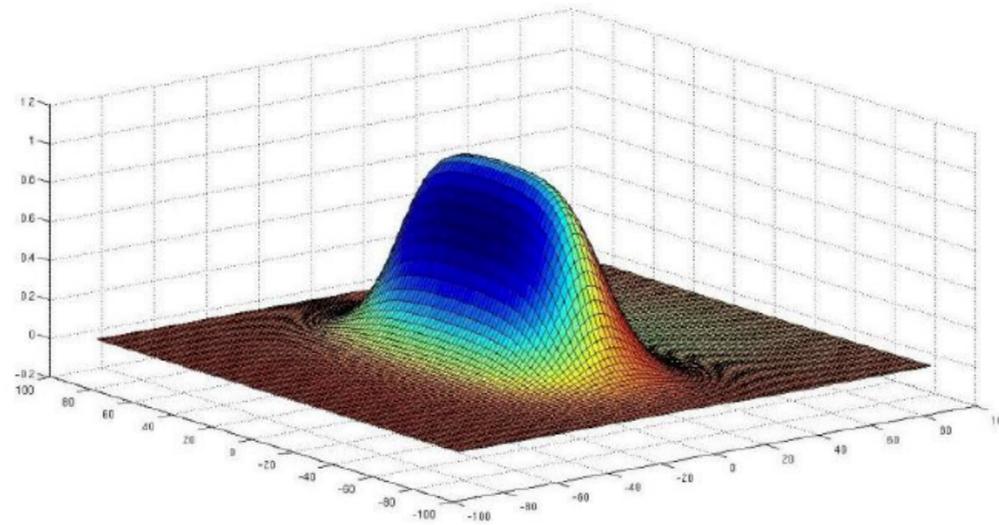
Vigny et al.



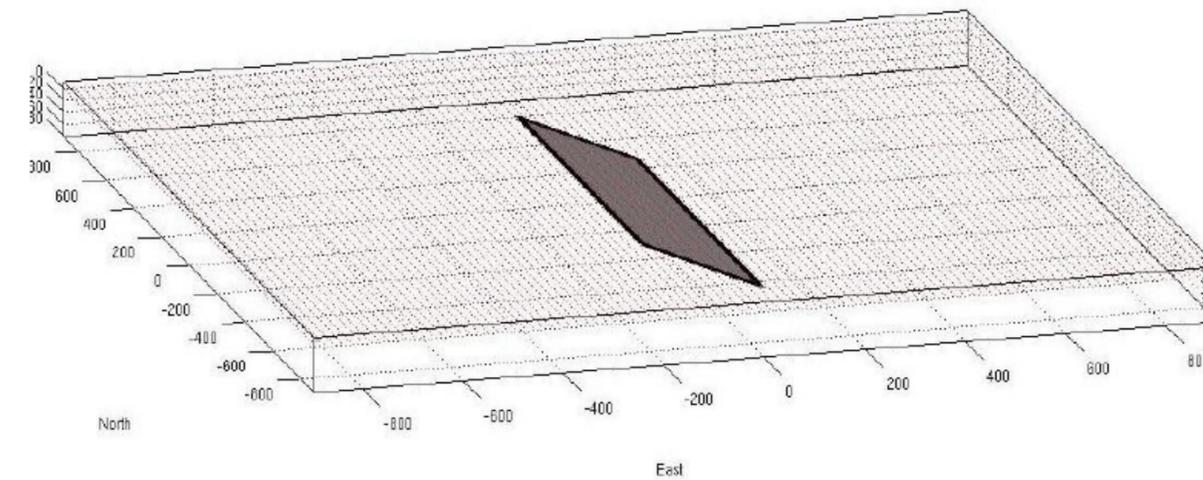
Lay et al.

Terremoto del Maule 2010

Deformación del lecho marino: Uso del modelo de Okada

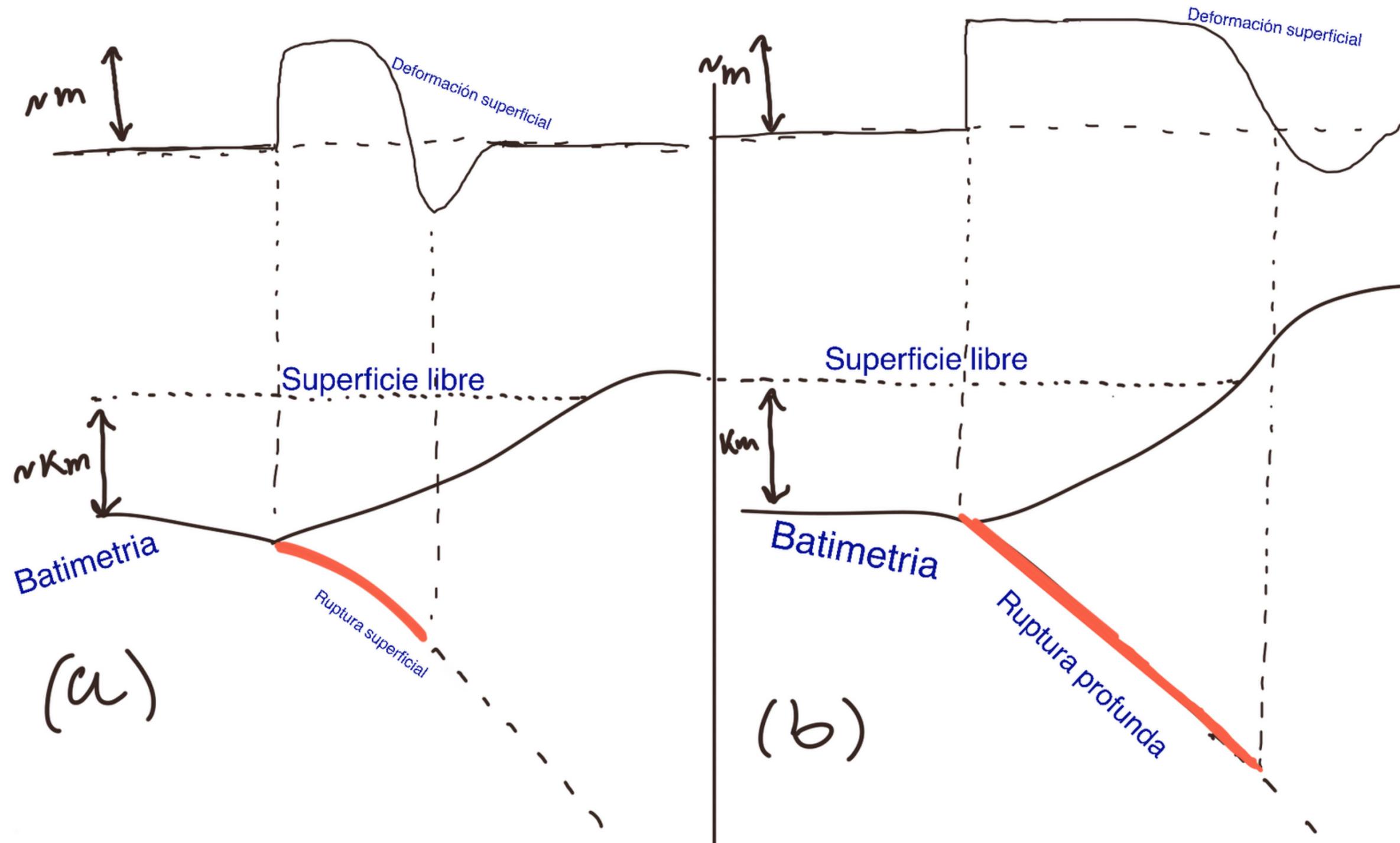


Mw- 7.5



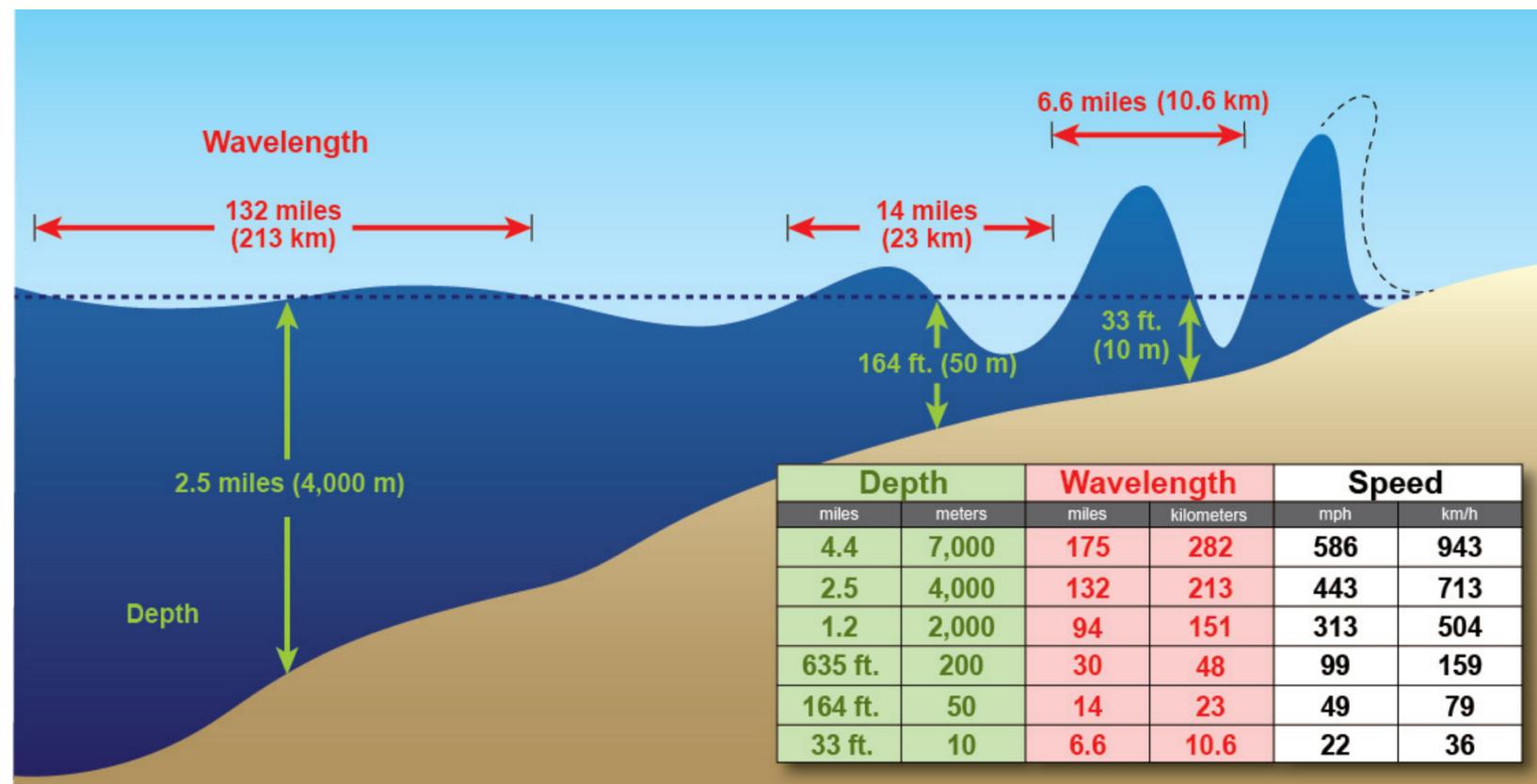
Mw- 9.5

¿Por qué se retira el mar antes de un tsunami?

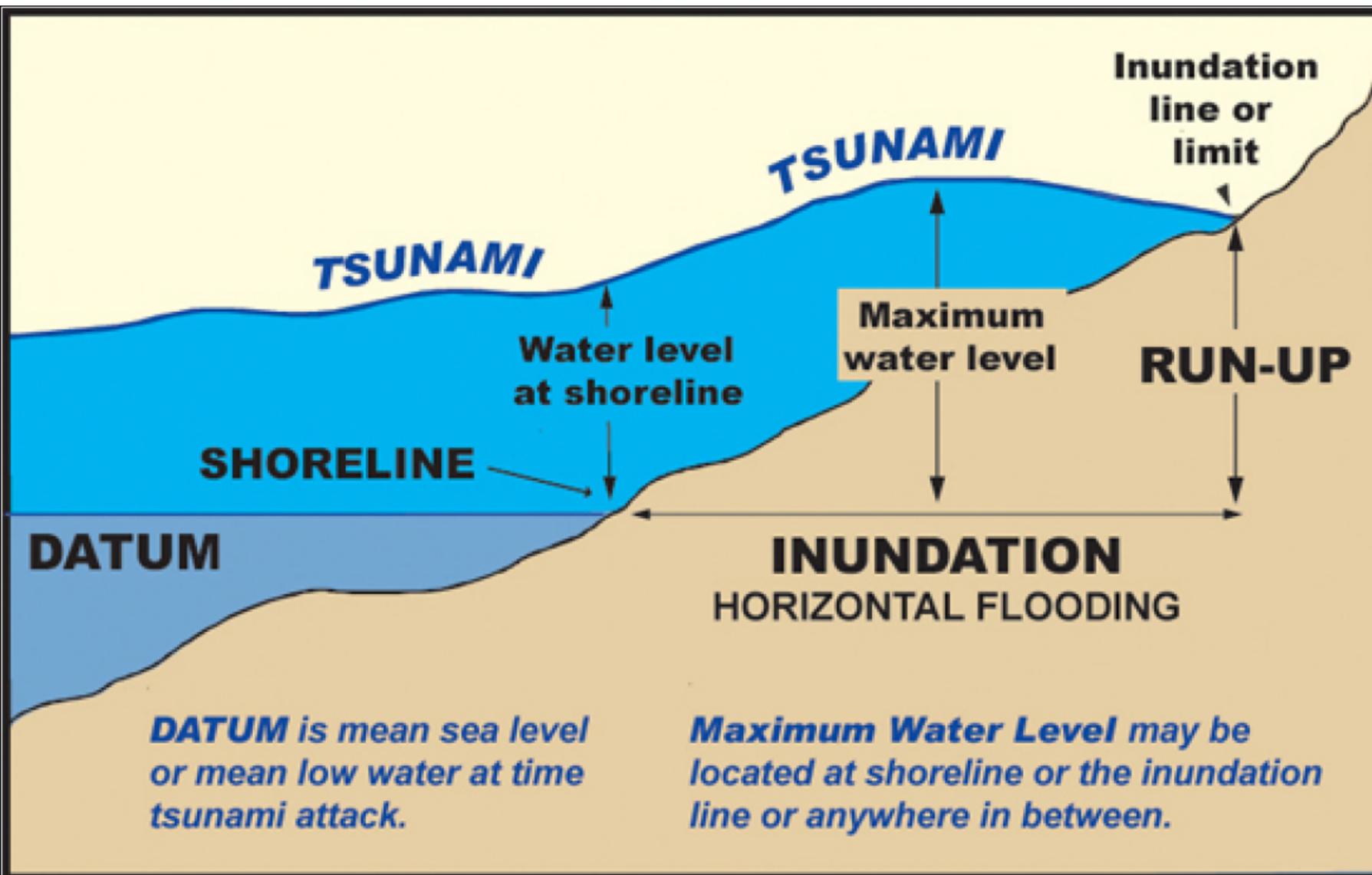


Características de las ondas de tsunami

- Tienen una longitud de onda del orden de cientos de kilómetros, por lo que se dice que tienen un comportamiento de "ondas de aguas someras".
- La velocidad de fase de los tsunamis depende de la profundidad del fondo del océano y de la aceleración de gravedad: $c = \sqrt{gh}$. Como la profundidad media del océano es de ~ 4 km, entonces la velocidad media de los tsunamis en mar abierto es del orden de ~ 700 km/h.
- Los tsunamis respetan el principio de conservación de energía, por lo que al ir acercándose a tierra firme, sufren una desaceleración con la profundidad, disminuyen su longitud de onda, lo que es compensado con una mayor amplitud de las olas al momento de tocar tierra.



Arribo de los tsunamis a la costa



- La forma de los tsunamis al llegar a la costa depende completamente de la forma de la batimetría. Mientras mayor sea la pendiente del lecho del mar cerca de la costa, menor será la amplitud del tsunami, por el contrario, en una zona en donde el fondo del mar tiene muy poca pendiente, las amplitudes del tsunami serán mayores.
- Run-Up: Corresponde a la cota de altura máxima de inundación del tsunami, Es el parámetro fundamental a calcular para conocer el riesgo de inundación de tsunamis en una zona.

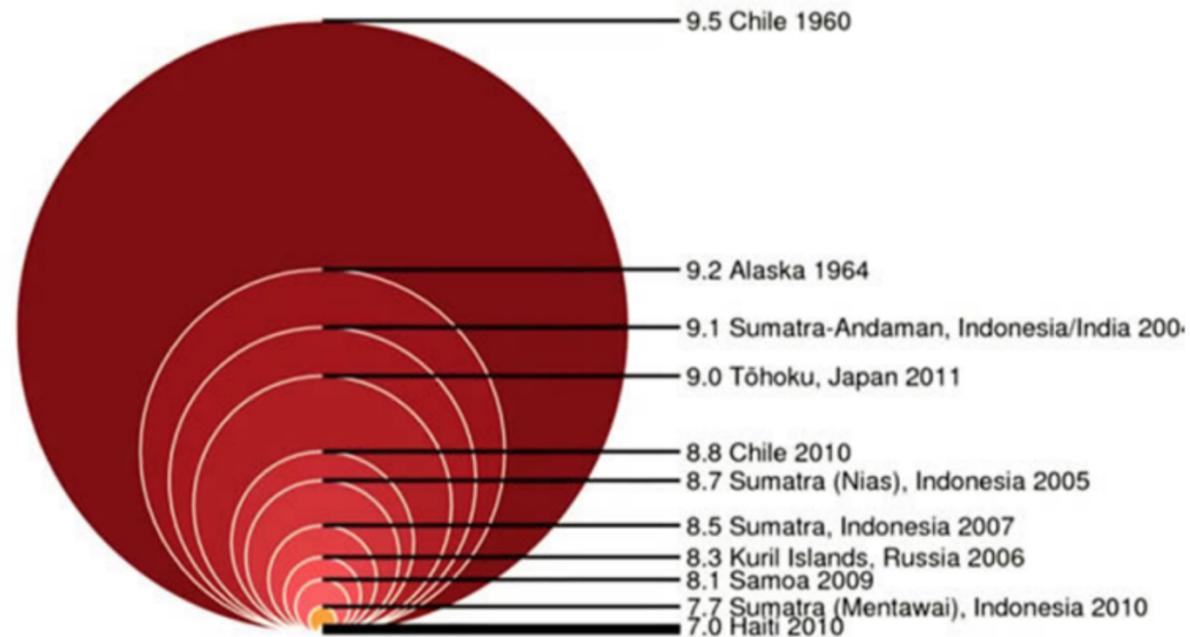
¿De qué depende el potencial tsunamigénico de un terremoto?

Depende de los parámetros que caracterizan la fuente:

- Magnitud M_w
- Geometría de falla
- Profundidad de la fuente
- Dimensión espacial de la ruptura
- Velocidad de ruptura

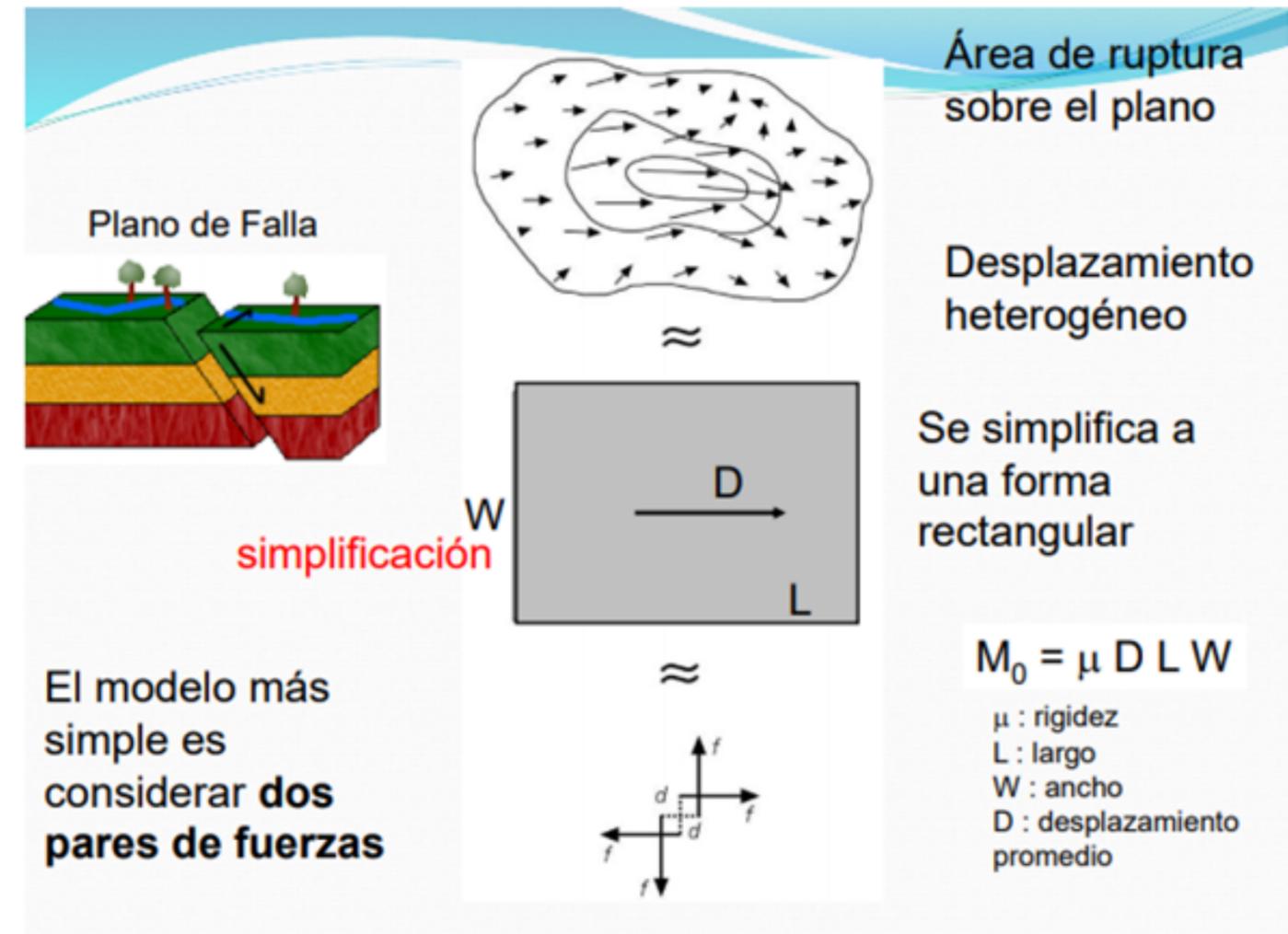
Magnitud de la fuente

Comparison of Recent and Historic Earthquakes by Energy Release



- $$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 6.07, \quad \text{con } M_0 \text{ en [Nm]}$$

- Es el factor más determinante en el potencial tsunamigénico, ya que guarda relación directa con la liberación de energía del sismo, el resto de los factores están más relacionados con la eficiencia del transporte de esa energía del sistema tierra al mar.
- Terremotos con $M_w < 7.0$ suelen ser demasiado pequeños para excitar las ondas de un tsunami.

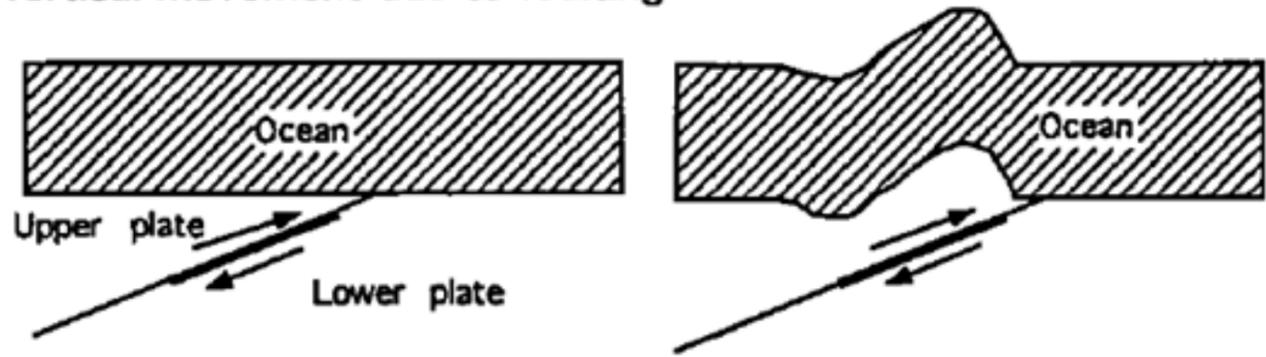


Geometría de falla

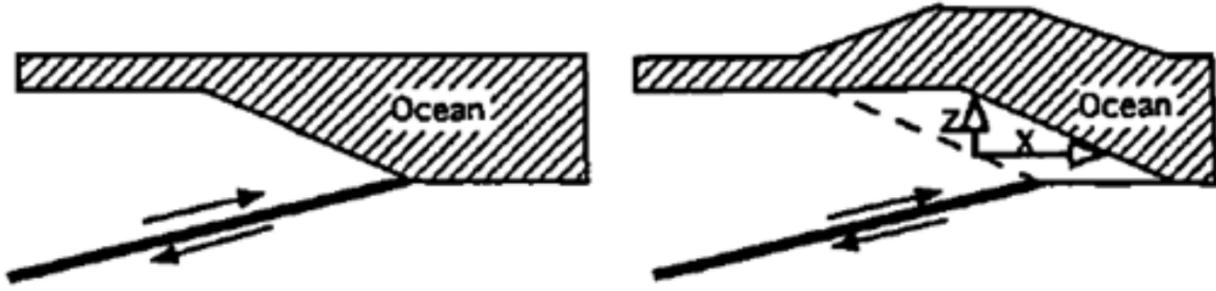
Los tsunamis tienen más sensibilidad a la perturbación vertical que la horizontal. Por lo que la geometría de las fallas inversas suele ser la más eficiente para trasladar energía del sistema tierra al mar.

Initial condition of tsunami

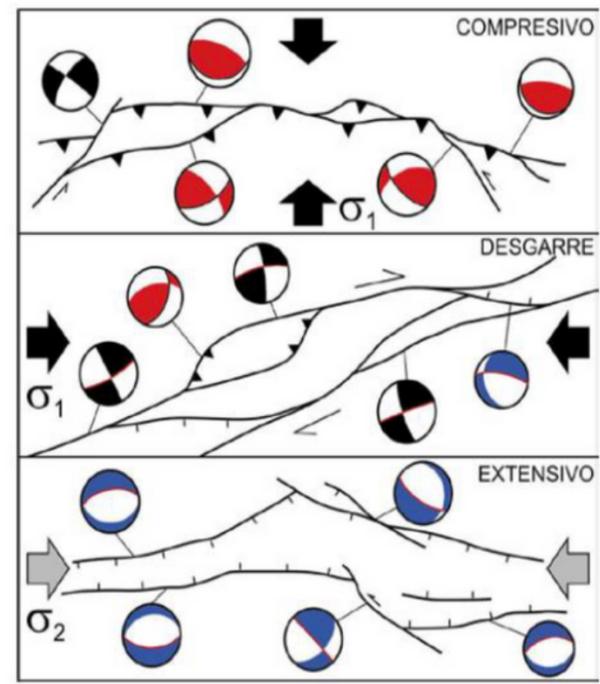
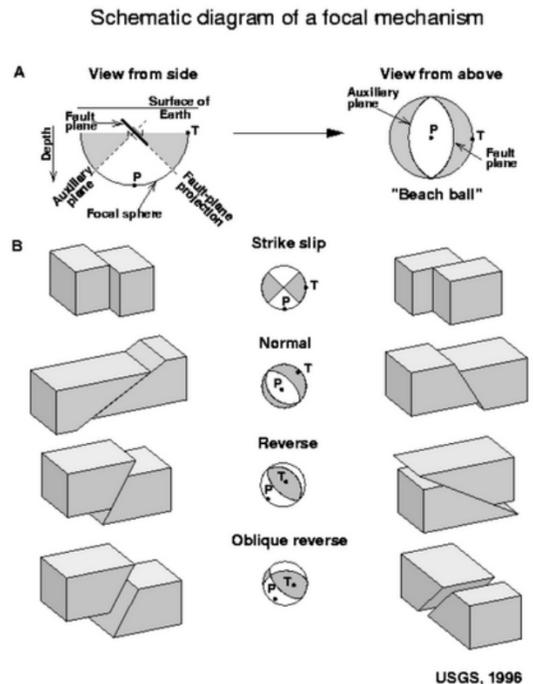
a) vertical movement due to faulting



b) horizontal movement of slope



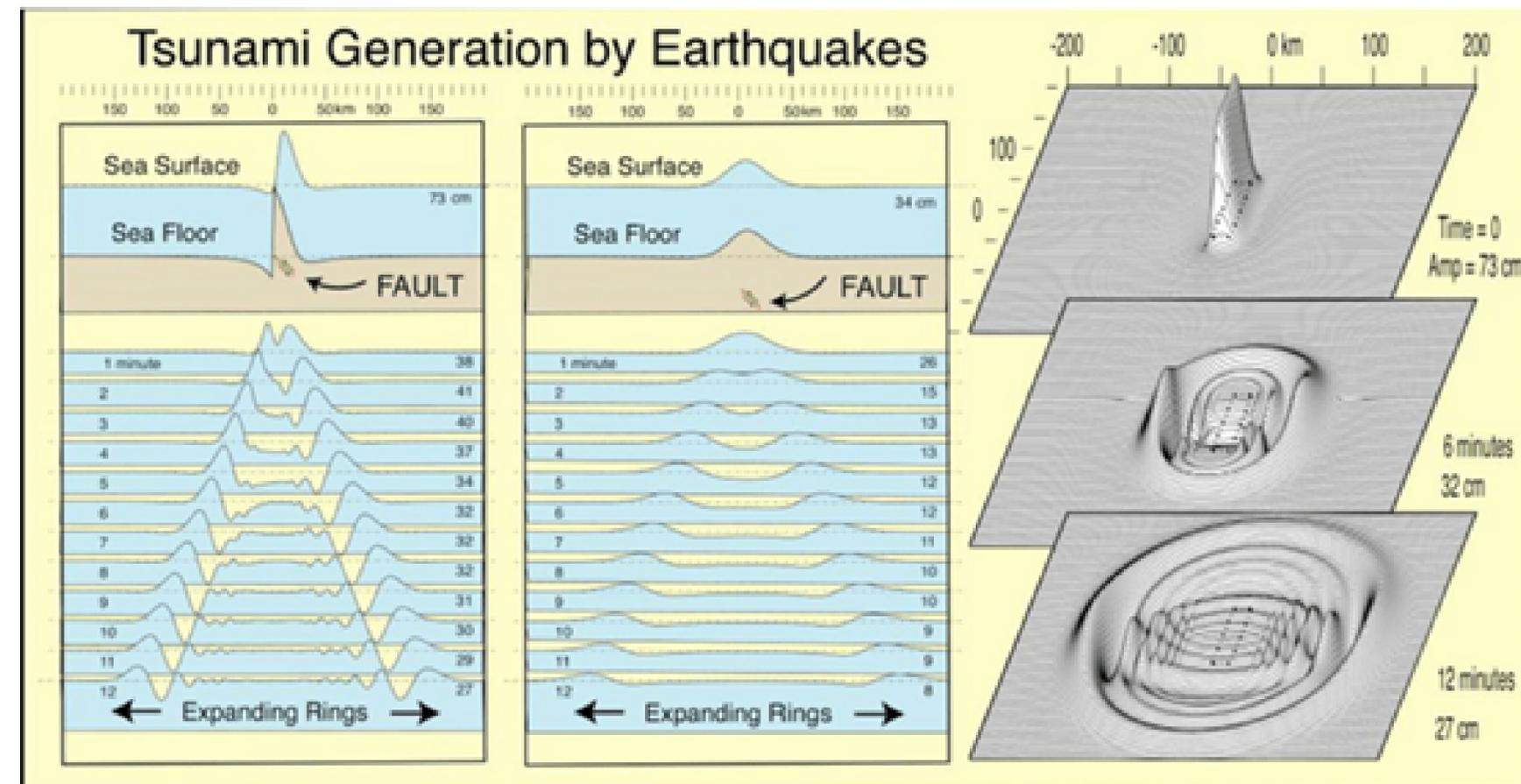
Tanioka (1996)



USGS, 1996

Profundidad de la fuente

Las propiedades reológicas de la roca cambian con la profundidad; un terremoto más superficial genera una mayor deformación de las rocas adyacentes a la interfaz, y por tanto, una mayor perturbación transportada al mar.



Dimensión espacial de la ruptura

- La distribución del slip sobre superficies de falla de diferentes tamaños juega un papel importante en el potencial de un tsunami.
- Para dos terremotos de igual magnitud pero diferente distribución de deslizamiento, se pueden generar tsunamis completamente diferentes.
- La eficiencia en el transporte energético aumenta cuando el deslizamiento está concentrado a poca profundidad.

Tsunamigenic v/s Tsunami Earthquake

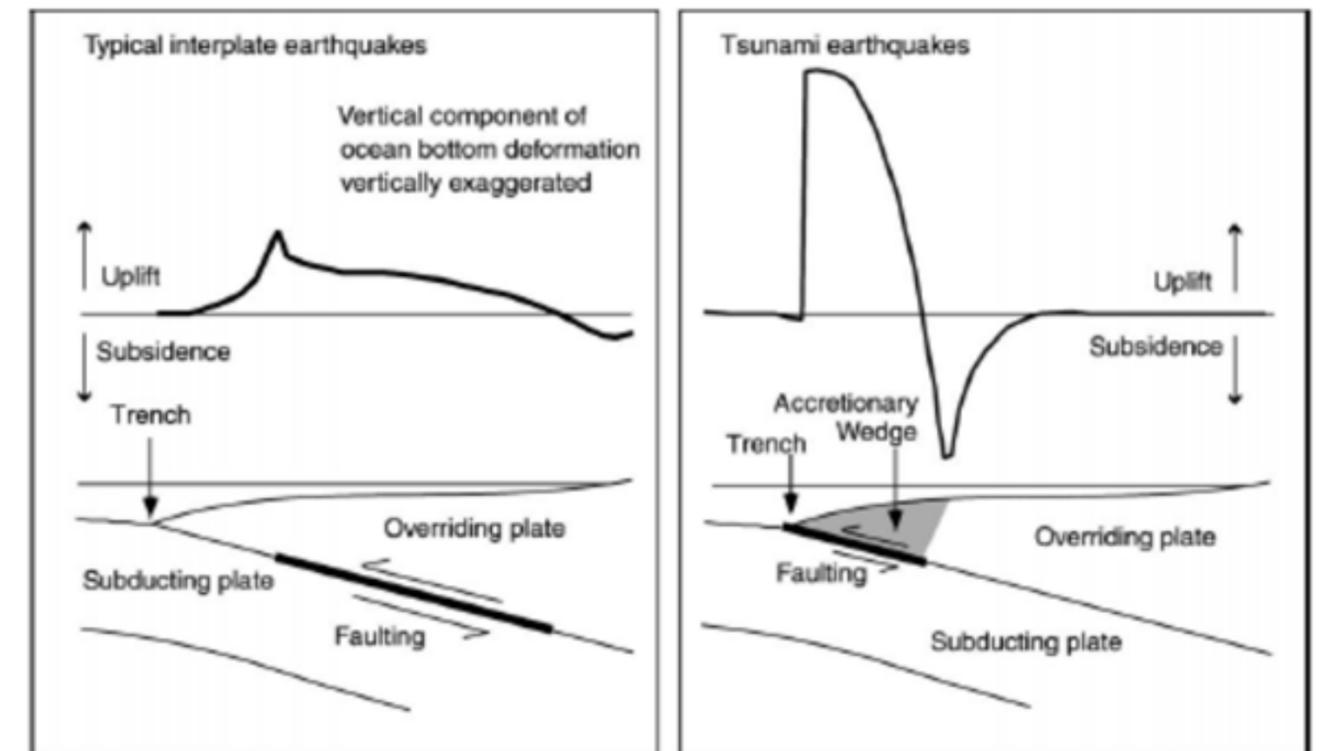


Figure 9 Vertical deformation of seafloor (top) due to faulting (bottom) for typical interplate earthquake (left) and tsunami earthquakes (right). Modified from Satake K and Tanioka Y (1999) Sources of tsunami and tsunamigenic earthquakes in subduction zones. *Pure and Applied Geophysics* 154: 467–483.

Velocidad de ruptura

- La eficiencia de un terremoto tsunamigénico se maximiza cuando la velocidad de ruptura es lo suficientemente lenta, como para que las olas excitadas por el tsunami pasen sobre la superficie deformada por la ruptura antes de que ésta se frene. E.d. ($V_r = \sqrt{gh}$).

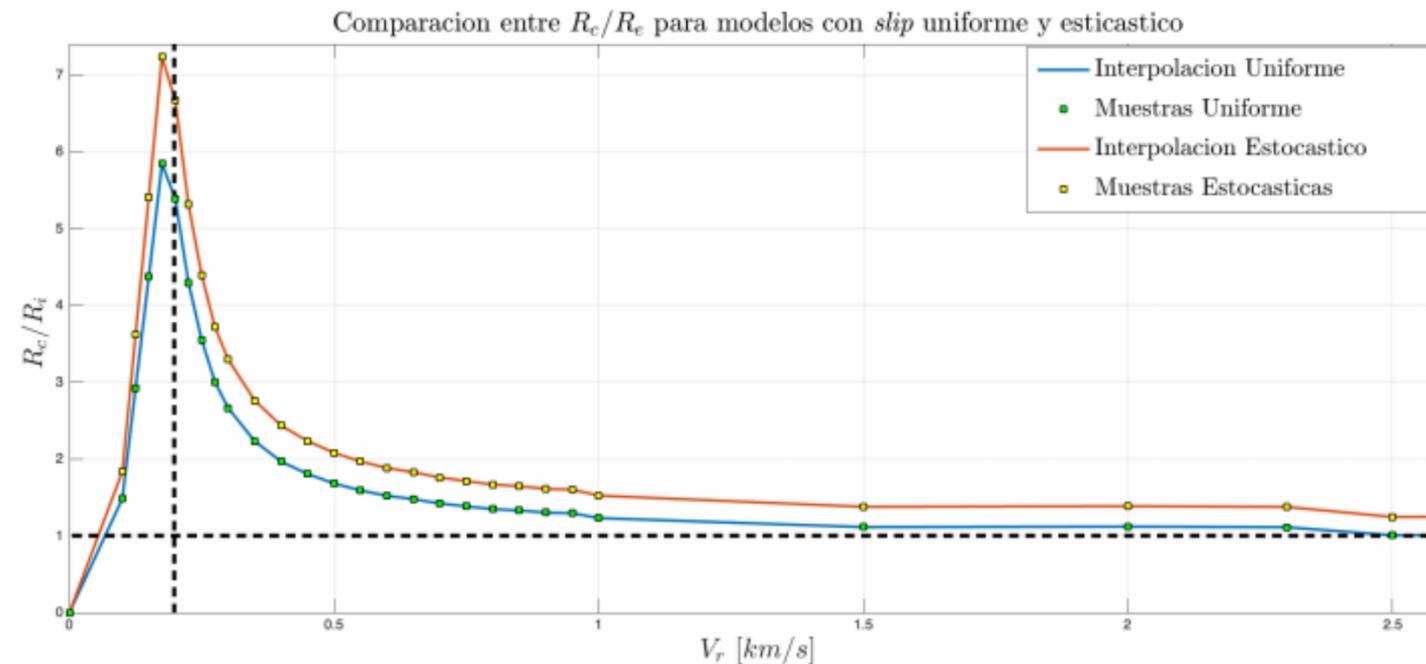


Figura 5.2: Comparación de las amplitudes en curvas R_c/R_e de escenarios con *slip* estocástico (curva roja) y uniforme (curva azul), este análisis es hecho sobre un corte transversal de la Figura 5.1. Los cuadrados amarillos y verdes representan los datos sobre los cuales se ha hecho la interpretación que le da forma a estas curvas de *Run-Up*. La línea negra punteada horizontal representa una asíntota en $R_c/R_e = 1$, y la línea negra vertical punteada representa la zona donde $V_r = c$. Notar que en esta latitud todos los puntos de los casos estocásticos tienen mayor amplitud que los de los casos uniformes.

Tsunami Earthquake

Se caracterizan por:

- Generar tsunamis mucho mayores a lo esperado por su magnitud de ondas superficiales.
- Ocurren en ambientes de subducción a baja profundidad y en zonas de contacto con un margen desacoplado, ya sea por presencia de sedimentos o por fricción y fusión parcial de la roca en la interfaz.
- Liberar mucha energía en baja frecuencia.
- Estar asociados a fuentes con baja velocidad de ruptura (~ 1 km/s, comparado con velocidades promedio del orden de ~ 2.5 km/s).
- Los tiempos de ruptura de la fuente sísmica anormalmente largos.
- Discrepancia entre magnitud de momento M_w y magnitud de ondas superficiales M_s .
- Sismos asociados a landslide submarinos también se consideran como tsunami-earthquakes.

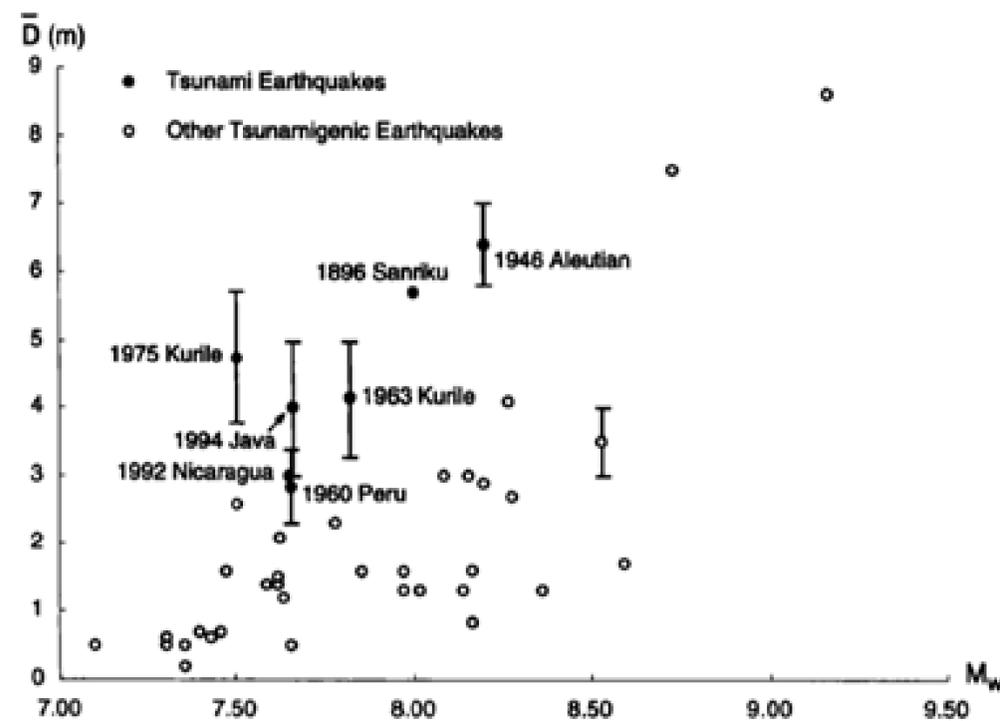


Figura 1.4: Dispersión que muestran los diferentes terremotos al comparar el grado de deslizamiento medio del tsunami generado con respecto a la magnitud de momento sísmico. Los círculos negros corresponden a *Tsunami Earthquakes* y los blancos, son otros terremotos tsunamigénicos. Se observa que los TE, en relación al resto de tsunamis generan valores anormalmente altos de deslizamiento a magnitudes comparables. Gráfico obtenido del artículo de Geist (1998).

Algunos tsunamis históricos importantes

Tsunami de bahía Lituya (1958)

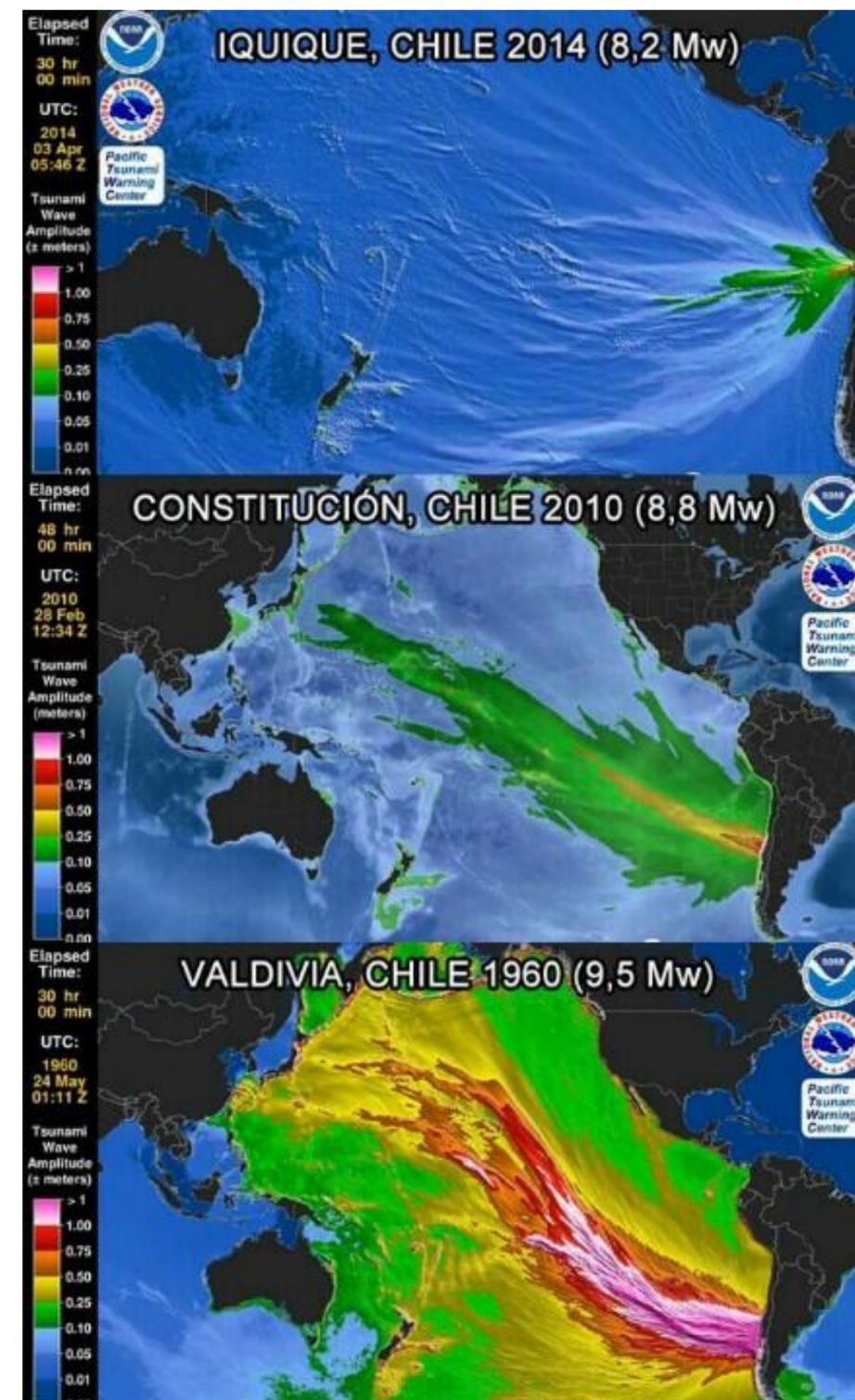


- Un terremoto Mw 7.8 en el sur de Alaska generó una remoción en masa en una de las laderas de la bahía de Lituya, provocando una pared de agua de 524 m de alto, siendo la más alta registrada en la historia.
- La remoción en masa desplazó cerca de 30 millones de metros cúbicos de tierra y rocas.
- La ola del tsunami generó daños en los árboles costeros, cubriéndolos de sal. Esto permitió después observar el run-up del tsunami alrededor de la bahía.

Algunos tsunamis históricos importantes

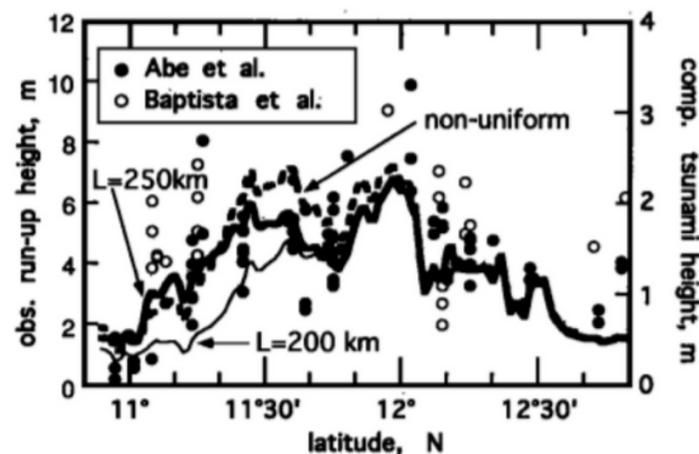
Valdivia 1960

- El tsunami generado por el terremoto de Valdivia Mw 9.5 dejó devastación en toda la costa del Pacífico.
- Cerca de Valdivia se registraron trenes de olas de entre 8-10 m de altura, las cuales mataron a cientos de personas y movieron barcos hasta 1.5 km tierra adentro.
- En Rapa Nui el tsunami arribó con olas de 10 m .
- 15 hs después, los frentes de ondas llegaron a Hawái con alturas de 10 m y mataron a 61 personas en Hilo.
- Finalmente el tsunami llegó a Japón con olas de hasta 6 m de alto, donde murieron 39 personas.
- También se registraron muertes en Filipinas y California.
- La ocurrencia de este tsunami motivó la creación del centro de alerta de tsunamis del Pacífico (PTWC), por sus siglas en inglés, con sede en Hawaii



Algunos tsunamis históricos importantes

Nicaragua 1992

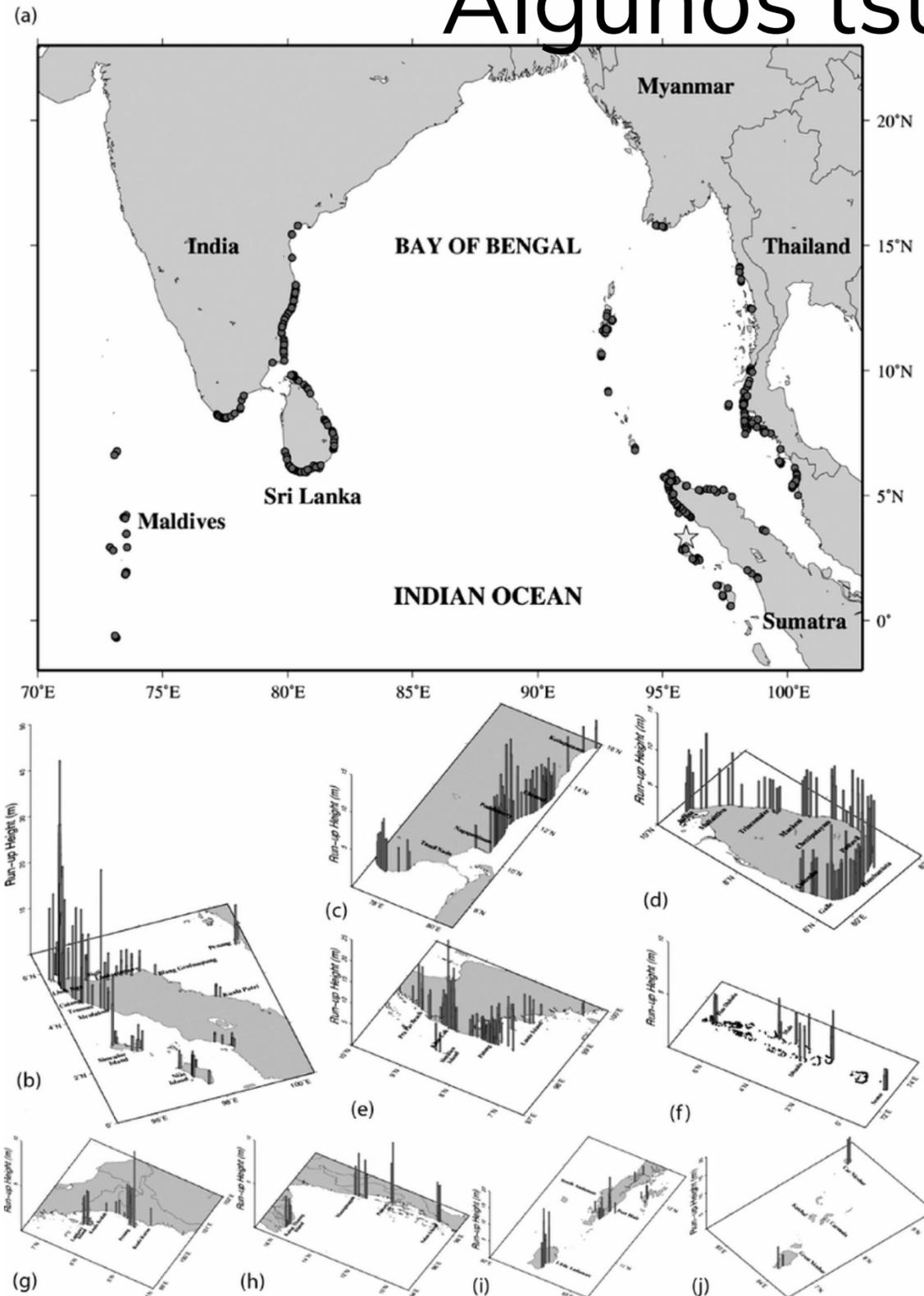


Satake (1994) Comparación del Run-Up v/s latitud observado y modelado usando distintos métodos

- Ocurrió el 1 de Septiembre de 1992 después de un terremoto de baja intensidad de Mercalli (III).
- El tsunami que se generó fue mucho mayor al esperado por la magnitud de ondas superficiales del sismo $M_s=7.2$, matando a más de 1700 personas, la mayoría niños.
- El periodo de atenuación del sismo fue mucho más largo del esperado por su magnitud ($T=100$ s)
- Satake (1994) propuso que el tipo de sismo ocurrido aquí fue un *tsunami earthquake*, los cuales se caracterizan por tener velocidades de ruptura mucho menores a las esperadas, lo que puede amplificar mucho la altura de las olas.

Algunos tsunamis históricos importantes

Sumatra-Andamar 2004



- Este tsunami fue generado por un terremoto Mw 9.3, con una ruptura de más de 1300 km de largo, y siendo el segundo terremoto más grande registrado.
- El tsunami generado golpeó todo el océano Indico, fue especialmente destructivo en la bahía de Bengala, en donde se registraron run-ups de hasta 45 m de altura al norte de Sumatra.
- Hasta ahora ha sido el tsunami más mortífero del que se tenga registro, provocando la muerte de más de 280.000 personas.

Algunos tsunamis históricos importantes

Tohoku 2011

- Ocurrió el 11 de marzo del 2011 luego de un sismo Mw 9.1.
- El tsunami registró alturas máximas de hasta 40.5 m.
- En total se contabilizan más de 18.400 muertos y cientos de desaparecidos.
- La destrucción dejada por el tsunami fue observable también en Hawaii, California y Oregon.
- El tsunami destruyó parte de la planta nuclear de Fukuchima, provocando la explosión de uno de los reactores nucleares, por lo que se tuvo que evacuar a más de 45.000 personas en el área afectada.



Algunos tsunamis históricos importantes

Tohoku 2011

