

Tsunami: Teoría y Modelación

1. Introducción

Un tsunami es un fenómeno que ocurre principalmente en el mar, generado por una perturbación geológica que impulsa y desplaza verticalmente una columna de agua originando un tren de ondas con longitudes del orden de cientos de kilómetros y alturas en agua profunda inferiores a un metro.

Poseen periodos que van de varios minutos hasta una hora, propagándose a gran velocidad en todas direcciones desde la zona de origen y cuyas olas al aproximarse a las costas pueden alcanzar alturas de grandes proporciones (Wiegel, 1970; Satake, 2002).

En la costa un tsunami puede tener una amplia variedad de formas que dependen de la magnitud del fenómeno que lo induce, la dimensión y el periodo de las olas, la batimetría por donde se propaga, la configuración de la costa, la situación de la marea, la topografía en superficie, la pendiente del terreno y el grado de rugosidad derivado de construcciones, árboles y otros obstáculos en tierra, condicionarán los efectos de la inundación (Lagos, 2000). La combinación de todos estos factores determina que el arribo del tsunami a la costa sea un proceso complejo y que las alturas máximas de inundación se diferencien considerablemente a lo largo de la costa, incluso en rangos cortos de distancia (Satake et al. 1993).

Generalmente antes del arribo del tsunami o entre dos crestas se produce una disminución del nivel del mar, retrocediendo la línea de costa en más de un kilómetro. En tanto, al llegar el tsunami a la costa, la disminución de la profundidad y su configuración generan la concentración de la energía cinética de estas ondas, disminuyendo su longitud de onda y aumentando su altura (Wiegel, 1970).

Los tsunamis pueden ser clasificados o según la distancia desde la fuente al área de impacto, o según el tiempo de viaje al área impactada y de la escala del impacto (más relevante para propósitos de emergencia). En general, se pueden definir tres categorías:

- Fuente local/evento de impacto local (menor a 60 minutos de tiempo de viaje y afectando varias decenas de kilómetros de la costa).
- Fuente regional/evento de impacto regional (menor a 3 horas de tiempo de viaje y con probabilidad de afectar todo el margen costero expuesto).
- Fuente distante o remota/evento de impacto nacional-internacional (más de 3 horas de viaje y con probabilidad de afectar distintas regiones-países).

Los tsunamis difieren de las olas que usualmente están en la playa o en océano profundo, particularmente en la longitud entre crestas de olas. La longitud de onda puede variar desde varios kilómetros a sobre los 400 km, a diferencia de las olas de playa que es alrededor de 100 m. El tiempo entre crestas de ola de tsunami sucesivas pueden variar de varios minutos a pocas horas, a diferencia de los pocos segundos en la playa. A medida que las olas de tsunamis alcanzan las aguas someras de la costa, bajan su velocidad y aumenta su altura rápidamente, a veces alcanzando alturas de algunas decenas de metros. Bahías y puertos someros tienden a que las olas se concentren causando rebote y amplificación (resonancia).

Definiciones claves para caracterizar tsunamis

- Periodo de tsunami (minutos) - el tiempo entre sucesivos peaks. Estos pueden fluctuar durante algún evento en particular y varía entre diferentes localidades dentro de una misma región. Los periodos están usualmente en el rango de pocos minutos (fuente local/impacto local) a una hora o más (fuente distante/impacto nacional).
- Altura de tsunami (m) - definido como la altura desde el peak al valle de la onda, pero no es constante. Se incrementa substancialmente a medida de que la onda se aproxima a la costa.
- Run-up de tsunami (m) - una medida útil para la amenaza de tsunami es la altura de run-up máxima, expresada como la altura **vertical** que el agua de mar alcanza sobre el nivel de mar en el tiempo. Esta medida aún tiene la desventaja que depende fuertemente del tipo de onda (crece y decrece rápidamente, mascaret (gran ola de marea), rompe-olas) y del las pendientes locales de la playa, por lo que es altamente dependiente del sitio.
- Penetración tierra adentro (m) - la distancia máxima **horizontal** tierra adentro desde la línea de costa ($h=0$ m) hasta la marca de inundación. Dependerá del run-up y de la topografía local, barreras y pendientes de la costa.

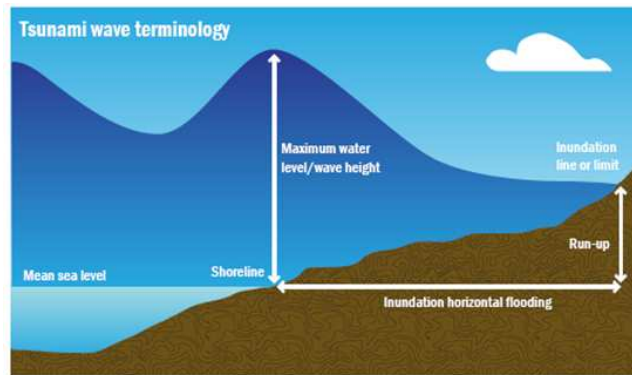


Figura 1.1: Definiciones claves

1.1. Fuentes de tsunami

Los tsunamis pueden ser generados por diversas causas: terremoto, remoción de masa, emisiones de gases de gran escala en el fondo marino, erupciones volcánicas, perturbaciones atmosféricas intensas e impacto de asteroides. De acuerdo a la base de datos terremotos, deslizamientos submarinos, erupciones volcánicas y perturbaciones atmosféricas han sido responsable de tsunamis aproximadamente 82 %, 6 %, 5 % y 3 % respectivamente (Figura 1.2)

El primer tsunami global conocido fue el generado por la erupción del volcán Krakatau el 27 de agosto de 1883. Uno de los más destructivos transoceánicos tsunamis fue el generado por el terremoto del 22 de mayo de 1960 en Chile. El más catastrófico y altamente destructivo es el tsunami del 26 de diciembre de 2004 en Sumatra, Indonesia.

1.1.1. Tsunamis generados por terremotos

La mayoría de los terremotos históricos han sido localizados en zonas de subducción. La profundidad de la fosa es aproximadamente el doble que la profundidad promedio del Océano Pacífico. Los hipocentros de los

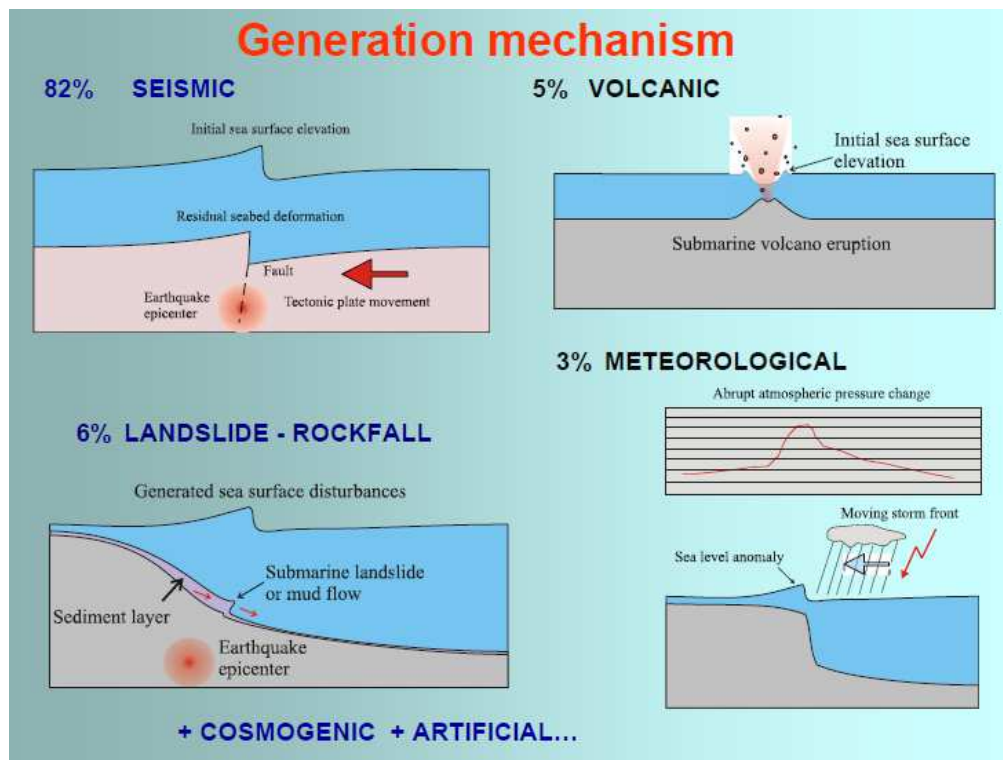


Figura 1.2: Fuentes de tsunamis

terremotos están entre las placas y sobre la pendiente bajo el fondo marino. Debido a la refracción sobre la pendiente, la mayor parte de la energía del tsunami se concentrará en las direcciones hacia la costa y mar, es decir, perpendicular a la fosa (Marchuk, 2009).

Los terremotos permanecen bloqueados por siglos y entonces repentinamente las placas se deslizan unos cuantos metros, generando un gran tsunami (Figura 1.3). Estos terremotos que ocurren en zonas de subducción causan un movimiento vertical del fondo del océano y por lo tanto, una perturbación al cuerpo de agua que está encima de la fosa, puede ser tsunamigénico. Estos terremotos generalmente generan grandes tsunamis que causan daños sobre un área mucho mayor que la que fue directamente afectada por el terremoto.

Terremotos pueden tener una naturaleza tsunamigénica (no todos generan tsunami). Los terremotos tsunamigénicos más potentes en el pasado son mostrados en la Figura 1.4 y los históricos de Chile en la Figura 1.5 y resumidos en la Tabla 1. La magnitud menor que es requerida para la generación de un gran tsunami es considerada a ser 6 en la escala de Richter. Se ha encontrado que, en general, terremotos someros tienen una probabilidad mayor de generar un tsunami de gran magnitud. Sin embargo, muchas excepciones a esta regla empírica basada en los mecanismos focales de los terremotos se han reportado.

Cuando es descrita la generación de tsunamis, las siguientes suposiciones convencionales son usualmente hechas:

1. Un terremoto instantáneamente causa una deformación permanente del suelo oceánico.
2. El desplazamiento del suelo oceánico es simultáneamente acompañado por la formación de una perturbación en la superficie del agua (elevación inicial), donde la forma de esta perturbación es muy similar a la deformación vertical del fondo oceánico.

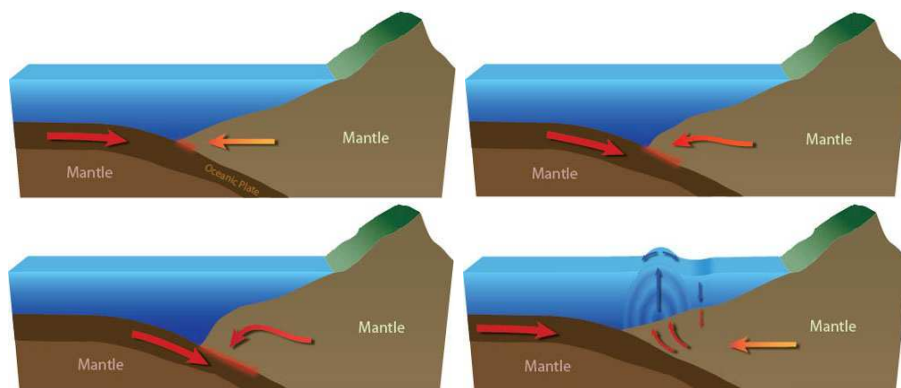


Figura 1.3: Terremoto tsunamigénico

Date	Country	Location	Magnitude
May 22, 1960	Chile	Central Chile	9.5
March 28, 1964	USA	Prince William Sound, AK	9.2
March 09, 1957	USA	Andreanof Islands, AK	9.1
November 04, 1952	Russia	Kamchatka	9
December 26, 2004	Indonesia	Off western coast of Sumatra	9
January 31, 1906	Ecuador	Off coast	8.8
February 27, 2010	Chile	Off southern coast	8.8
June 15, 1911	Japan	Ryukyu Islands	8.7
February 04, 1965	USA	Rat Islands, Aleutian Islands, AK	8.7
March 28, 2005	Indonesia	Indonesia	8.7
November 11, 1922	Chile	N. Chile	8.5
February 01, 1938	Indonesia	Banda sea	8.5
October 13, 1963	Russia	S. Kuril Islands	8.5
March 02, 1933	Japan	Sanriku	8.4
June 23, 2001	Peru	S. Peru	8.4
September 12, 2007	Indonesia	Sumatra	8.4
June 25, 1904	Russia	Kamchatka Peninsula, Russia	8.3
June 26, 1917	Samoa	Samoa Islands	8.3
August 15, 1918	Philippines	Celebes sea	8.3
April 30, 1919	Tonga	Tonga Islands	8.3
February 03, 1923	Russia	Kamchatka	8.3
April 14, 1924	Philippines	E. Mindanao Island	8.3
January 24, 1948	Philippines	Sulu sea	8.3
July 10, 1958	USA	SE. Alaska, AK	8.3
November 06, 1958	Russia	S. Kuril Islands	8.3

Date	Country	Location	Magnitude
October 04, 1994	Russia	S. Kuril Islands	8.3
September 25, 2003	Japan	Hokkaido Island	8.3
November 15, 2006	Russia	S. Kuril Islands	8.3
August 17, 1906	Chile	Central Chile	8.2
September 07, 1918	Russia	S. Kuril Islands	8.2
November 10, 1938	USA	Shumagin Islands, AK	8.2
April 06, 1943	Chile	Central Chile	8.2
May 04, 1959	Russia	Kamchatka	8.2
May 16, 1968	Japan	Off east coast of Honshu Island	8.2
August 11, 1969	Russia	S. Kuril Islands	8.2
February 17, 1996	Indonesia	Irian Jaya	8.2
September 14, 1906	Papua New Guinea	Solomon Sea	8.1
April 14, 1907	Mexico	S. Mexico	8.1
June 03, 1932	Mexico	Central Mexico	8.1
December 07, 1944	Japan	Off southeast coast of Kii Peninsula	8.1
April 01, 1946	USA	Unimak Island, AK	8.1
August 04, 1946	Dominican Republic	Northeastern coast	8.1
December 20, 1946	Japan	Honshu: S coast	8.1
August 22, 1949	Canada	British Columbia	8.1
March 04, 1952	Japan	SE. Hokkaido Island	8.1
October 17, 1966	Peru	Central Peru	8.1
January 01, 1967	Solomon Islands	Solomon Islands	8.1
October 03, 1974	Peru	Central Peru	8.1
August 16, 1976	Philippines	Moro Gulf	8.1
April 21, 1977	Solomon Islands	Solomon Islands	8.1

Figura 1.4: Tabla de terremotos tsunamigénico más potentes.

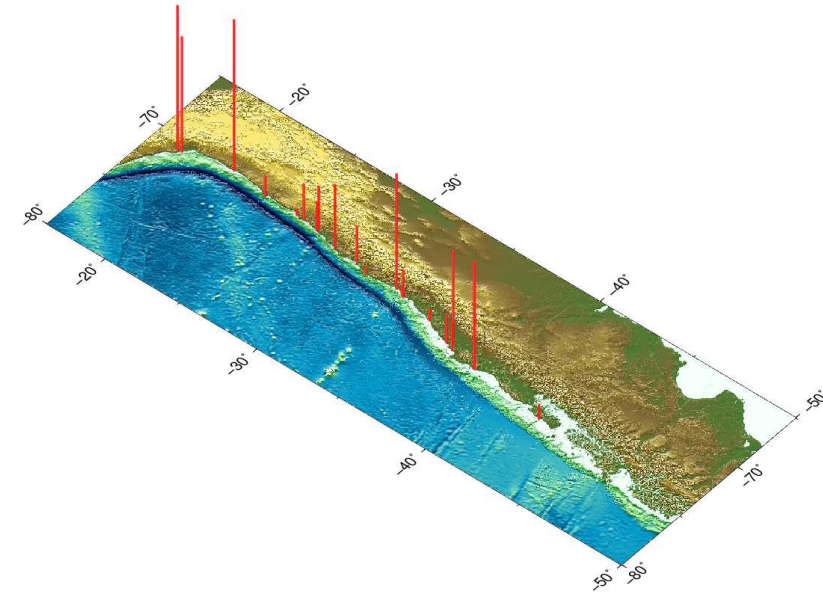


Figura 1.5: Tsunamis históricos en Chile. Datos comienzan desde el 1570 en adelante.

La elevación inicial es aplicada como la condición inicial para resolver el problema de la propagación de tsunamis. El campo inicial de velocidades de flujo es asumido como cero. La imperfección de este enfoque general es debido al menos a dos razones: primero, suponiendo que el suelo oceánico es horizontal y las deformaciones son instantáneas, el desplazamiento de la superficie del agua y la deformación vertical del suelo no será la misma, en el sentido de que el desplazamiento de la superficie del agua será más suave. Segundo, en el caso en que el suelo oceánico tenga algún grado de pendiente (no-horizontal), la componente horizontal de la deformación puede también contribuir significativamente al desplazamiento de la superficie del agua.

Los resultados de la modelación numérica y análisis hechos por Ribonovich et al. (2008), remarcen el hecho de que terremotos de magnitudes comparables generados en regiones adyacentes no necesariamente generarán un tsunami idéntico. Diferencias en el alcance espacial, profundidad y estructura de la falla de terremotos cercanamente relacionados pueden llevar a distintas respuestas de tsunamis, incluyendo diferencias en la amplitud máxima de la ola, contenido de frecuencias dominantes, polaridad de la onda y dirección de la propagación de energías. Estos factores deben ser tomados en cuenta cuando se modela la respuesta del océano para terremotos y cuando se está tratando de usar observaciones de tsunamis para encontrar los parámetros de la fuente.

1.1.2. Tsunamis generados por remoción de masas submarinas y en superficie

Por remoción en masa entenderemos deslizamientos de tierra y deslizamientos de rocas. Terremotos sobre tierra o mar producen remoción en masa, superficiales o submarinas, pero la remoción en masa no requiere que siempre un terremoto la genere.

Remociones en masa de superficie o submarinas “tipo impulsivo”, es decir de corta duración, (o episodios de muchos eventos discretos) han generado tsunamis. Aunque un deslizamiento de tierra submarino o superficial que fluye hacia un gran cuerpo de agua puede causar un tsunami, los deslizamientos superficiales son mucho más efectivos generadores de tsunami que los lentos deslizamientos submarinos. Ha sido observado que remociones submarinas generan tsunamis sólo cuando el volumen de material movido es substancial y se

Cuadro 1: Tsunamis históricos en Chile

Año	Latitud [°]	Longitud [°]	Altura [m]	Magnitud Terremoto
1570	-36.5	-74	4	8.0-8.5
1575	-38.5	-74.5	4	8.5
1604	-18	-71	16	8.7
1657	-37	-72.8	4	8.0
1730	-32.5	-71.5	16	8.7
1751	-36.5	-74	3.5	8.5
1819	-27	-71.5	4	8.5
1822	-33	-72.5	3.5	8.3
1835	-36.8	-73	13	8.0-8.2
1837	-42.5	-74	2	8.0
1849	-29.9	-71.4	5	7.5
1851	-27	-71.8	3	7.0-7.5
1859	-27	-70	6	7.5-7.7
1868	-17.7	-71.6	20	8.8
1877	-21	-70.3	21	8.8
1906	-33	-72	1.5	8.3
1918	-26	-70	5	7.6
1922	-28.5	-70	9	8.4
1928	-35	-72	1.5	7.9
1943	-30.75	-72	1	8.1
1960	-38.5	-74.5	15	9.5
1966	-25.5	-70.7	0.8	7.8
1985	-33.11	-71.61	1.2	8.0
1995	-23.43	-70.48	2.8	8.0

mueve a una gran velocidad.

Las características de los tsunamis generados por remoción en masa son diferentes que los generados por terremotos. Mientras que el máximo de energía de los tsunamis generados por terremotos esta enfocado perpendicularmente al strike de la fuente y decrece en intensidad a lo largo del strike, los tsunamis generados por remoción (que se mueven en la dirección de la pendiente) están más concentrados y se propagan paralelos a la pendiente (Chadha, 2007).

El evento más extremo, de este tipo de generadores, cocurrió el 9 de julio de 1958 cuando hubo un deslizamiento de tierra (deslizamiento del glaciar) en la Bahía Lituya en Alaska, generado por un terremoto de magnitud 8.3, causó una ola gigante que alcanzó una altura de 525 m en la costa. El tsunami del 3 de noviembre de 1994 en el puerto Skagway, Alaska fue generado por un deslizamiento de tierra submarino formado durante el colapso del muelle de cruceros que estaba en construcción. Este evento no fue asociado a algún evento sísmico regional o a algún tsunami que venga del océano. El deslizamiento de tierra fue acompaado por una serie de ondas solitarias de gran amplitud y alta frecuencia estimadas por testigos a tener entre 9 y 11 m de altura en la costa. De acuerdo a los testigos, inmediatamente después del colapso del muelle, una “pared de agua” se propagó hacia la costa.

Los tsunamis generados por remoción en masa tienen escalas horizontales mucho menores que los generados por terremotos. Esto es porque la mayoría de los tsunamis generados por remoción en masa han sido observados en regiones localizadas.

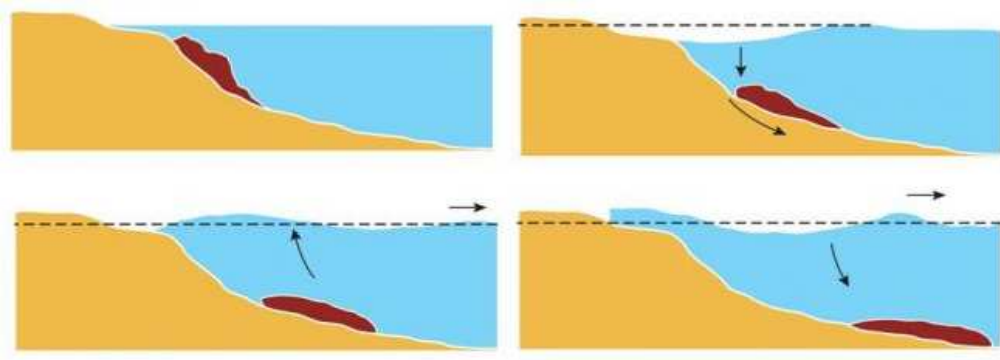


Figura 1.6: Ejemplo de remoción en masa tsunamigénica.

Han habido instancias en que grandes tsunamis fueron generados por avalanchas de rocas. Por ejemplo, en la bahía Knight en Columbia Británica, Canadá fue completamente inundada por un tsunami de alturas entre 2 y 6 m que se formó cuando una avalancha de rocas de 840 m de altura y $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ descendió dentro del agua en el lado opuesto del fiordo en la mitad de siglo 19.

1.1.3. Tsunamis generados por erupciones volcánicas

Aproximadamente el 5% de todos los tsunamis son generados por erupciones volcánicas (Figura 1.7). El famoso tsunami global causado por la erupción volcánica en la Isla Krakatau en Indonesia, el 27 de agosto de 1883, es un ejemplo clásico. La isla volcánica Krakatau erupcionó con una furia tan devastante en la cual el suelo oceánico que rodeaba la isla colapsó dentro de su cámara submarina de magma. Una serie de grandes olas de tsunami fueron generadas por la explosión alcanzando algunas de ellas hasta los 35 m sobre el nivel del mar.



Figura 1.7: Tsunami generado por erupción volcánica.

1.1.4. Tsunamis generados por perturbaciones meteorológicas

Ondas largas generadas por fuerzas atmosféricas, es decir, por ciclones, huracanes, chubascos frontales con truenos, ondas de gravedad atmosféricas, saltos de presión atmosférica y ondas de viento, pueden ser responsables por ondas largas significantes e incluso devastadoras. Estas ondas son llamadas “tsunamis meteorológicos” o “meteo-tsunamis”, ya que tienen las mismas escalas temporales y espaciales que las típicas ondas de tsunamis (tienen aproximadamente las mismas frecuencias que las generadas sísmicamente y además tienen una forma muy similar) y pueden afectar a las costas en una manera muy similar, aunque sus efectos catastróficos son normalmente observados solamente en un limitado número de bahías y ensenadas específicas.

Otros mecanismos que pueden resultar en un meteo-tsunami incluyen las mareas generadas por ondas internas, superposición de ondas, interacción viento-corriente y ondas de choque atmosféricas de actividad volcánica. Los catálogos de tsunamis normalmente contienen referencias a eventos “tipo-tsunami” de “origen desconocido”. que podrían, de hecho, ser ondas de océano generadas atmosféricamente. Muchos eventos de “tipo-tsunami” significantes fueron recientemente observados en registros de nivel de mar en la costa del Mar Adriático, Islas Baleares, Canal de Bristol, Canal Inglés, Columbia Británica (Canadá) y en el estado de Washington (USA).

Un ejemplo clásico a menudo citado en conexión con los meteo-tsunamis es el que ocurrió el 21 de junio de 1978 en Vela Luka, la cual es un pequeño pueblo escondido en una bahía de la Isla Korkula en el Mar Adriático. Durante la mañana de ese día el mar repentinamente empezó a elevarse sobrepasando los puertos y entrando a las calles. El ruido de la pared de ola proveniente del mar despertó a los habitantes, quienes observaron una serie de olas oceánicas destructivas, inundando la mayor parte del pueblo. El mar “se recogió” alrededor de 100 m dejando el puerto seco y entonces volvió violentamente. Este fenómeno ocurrió aproximadamente cada 18 minutos durando una hora. Este evento fue sentido en la mitad sur del Mar Adriático. Sin embargo, no hay registro de un terremoto en ese tiempo. En varios catálogos este evento está marcado como “desconocido” en el mecanismo de fuente. Investigaciones científicas posteriores indicaron que las ondas no estaban relacionadas a un evento sísmico o a un deslizamiento submarino, sino que fue a un proceso atmosférico: una perturbación que viaja y que tiene la capacidad de transferir energía resonante al océano vía el mecanismo resonante de Proudman. Muchos meteo-tsunamis destructivos afectaron a la costa oriental del Adriático en las últimas décadas, y por supuesto atrajo mucho la atención de investigadores locales en orden de explicar esta fuente, generación y mecanismo de propagación, así como también la inundación a lo largo de topografías costeras complejas.

Los tsunamis meteorológicos han sido encontrados a ser inducidos por la superposición resonante de factores externos como perturbaciones atmosféricas fuertes resonantes que interactúan con ondas de océano abierto y factores internos como las propiedades resonantes de una bahía o puerto específico. Las direcciones de su propagación ha sido observada a variar entre los eventos.

Debido a que los meteo-tsunamis tienen, en general, un mecanismo de generación multiresonante, es necesario coincidir muchos factores resonantes lo que disminuye significativamente la posibilidad de ocurrencia. Esta es la principal del por qué este fenómeno es raro y restringido a localidades específicas. El Mar Mediterráneo es una región donde los meteo-tsunamis son bastante comunes.

Los tsunamis meteorológicos son similares en apariencia a los tsunamis ordinarios (Figura 1.8) y pueden afectar las costas de manera similar y dañina, aunque como fue indicado antes, los efectos catastróficos relacionados al primero son normalmente observados en bahías y ensenadas específicas. Ha sido demostrado por Monserat y colegas (2006) que los tsunamis “normales” y los meteo-tsunamis tienen los mismos periodos, escalas espaciales y propiedades físicas similares. Los meteo-tsunamis son mucho menos energéticos que los sísmicos, y esta es la razón del por qué son generalmente locales.

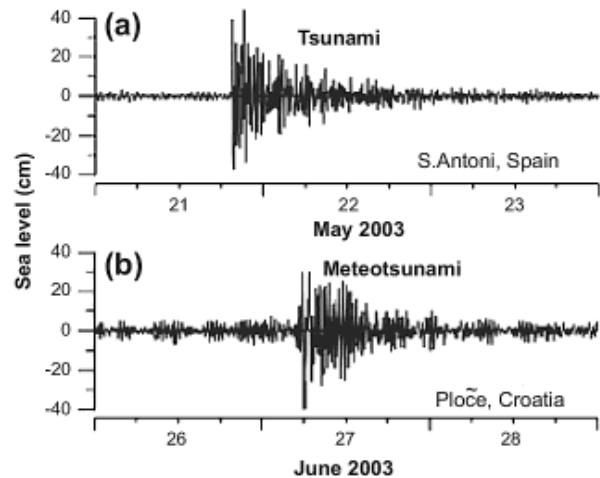


Figura 1.8: (a) Tsunami registrado en Sant Antoni, España. (b) Meteo-Tsunami registrado en Puerto Ploče, Croacia.

1.1.5. Tsunamis generados por emisiones de gases submarinas

En documentos antiguos que describen los terremotos de 1854 de Ansei Nakai y 1964 Showa Nankai, Tsuji y Tachibama (2009) aprendieron que aparecieron “columnas de fuego” (Figura 1.9) sobre la superficie de mar en bastantes villas en la costa de la Península de Kii y en la Isla Shikoku. Los testigos cuentan que las columnas de fuego aparecieron justo antes del tsunami, burbujas de gas se elevaron desde el fondo oceánico días después del tsunami, la presencia de agua caliente vinculada al tsunami y los peces muertos que pareciera que hubiesen sido “cocidos”, proveen una indicación creíble de la relación tsunami - emisiones de gas.

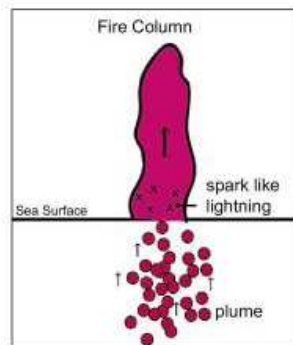


Figura 1.9: Columnas de fuego.

Investigaciones geológicas han indicado la presencia de un capa de metano hidratado que está distribuída fuera de la costa de esos distritos, donde columnas de fuego y tsunamis han sido observados. Basados en estas investigaciones, ha sido inferido que la causa probable de la formación de las columnas de fuego podrían haber sido explosiones de metano hidratado inflamable contenidos en capas del suelo oceánico. Han habido instancias en que la disociación de has hidratado juega un rol en inducir deslizamientos de tierra.

La generación de tsunamis por la elevación de burbujas de metano viene de un mecanismo de balance de presión.

El incremento impulsivo en la altura del agua localmente sobre la región emisora de gas por este mecanismo da origen a la generación de un impulso, el cual es suavizado a la forma de una campana gaussiana en la superficie del mar y transmitido como una onda de tsunami.

Fuertes vibraciones, generadas por terremotos o deslizamientos de tierra submarinos, en las capas del fondo del océano que están impregnadas con metano hidratado y gases asociados, puede resultar en la generación de tsunami u ondas “tipo-tsunami”.

El 17 de julio de 2006, un terremoto ocurrió en el sur de Java Central en Indonesia. Después del terremoto, un gran tsunami golpeó la costa sur de la parte central de la Isla de Java. Columnas de agua alcanzaron 7.7 m sobre el nivel del mar en Panbandaran. Es curioso que el tsunami fue demasiado fuerte para la magnitud del terremoto (7.2), y el modelo de falla obtenido por los registros de nivel de mar no explicarían estas alturas. Más aún, una nube de forma de callampa (probablemente gas emitido desde el suelo oceánico) fue observado en el mar frente a la costa sur de Jogjakarta.

1.1.6. Tsunamis generados por impactos de asteroides

Evidencia de impactos en el océano por cometas de gran tamaño y los efectos físicos ambientales resultantes de estos impactos de asteroides han sido encontrados en la literatura (Figura 1.10).

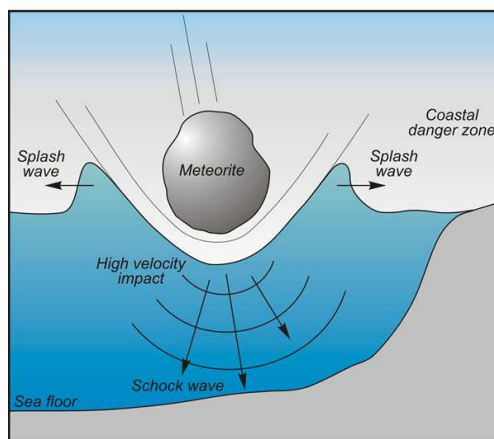


Figura 1.10: Impacto de asteroide.

Impacto de un gran asteroide (con 10 km de diámetro estimado) en Chicxulub, en la península de Yucatan, México generó un cráter de alrededor de 180-200 km en diámetro. Este impacto desencadenó flujos de masas y tsunamis en el Golfo de México y áreas adyacentes hace 65.5 millones de años atrás.

Datos experimentales acerca de tsunamis generados de grandes colisiones no son disponibles. Por esta razón, la herramienta usada es el modelamiento matemático. Modelos de impacto de asteroides han predicho que un impacto suficientemente grande para generar el cráter de Chicxulub debiera inducir terremotos de magnitudes mayores a 11, colapso de plataformas alrededor de Yucatan y tsunamis que inundarán zonas costeras de los océanos que lo rodea.

1.2. Magnitud e Intensidad de Tsunamis

La estimación del grado de peligro de tsunami para las costas está basado principalmente en un análisis estadísticos de los eventos, que han ocurrido en el pasado. Los tsunamis evidentemente varían en potencia desde ondas débiles que pueden ser registradas sólo con la ayuda de instrumentos hasta terribles catastróficos eventos que desvastan la costa a lo largo de cientos de kilómetros.

Para estimar la potencia de este fenómeno es necesario introducir algunas características cuantitativas para hacer un análisis estadístico. La determinación de estas características cuantitativas no es un problema trivial, la resolución de ésto no ha sido alcanzada aún.

Un tsunami puede ser caracterizado por parámetros objetivos medibles como la energía, amplitud, periodo, etc. y además por parámetros subjetivos como la escala de reflexión, grado de destrucción causado por la onda o de su manifestación en la costa. Al igual que en los terremotos, la estimación del peligro de tsunami o descripciones subjetivas son más importantes que los parámetros físicos abstractos. Los habitantes costeros no están preocupados de la energía de la onda que se aproxima este en joules, sino que si la ola es peligrosa para sus vidas o qué daño puede causar para tratar de evitarlo.

El primer intento de clasificar los tsunamis fue hecho por Sieberg, 1927 (modificada en 1967), quien introdujo una escala de seis puntos de intensidad de tsunami análoga a la de intensidades de terremotos. Esta escala no está relacionada con parámetros físicos (alturas de olas, largos run-up, etc.), sino que está basada en la descripción de los efectos macroscópicos.

Escala de intensidad de tsunami de Sieberg-Ambraseys

1. Muy suave (very light) Las olas pueden ser registradas sólo por mereógrafos.
2. Suave (light) Olas que las notan sólo los que viven en la costa. En costas muy planas son generalmente notadas.
3. Relativamente fuerte (rather strong) Olas que pueden ser vistas. Inundaciones en costas con poca pendiente. Naves livianas llevadas lejos de la costa. Poco daño a estructuras livianas situadas en la costa. En ríos, el mar entra en contra del flujo una distancia pequeña.
4. Fuerte (strong) Inundación en la costa. Edificios, terraplenes, diques y suelo cultivado cerca de la costa dañados. Pequeñas y medianas embarcaciones arrastradas hacia mar a dentro o hacia la costa. La costa llena de basura.
5. Muy fuerte (very strong) Significante inundación en la costa. Estructuras sólidas y muros de embarcaderos cercanos a la costa dañados. Estructuras livianas destruidas. Arrastre de suelos cultivados. La costa con basura arrastrada por el mar como artículos flotantes, pescados, animales marinos, etc. Con la excepción de grandes barcos todas las otras embarcaciones son arrastradas mar adentro o hacia la costa. Mascaret en desembocaduras de ríos. Puertos dañados. Personas ahogadas. Las olas son acompañadas de un gran estruendo.
6. Desastre (disastrous) Destrucción parcial o total de estructuras artesanales a una distancia considerable de la costa. Fuertes inundaciones en las costas. Grandes barcos severamente dañados. Árboles arrancados de raíz o partidos. Muchas víctimas.

Numerosos intentos han sido hechos en Japón para introducir una cantidad característica de la potencia del tsunami. Imamura introduce, e Iida mejora, el concepto de magnitud de tsunami. Una propuesta fue hecha para estimar la magnitud por la fórmula:

$$m = \log_2 H_{max}$$

donde H_{max} es la altura máxima de la ola en metros, observada en la costa o medida por un mareógrafo. En la práctica la escala Imamura-Iida es una escala de seis puntos (de -1 a 4).

Intentando mejorar la escala de Imamura-Iida, S.L. Soloviev introdujo la siguiente intensidad de tsunami:

$$I = \frac{1}{2} + \log_2 H$$

donde H es la altura promedio del tsunami en la costa más cercana a la fuente. Esta definición de intensidad de tsunami es extendida y la escala correspondiente es llamada “escala de intensidad de tsunami de Soloviev-Imamura”.

Notemos que la definición de magnitud de Imamura-Iida es, en general, inequívoco. Sólo requiere conocer la amplitud máxima de la ola. La definición de intensidad de tsunami de Soloviev-Imamura no es matemáticamente rigurosa y, consecuentemente, nos da más libertad en el cálculo de la altura promedio de la ola de tsunami. También es importante notar que en el caso de numerosos eventos históricos y, más aún, eventos prehistóricos (paleotsunamis) la única información disponible consta de estimaciones de alturas de olas en un punto en particular o de varios puntos a lo largo de la costa. Así, ambas escalas son convenientes y serán aplicadas por largo tiempo.

Por otro lado, una característica base que es medida para calcular magnitud o intensidad es el área inundada en vez de altura de ola. Esta característica puede resultar una alternativa exitosa y prometedora a la altura de ola en la costa. Una clara ventaja del área inundada es que no sólo puede ser convenientemente medida por medios remotos (satélites, aeroplanos, etc), sino que también esta característica refleja automáticamente la escala de la catástrofe que ocurrió.

Abe y Hatori propusieron modificar la escala de magnitud de tal forma que tome en cuenta el debilitamiento de las olas a medida de que la distancia de la fuente aumente,

$$M_t = a \log h + b \log \Delta + D$$

donde h es la amplitud de onda máxima en la costa medida desde el valle a la cresta en metros, Δ es la distancia desde el epicentro del terremoto al punto de medida en kilómetros, a , b y D son constantes. Esta definición nos recuerda la definición de magnitud sísmica.

Un enfoque esencialmente diferente a la definición de magnitud de tsunami fue hecho por Murty y Loomis, 1980, donde el cálculo de la magnitud está basado en la estimación de la energía potencial de tsunami E (en ergs),

$$ML = 2(\log E - 19)$$

La definición de magnitud basada en la energía de la onda es, naturalmente, la definición más adecuada, desde el punto de vista físico. Sin embargo, no es siempre posible calcular la energía de la ola. Hoy día estos cálculos están basados en la energía potencial de la elevación inicial de la superficie de agua, considerada a ser idéntica al desplazamiento del suelo oceánico. Estos desplazamientos son calculados con los parámetros de terremotos usando las fórmulas de Okada.

Debe ser notado que la magnitud de Imamura-Iida y la intensidad de Soloviev-Imamura nos da una idea de la altura de la ola en la costa, y consecuentemente, nos permite juzgar la escala de destrucción. Pero, a pesar de que la magnitud de tsunami de Murty-Loomis, ML , es una cantidad físicamente correcta, no estará relacionada a la manifestación del tsunami en la costa.

Recientemente, una nueva escala descriptiva de intensidad de tsunami de 12-puntos fue propuesta por Papadopoulos e Imamura en 2001. Su elaboración estuvo basada en más de 100 años de experiencia, acumulada por sismólogos. Esta escala no está relacionada a ningún parámetro físico cuantitativo (amplitud de ola, energía, entre otros), está organizada en concordancia con las siguientes tres características:

- (a) Su influencia en la gente.
- (b) Su impacto sobre objetos naturales o artificiales, incluyendo barcos de diferente tamaño.

(c) El daño causado a los edificios.

Así, un tsunami de gran amplitud que llega a una costa débilmente poblada podría estar asignado a una intensidad baja de acuerdo a la escala Papadopoulos-Imamura. Y por el contrario, un tsunami de amplitud moderada que llega a una costa densamente poblada podría estar caracterizado por una alta intensidad.

Escala de intensidad de tsunami de Papadopoulos-Imamura

I No sentido (sólo por instrumentos especiales)

- (a) No sentido incluso en la más favorable circunstancia.
- (b) Ningún efecto.
- (c) Sin daños.

II Escasamente sentido

- (a) Sentido por algunas personas en botes livianos. No observado en la costa.
- (b) Ningún efecto.
- (c) Sin daños.

III Débil

- (a) Sentido por la mayoría de las personas en botes livianos. Observado por algunas personas en la costa.
- (b) Ningún efecto.
- (c) Sin daños.

IV Mayormente observado

- (a) Sentido por todas las personas en botes livianos y por algunas en grandes embarcaciones. Observado por la mayoría de las personas en la costa.
- (b) Algunos botes livianos son arrastrados suavemente hacia la costa.
- (c) Sin daños.

V Fuerte

- (a) Sentido por todas las personas en grandes embarcaciones. Observado por todas las personas en la costa. Algunas personas se asustan y corren a lugares elevados.
- (b) Muchas embarcaciones livianas son llevadas tierra adentro distancias significantes, algunas de ellas chocan entre sí o se vuelcan. La ola deja capas de arena en lugares con condiciones favorables. Inundación limitada de tierra a lo largo de la costa.
- (c) Inundación limitada en estructuras costeras, edificios y áreas cerca de las residencias (jardines, etc).

VI Ligeramente dañino

- (a) Mucha gente está asustada y corre a lugares en altura.
- (b) La mayoría de las embarcaciones livianas son arrastradas tierra adentro sobre distancias significativas, experimentan fuertes colisiones unas con otras y se vuelcan
- (c) Algunas estructuras de madera son destruidas e inundadas. La mayoría de las estructuras de ladrillos sobreviven.

VII Dañino

- (a) La mayoría de las personas están asustadas y corren a lugares en altura.
- (b) La mayoría de las embarcaciones livianas están dañadas. Algunas embarcaciones grandes experimentan vibraciones significativas. Objetos de variadas dimensiones y estabilidades se vuelcan y cambian sus posiciones. La ola deja capas de arena y acumula piedras. Algunas estructuras flotantes son arrastradas mar adentro.
- (c) Muchas estructuras de madera son dañadas, algunas completamente destruidas o llevadas al mar por la ola. Destrucciones de primer orden y edificios de ladrillos inundados.

VIII Fuertemente dañino

- (a) Toda la gente corre a lugares en altura, algunas son arrastradas por el mar.
- (b) La mayoría de las embarcaciones livianas están dañadas, muchos son llevadas lejos por la ola. Algunas embarcaciones grandes son llevadas tierra adentro y sufren colisiones unas con otras. Grandes objetos son arrastrados. Erosión y llenado de basura en la costa, inundaciones extensivas y daños significantes a plantaciones de árboles anti-tsunamis. Muchas estructuras flotantes son llevadas por la ola, algunas están parcialmente dañadas.
- (c) La mayoría de las estructuras de madera son arrastradas o completamente destruidas. Destrucción de segundo orden en edificios de ladrillos. La mayoría de los edificios de concreto no son dañados, algunos experimentan destrucción de primer orden e inundación.

IX Destructivo

- (a) Muchas personas son llevadas por la ola.
- (b) La mayoría de las embarcaciones pequeñas son destruidas y llevadas por la ola. Muchas embarcaciones grandes son llevadas tierra adentro distancias significativas y algunos son destruidos. Hay erosión y llenado de basura en la costa. Subsistencia local y destrucción parcial de plantaciones de árboles anti-tsunamis. La mayoría de las estructuras flotantes son arrastradas por la ola mar adentro y muchas están parcialmente dañadas.
- (c) Destrucción de tercer orden en muchos edificios de ladrillo. Algunos de concreto han experimentado destrucción de segundo orden.

X Muy destructivo

- (a) Pánico general. La mayoría de las personas son arrasadas por la ola.
- (b) La mayoría de grandes embarcaciones son llevadas tierra adentro, muchas destruidas o experimentan colisiones con edificios. Pequeñas rocas son llevadas desde el fondo marino a la costa. Vehículos son volcados y desplazados. Hay fuegos. Hay subsistencia.
- (c) Destrucción de cuarto orden en muchas casas de ladrillo, algunos edificios de concreto sufren destrucción de tercer orden. Represas artificiales son destruidas y rompeolas de puertos dañados.

XI Devastador

- (b) Comunicaciones son destruidas. Muchos fuegos. Flujos de agua arrastran vehículos y otros objetos al mar. Grandes rocas del fondo marino son llevadas a tierra.
- (b) Destrucciones de quinto orden en edificios de ladrillos. Algunos de concreto sufren daños de cuarto orden y algunos de quinto orden.

XII Completamente devastador

- (c) Prácticamente todos los edificios de ladrillos están destruidos. La mayoría de concreto sufren destrucción de orden no menor que tres.

1.3. Observaciones

Registros de tsunami pueden ser obtenidos desde instrumentos, paleodatos y documentos históricos. Algunos instrumentos son mareógrafos de radar y de fondo marino, boyas DART, GPS Tsunami-meter, entre otros (Figura 1.11). Paleotsunamis se refiere a tsunamis que han ocurrido antes de la existencia del registro histórico y de las observaciones instrumentales. Estos trabajos se basan principalmente en la identificación, recolección y datación de los depósitos de tsunamis encontrados en áreas costeras y su correlación con sedimentos similares encontrados en áreas locales, regionales o en cuencas oceánicas (Figura 1.12).

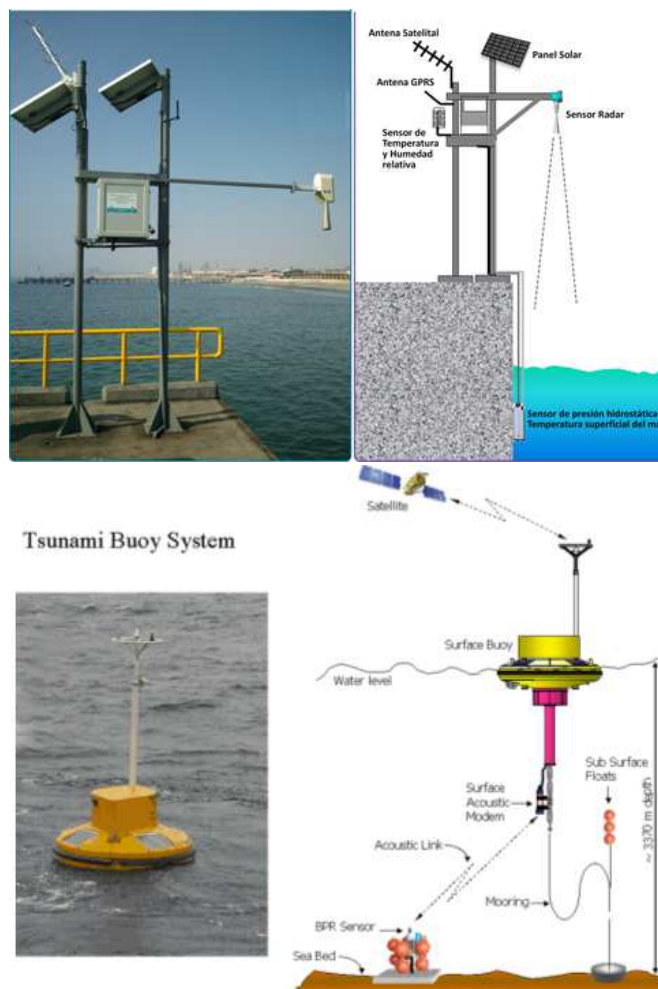


Figura 1.11: Instrumentación: Mareógrafos (arriba). Boya DART (abajo).

1.4. Base de datos de tsunamis

El peligro de tsunami tiene una extensa consecuencia social como resultado de la vulnerabilidad de las áreas pobladas, especialmente de las comunidades costeras. En contraste a muchos otros desastres naturales, tsunamis pueden producir efectos catastróficos a miles de kilómetros lejos de la fuente. Después del tsunami del Océano Índico del 2004 (Sumatra) generó un aumento significativo en el interés científico y público en este



Figura 1.12: Depósitos de tsunamis históricos

peligro natural. La recopilación de datos de tsunamis observado y la catalogación de información histórica sobre tsunamis es la clave para la examinación científica de las ondas de tsunami, la estimación y migración de riesgo de tsunami para las áreas costeras, y el mejoramiento del sistema de alerta existente.

Registros históricos de marea y tsunamis nos ayudan a entender la naturaleza de un tsunami comenzando tempranamente cuando es generado, a menudo por un terremoto, y su impacto en las costas y a través de los océanos. Datos históricos sobre la ocurrencia de tsunami, procesos de run-up y sus efectos dañinos son usados para evaluar el potencial de tsunami de áreas costeras y para la determinación del grado de peligro y riesgo de tsunami.

1.4.1. Datos de tsunami de Estados Unidos

Una importante fuente de información en terremotos significativos, erupciones volcánicas y tsunamis globales históricos son los catálogos producidos por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Geophysical Data Center (NGDC) (Figura 1.14). Datos históricos no cubren periodos suficientes de tiempo para revelar completamente el peligro de tsunami, por lo que artículos de depósitos de tsunamis están incluidos en los archivos. La NGDC ha expandido los archivos para incluir datos de mareógrafos de alta resolución, datos de sensores de fondo marino y modelos de elevación digital usados para propagación e inundación.

Los datos históricos de la NGDC incluye sobre de 2000 eventos, datados desde 2000 a.c. hasta el presente. La primera base de datos contiene información de la fuetne, fecha, tiempo de duración, ubicación, magnitud e intensidad (ejemplo: magnitud sísmica o índice de explosividad volcánica) y de la intensidad de tsunami, magnitud, validez y altura máxima del agua. Además incluye detallada información socioeconómica tal como el número de fatalidades, heridos, casas destruidas y la pérdida financiera total. La segunda base de datos contiene información de la ubicación en donde las olas fueron observadas (usando run-ups, testigos, investigaciones en terreno, mareógrafos o sensores de fondo oceánico) tales como altura de la ola, inundación horizontal, tiempo de llegada, distancia de la fuente e información socioeconómica.

www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml

NOAA NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION

NOAA > NESDIS > NGDC > MGGD > Natural Hazards

SEARCH NGDC

comments | privacy policy

Tsunamis Earthquakes Volcanoes

Tsunami Data and Information

NGDC and the co-located World Data Service for Geophysics compile a unique set of tsunami-related products as part of a continuing program to support the interests of tsunami warning centers, engineers, oceanographers, seismologists, and the general public.

February 6, 2013 Solomon Islands Earthquake and Tsunami

March 11, 2011 Honshu, Japan Tsunami Event

Data

Global Historical Tsunami Events and Runups
Tsunami Deposits and Proxies
Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART®)
Tide Gauge Records
Tsunami Inundation DEMs

Maps

Natural Hazards Interactive Map
Tsunami Travel Time Maps
Natural Hazards KMZ file

Images, Posters and Publications

Tsunami Images
Global Tsunami Poster
Tsunami Sources Icosahedron
Tsunami Publications
Tsunami Science on a Sphere

Animation provided by Vasily Titov, NOAA/PMEL

A tsunami is a series of waves generated by an impulsive disturbance in the ocean or in a small, connected body of water. These waves sometimes inflict severe damage to property and pose a threat to life in coastal communities. In the open ocean a tsunami is less than a few centimeters high, traveling at ~800 km / hour (the speed of a commercial jet airplane) with wave energy extending from the surface to the ocean floor. As the tsunami approaches the coastline, the wave energy is compressed into a much shorter distance, creating potentially large destructive waves posing a threat to life in coastal communities.

Natural Hazards Interactive Map

Tsunami Sources Poster

Tsunami Travel Time Maps

Natural Hazards KMZ file

NOAA > NESDIS > NGDC > MGGD > Natural Hazards

Questions: haz.info@noaa.gov

NGDC Home | Contacts | Data | Disclaimers | Education | News | Privacy Policy | Site Map

NOAA DATA CENTER AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION

NOAA > NESDIS > NGDC > Natural Hazards

The NOAA/WDC Tsunami Event Database (this search page) contains information on the source of the tsunami. It is related to the Tsunami Runup database which contains information on locations where tsunami effects occurred. The [Tsunami Runup](#) database provides more information on the contents of this database.

- To display a subset of the Event Database enter the information for one or more of the following search options and then click the **Search Database** button.
 - Click the **Clear Form** button for each additional search.
 - To retrieve the entire database, click the **Clear Form** button and the **Search Database** button at the bottom of this page.
 - The file contains over 2400 events and is approximately 3.1 MB.
 - * NOTE: Do not use commas when entering numbers into the form.
- To import the resulting search into an MS Excel spreadsheet: Select Data Output Options - tab-delimited format (bottom of page)
- The database can also be displayed and extracted with the [Natural Hazards Interactive Map](#)

Tsunami Source Parameters:

Source Date as a Year (~2000 to present): Beginning Ending

Source Region Name:

Source Country:

Range of Coordinates in decimal degrees for the Source Location:

Latitude: 0 to 90 (Northern Hemisphere) -90 to 0 (Southern Hemisphere)
Longitude: 0 to 180 (Eastern Hemisphere) -180 to 0 (Western Hemisphere)

Northernmost Latitude
(enter one number from -90 to 90):

Westernmost Longitude
(enter one number from 180 to 180):

Easternmost Longitude
(enter one number from -180 to 180):

Southernmost Latitude
(enter one number from -90 to 90):

Validity of Tsunami: Minimum Maximum

Cause of Tsunami: Minimum Maximum

Earthquake Magnitudes (0.0 to 9.0), for earthquake-generated tsunamis: Minimum Maximum

Tsunami Events that generated Runups in specific Locations:

Runup Region Name:

Runup Country:

Distance of Runups from tsunami source (0 to 20000 km): Minimum Maximum

Distance computed is the shortest path (great-circle distance), and may not equal the distance the tsunami traveled.

Tsunami Effects:

Number of Runups generated by the tsunami (0 to 1042): Minimum Maximum

Maximum Water Height (0.07 to 325 m): Minimum Maximum

Number of Deaths (0 to 300000): Minimum Maximum

Damage in Millions of Dollars: Minimum Maximum

Data Display Options:

Return All Selected Events, Sorted by:

* Date, Country
() Country, Date

Figura 1.13: Ejemplo de la página web USA.

1.4.2. La base de datos de Rusia

El Laboratorio de Tsunami Novosibirsk Ruso también mantiene una base de datos de tsunamis históricos global (GTDB) (Figura 1.15). La información básica generalmente incluye la fecha, tiempo y ubicación

del evento, la magnitud del fenómeno (magnitud sísmica, intensidad de tsunami, índice de explosividad volcánica) e información socioeconómica tal como el número de fatalidades y el grado de pérdida financiera.



Figura 1.14: Ejemplo de la página web rusa.

Esta base de datos (<http://tsun.sscc.ru/>) contienen 2139 eventos históricos que han ocurrido en los océanos del mundo durante los últimos 4000 años, incluyendo 1206 de ellos en el Océano Pacífico (límites geográficos 60°S-60°N; 80°E-100°W), 263 en el Atlántico, 125 en el Índico y 545 en la región mediterránea.

1.4.3. La base de datos de la UNESCO

El entendimiento de cómo leer e interpretar mereogramas para confirmar la destructividad de los tsunamis es esencial para los procedimientos de cada Centro de Alerta de Tsunami Nacional (TWC). Los registros de nivel de mar observados muestran no sólo la potencia del tsunami, sino que también las condiciones locales de donde el mareógrafo está situado. Entendiendo cómo interpretar los tsunamis y reconocer e identificar la resonancia local y el resultado de la amplificación de las ondas es especialmente importante para los TWC. Para construir una base de datos de aprendizaje, la UNESCO/IOC/ITIC (Figura 1.15) ha compilado registros históricos de nivel de mar de tsunamis pasados para compilar la anatomía de los tsunamis en áreas cercanas, regionales y lejanas y desde una variedad de fuentes alrededor del mundo.



Figura 1.15: Ejemplo de la página web de la UNESCO.