TSUNAMIS

en Perú

Chimbote, 1996

Callao, 1746

Pisco, 2007

Camaná, 2001

MARINA DE GUERRA DEL PERÚ

DIHIDRONAV
DIRECCIÓN DE HIDROGRAFÍA Y NAVEGACIÓN
MARINA DE GUERRA DEL PERÚ

MARINA DE GUERRA DEL PERÚ
CNAT
CENTRO NACIONAL DE ALERTA DE TSUNAMIS

REPÚBLICA DEL PERÚ
MINISTERIO DE DEFENSA
MARINA DE GUERRA DEL PERÚ

DIRECCIÓN DE HIDROGRAFÍA Y NAVEGACIÓN

CENTRO NACIONAL DE ALERTA DE TSUNAMIS

TSUNAMIS

en Perú

Tsunamis en Perú

Elaborado por:
César Jiménez Tintaya
Erick Ortega Rafael
Nabilt Moggiano Aburto
Daniel Olcese Huerta
Paul Quispe Solano

Revisado por:
Calm. Carlos Guerrero Malpartida
C. de N. Jorge Vizcarra Figueroa
C. de N. Carlos Holguin Valdivia
C. de C. Enrique Varea Loayza
C. de C. Lorena Márquez Ismodes
A. de F. Melder Masias Villegas
TS2 Hid. Mario Guerrero Mera
T1 Hid. Dennis Huanca Cáreces

3era. Edición, agosto de 2023
Hecho en Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2013-10228
ISBN: 978-9972-764-18-9

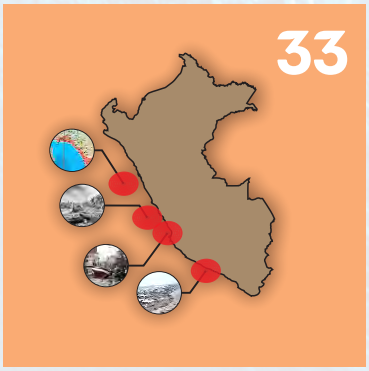
Diseño y diagramación
Paul Quispe Solano

CONTENIDO

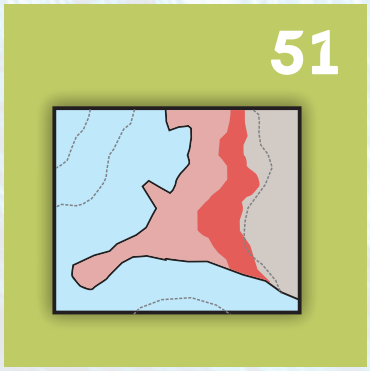
Conceptos básicos sobre Sismología

Conceptos básicos sobre Tsunamis

Sistema de Alerta de Tsunamis



Tsunamis importantes que han afectado al Perú



Cartas de Inundación por Tsunami

Anexos

Referencias bibliográficas

PREFACIO

PREFACIO

Esta publicación, ha sido elaborada por el Centro Nacional de Alerta de Tsunamis de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, la cual constituye un esfuerzo importante orientado a divulgar a la población en general un tipo de fenómeno natural llamado tsunami, palabra de origen japonés que en español conocemos como maremoto. Estos eventos han afectado el litoral peruano en múltiples ocasiones a lo largo de su historia, causando graves daños y pérdidas de vidas humanas.

El objetivo es dar a conocer a la comunidad, con un lenguaje simple y didáctico, las causas que originan los tsunamis, su propagación en el mar y los efectos que este puede producir en su arribo a la costa, y lo que es más importante, cómo se debe actuar ante una emergencia de alerta de tsunami, para reducir el riesgo de pérdidas de vidas humanas.

Este material consta de una parte introductoria, seguida del capítulo I que aborda conceptos básicos sobre sismología. El capítulo II nos ayudará a comprender las nociones básicas sobre tsunamis y sus principales características. El capítulo III contiene información acerca del Sistema Nacional e Internacional de Alerta de Tsunamis. Luego, en el capítulo IV se describen con detalle los tsunamis que han afectado en los últimos años al Perú: Camaná (23 de junio de 2001), Pisco (15 de agosto de 2007), Chile (27 de febrero 2010), Japón (11 de marzo de 2011) entre otros eventos. Finalmente, el capítulo V contiene información sobre las Cartas de Inundación por Tsunamis, una herramienta fundamental para la población costera en tema de tsunamis.

La experiencia y conocimiento acumulado por parte de países que sufren frecuentemente los efectos de tsunamis ha permitido salvar muchas vidas gracias a las recomendaciones y buenas prácticas, las cuales serán efectivas si son divulgadas por las autoridades responsables, en especial en centros educativos y población costera a través de todos los medios (radio, televisión, medios impresos (como esta publicación), medios digitales e internet).

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

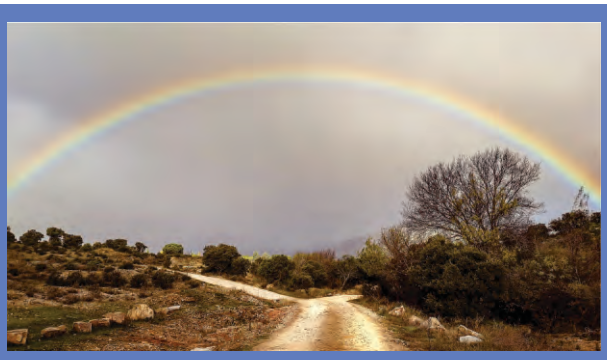
Existen muchos fenómenos naturales que producen efectos beneficiosos para el hombre como son, las lluvias para la agricultura, o el afloramiento de aguas frías en zonas costeras que proporciona las condiciones adecuadas para una abundante pesca; pero existen otros fenómenos cuyos efectos pueden ser perjudiciales, como los terremotos y tsunamis siempre que exista población cercana o expuesta.

El impacto de los fenómenos naturales en la población de todo el mundo se ha vuelto cada vez más importante debido al notable crecimiento de la población mundial, que bordea los 7,900 millones de habitantes.

La gran mayoría de ciudades del mundo se han concentrado en zonas costeras (alrededor de las dos terceras partes de la población), debido principalmente a la importancia de la pesca y el comercio marítimo, aumentando el riesgo de daños a estas poblaciones ante la ocurrencia de un tsunami.

La región Lima es un caso representativo en este sentido, y lo es en especial la región Callao, cuya población era solo de 5,000 habitantes cuando ocurrió el maremoto histórico destructivo del 28 de octubre de 1746. Sin embargo, a la fecha el Callao cuenta con más de 950,000 habitantes y una gran infraestructura industrial y portuaria, por lo que un maremoto como el de aquella época produciría más pérdidas materiales y humanas.

Por esta razón, es necesario educar a la población que habita en zonas costeras como el Callao y otras ciudades y pueblos litorales del Perú, para que comprendan lo que podría pasar en caso de ocurrencia de un tsunami y, más importante aún, cómo deben actuar ante una emergencia de alerta de tsunami para reducir el riesgo de pérdidas de vidas humanas.



Entendemos como fenómeno natural a la manifestación u ocurrencia en la naturaleza (independientemente de la acción humana) que, al ser percibida, se puede estudiar e investigar. Por ejemplo, la formación de gotas de lluvia, la ocurrencia de un arcoíris, un terremoto y los tsunamis (Maskrey, 1993).

El comportamiento disciplinado de la población ante una alerta de tsunami es un factor importante que podría contribuir decisivamente a reducir los daños que ocasionaría este fenómeno.

Esta publicación tiene como objetivo principal informar a la población sobre los tsunamis, las causas que lo originan, su mayor probabilidad de ocurrencia: los sismos, y sus posibles efectos destructivos en zonas costeras, dando recomendaciones para que actúen adecuadamente en casos de alerta o alarma por tsunami.

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SISMOLOGÍA

En este capítulo responderemos estas y otras preguntas relacionadas.

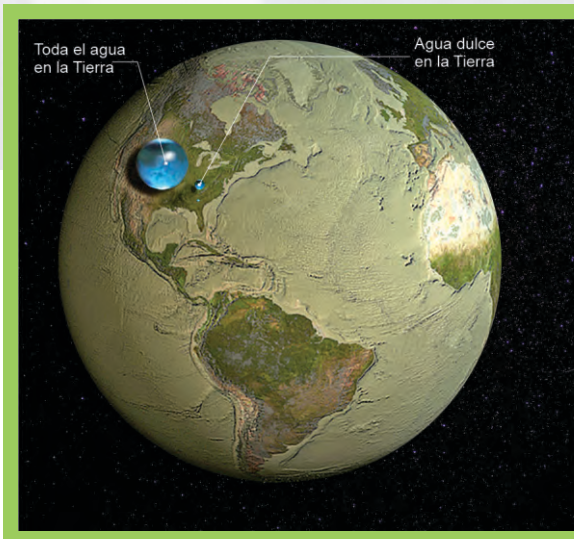
CAPÍTULO I
Conceptos básicos sobre Sismología

Para comprender mejor los **fenómenos naturales** a los que está expuesto el hombre es necesario conocer algunos conceptos generales sobre la forma, dimensión y estructura interna del planeta en que vivimos: la **Tierra**.

La Tierra no es un planeta similar a otros del Sistema Solar, debido que permite la existencia de formas de vida (animal y vegetal) y por consiguiente la del hombre. Esto se debe principalmente a que las temperaturas en la superficie terrestre permiten la existencia de agua en sus tres estados: gaseoso, sólido y líquido; sustancia esencial para la vida.

La Tierra tiene la forma de una esfera achatada en los polos (figura 1). Uno de los aspectos más notables de la superficie de la Tierra es la gran extensión de los océanos. Cerca del 71% de la superficie de nuestro planeta está cubierta por el agua de los océanos; y en el hemisferio Sur, donde se encuentra nuestro país, los océanos ocupan casi el 85% de la superficie de esta mitad del planeta.

El **Océano Pacífico** es el más extenso de la Tierra, cuyas corrientes marinas regulan gran parte del clima del planeta. En este océano, por su dimensión y debido a la configuración geológica de su fondo marino, **es donde se originan la gran mayoría de tsunamis**.



Cerca del 71 % de la superficie terrestre está cubierta por agua. Del total de agua en la superficie, el 97% está en los mares y océanos; siendo el otro 3% de agua la que forma los lagos, ríos, aguas subterráneas, nubes y casquetes polares (Fuente: USGS.gov)

Figura 1: La Tierra y sus dimensiones (fuente: nationsonline.org)

ONDAS SÍSMICAS

Las ondas sísmicas son perturbaciones generadas por una súbita liberación de energía causada por una ruptura sísmica, una erupción volcánica o una explosión; estas ondas se propagan a través de la Tierra y pueden causar destrucción en las zonas alrededor de donde se originaron. Una idea aproximada de ondas sísmicas es cuando una roca cae sobre la superficie de un estanque de agua, notamos que se propagan perturbaciones concéntricas en todas las direcciones; de manera análoga, pero a mayor escala, en la Tierra se propagan ondas sísmicas en todas las direcciones desde el origen o punto de ruptura (figura 3).

Las ondas viajan a través del interior de la Tierra, en su trayecto éstas se modifican al atravesar las diferentes capas de su estructura interna. De esta forma, las ondas sísmicas nos indican la naturaleza física de las zonas que atraviesan. Las ondas sísmicas pueden ser registradas por unos instrumentos llamados **sismógrafos**.

Cuando ocurren sismos superficiales (0 a 60 Km de profundidad) la generación de las ondas corresponde a la ruptura de las rocas en esa zona debido a los esfuerzos tectónicos. Una ruptura sísmica (fractura entre placas) genera fundamentalmente dos tipos de ondas sísmicas: ondas de **volumen** (Primarias y Secundarias) y ondas **superficiales** (Love y Rayleigh).

Ondas de Volumen

Llamadas también ondas internas o de cuerpo debido que viajan o se propagan a través del interior de la Tierra (figura 3).

a. Onda primaria (P)

La onda P es una onda longitudinal que se caracteriza porque el movimiento de las partículas en el medio tiene la **misma dirección** que la propagación de la onda. **La onda P se propaga en medio sólido y en medios líquidos.**

Las ondas P son las primeras que se observan en el registro sísmico completo de un movimiento sísmico, ya que son las que viajan más rápido (el nombre se deriva de la abreviación de primaria, es decir, la primera onda en llegar). Generalmente viajan a velocidades entre 1.5 y 14 km/s. La velocidad de una onda depende de las propiedades elásticas y de la densidad del material en que se propaga.

b. Onda secundaria (S)

Las ondas S o secundarias viajan más lento que las ondas P y se conocen también como ondas “de cizalla” o “de corte” debido a que no alteran el volumen del material que atraviesan, sino que lo cortan. Las ondas S son ondas transversales, ya que el movimiento de una partícula **es perpendicular** a la dirección en que viajan las ondas. La velocidad de una onda S depende del módulo de rigidez y de la densidad del material.

Una característica particular importante de las ondas S es su **incapacidad para propagarse a través de un fluido o un gas**, lo cual se debe a que los fluidos y los gases no pueden transmitir tensión de corte, de manera que sólo se propagan en medios sólidos.

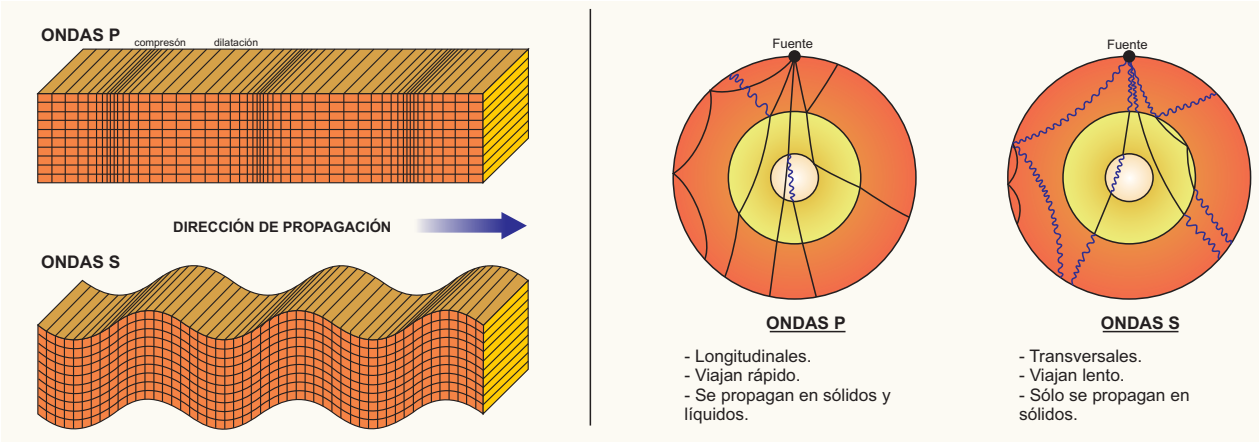


Figura 3: Desplazamientos que se producen desde una onda P (arriba) y una onda S (abajo). La propagación de la onda S es de corte puro sin cambio de volumen, mientras que las ondas P implican tanto un cambio de volumen como un corte (cambio de forma) en el material (modificado de Shearer P., 2009).

Ondas Superficiales

Se denominan así porque su movimiento y propagación está **restringidos a la superficie de la Tierra**, estas ondas se dividen en ondas Love (L) y Rayleigh (R). Se diferencian de las ondas de volumen en tres aspectos principales: viajan más lentamente, sus velocidades dependen en gran medida de la frecuencia de la onda y llegan a ser las ondas más destructivas.

a. Ondas Love (L)

Son ligeramente más veloces que las ondas Rayleigh, su amplitud disminuye con la profundidad. La profundidad de penetración de estas ondas depende de la frecuencia. El comportamiento de las partículas es semejante a las ondas S, pero solamente se mueven en el plano horizontal (figura 4).

b. Ondas Rayleigh (R)

Son ondas mucho más lentas. Cada partícula por donde pasa la onda se mueve en forma de elipse, la amplitud disminuye con la profundidad (figura 4). Al igual que las ondas Love, la profundidad de penetración depende de la frecuencia, cuanto menor la frecuencia, mayor la profundidad de penetración.

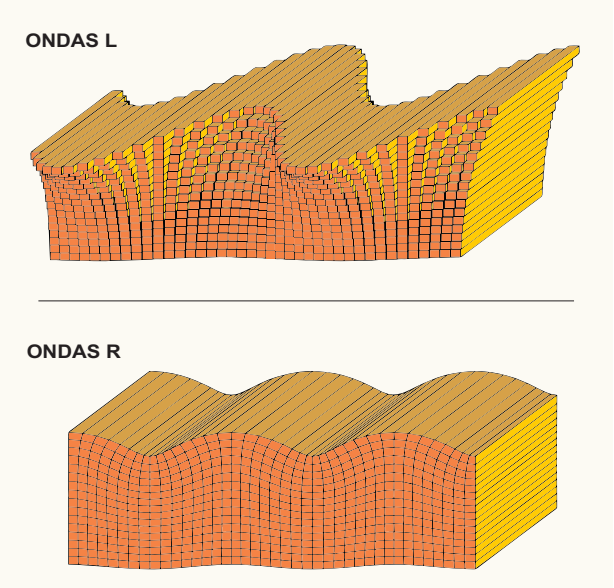
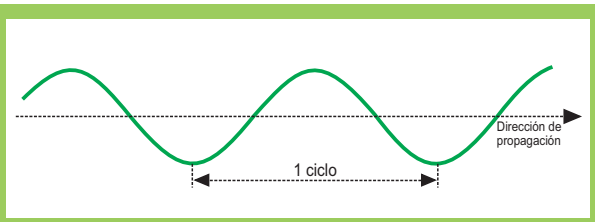


Figura 4: Desplazamientos que se producen por una onda Love a la izquierda y Rayleigh a la derecha (modificado de Shearer P., 2009).



Frecuencia de una onda es el número de ciclos (movimiento) que se repiten en una unidad de tiempo. Se mide en ciclos por segundo (ciclos/segundo) o hertz (Openstax.org).

Un sismo se trata de la manifestación de ondas de volumen y superficiales en movimientos complejos cuyos efectos pueden ser muy devastadores (figura 5). Las ondas P, aunque menos destructivas, son las primeras en ser detectadas por los sismógrafos.

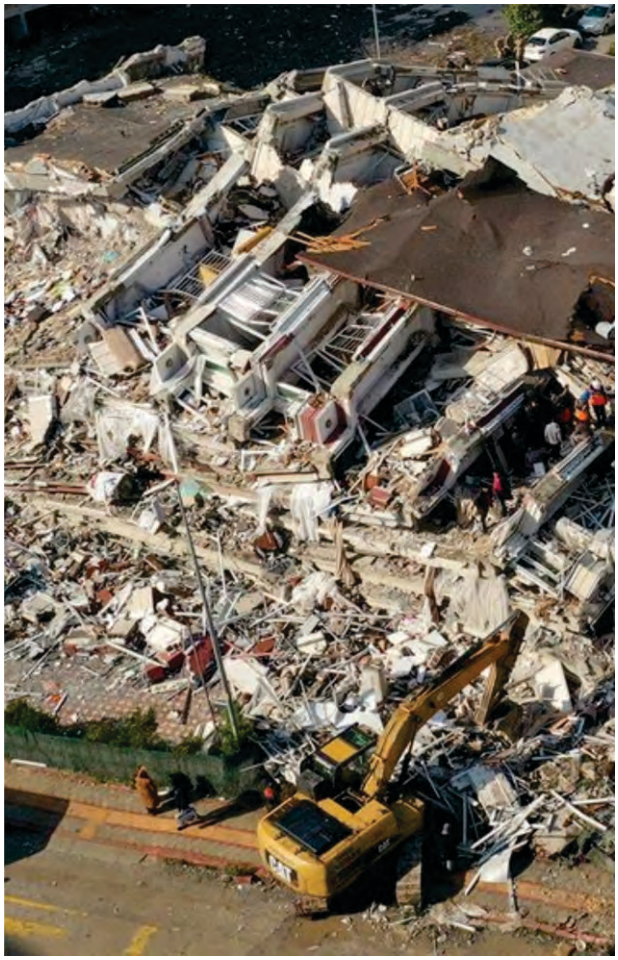


Figura 5: Daños causados en Hatay, tras el último sismo de Turquía en febrero de 2023 (semana.com)

ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA

Hasta antes de la aparición de la sismología moderna, el conocimiento sobre el interior de la Tierra se basaba en hipótesis; pero gracias al desarrollo de esta ciencia, hoy en día se conoce con mayor precisión la estructura interna del planeta. Combinada con la información geológica que proporcionan las rocas superficiales, los experimentos de laboratorio con rocas a alta presión y ciertas observaciones geofísicas, se posee una idea más exacta de las condiciones que prevalecen en el interior, su estructura en capas, los materiales que las componen, su estado termodinámico (presión y temperatura), entre otros.

Hoy en día se conoce la estructura interna de la Tierra gracias a mediciones hechas con instrumentos que detectan las **ondas sísmicas**. La Tierra, según su composición, está dividida en cuatro capas diferentes (Figura 6):

a. La Corteza (0 - 70 Km)

Es la capa rocosa más externa, es la base sobre la cual vivimos y desarrollamos nuestras actividades. Su espesor varía entre 7 y 70 kilómetros, aunque este espesor parece grande, en realidad es comparable a la piel en nuestro cuerpo.

b. El Manto (70 - 2890 Km)

Es la capa que se encuentra debajo de la corteza, está formada por una parte superior que contiene roca sólida llamada astenosfera. Se cree que en la astenosfera se genera el magma. El manto llega a tener un espesor promedio de 2,900 Km.

c. El Núcleo exterior (2890 - 6370 Km)

Esta capa está formada por hierro, se encuentra debajo del manto y tiene un espesor de 2,000 km, se comporta con características de fluido, es decir por él no se propagan las ondas S.

d. El Núcleo interno (5150 - 6370 Km)

El centro de la Tierra está formado por una esfera de material en estado sólido, siendo su espesor de 1,390 km, en esta capa la velocidad de las ondas sísmicas aumenta, propagándose dos tipos de ondas: P y S.

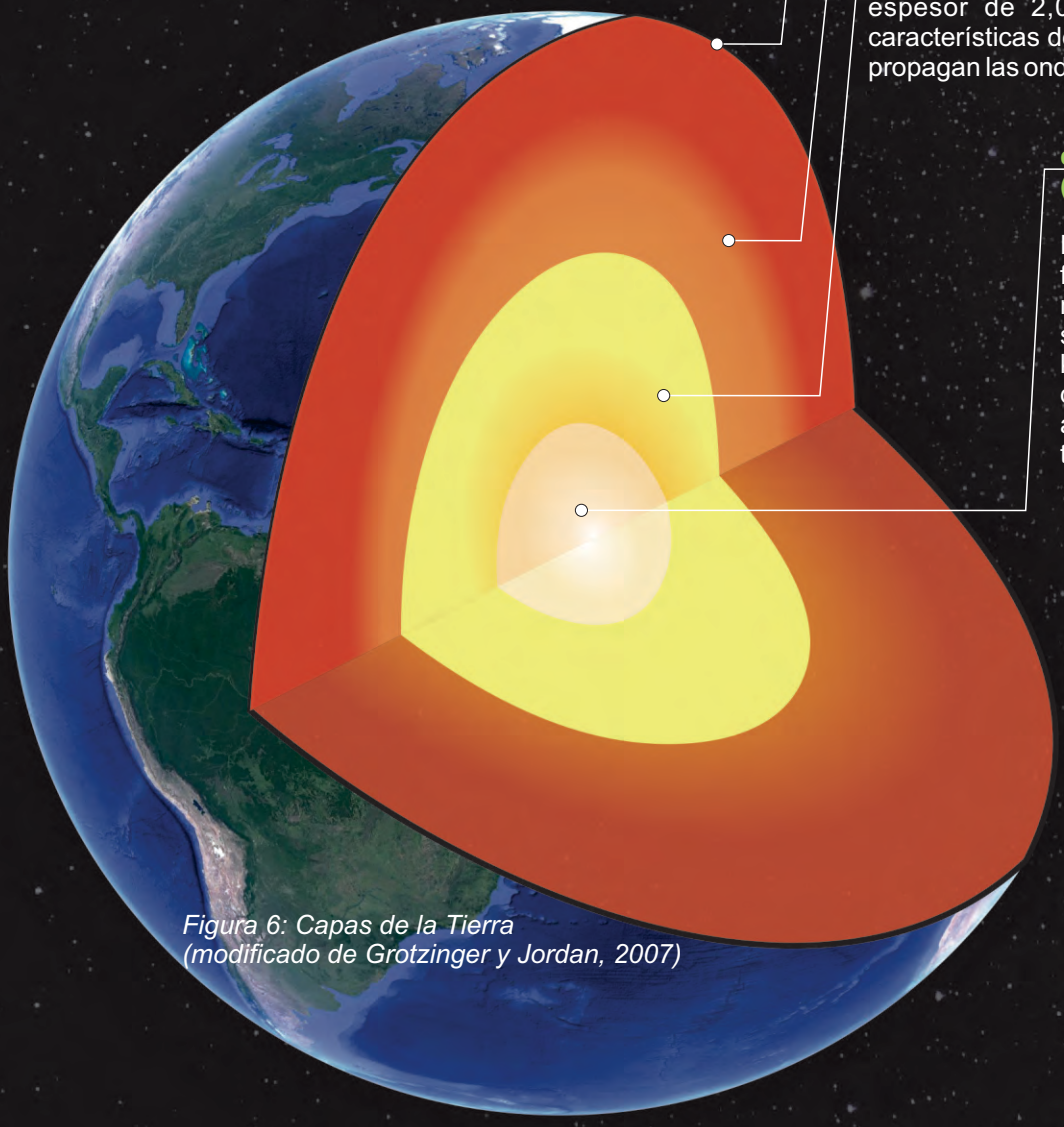


Figura 6: Capas de la Tierra (modificado de Grotzinger y Jordan, 2007)

Muchas veces hemos utilizado los términos lava y magma para referirnos a lo mismo. El magma es roca fundida que se forma a varios niveles de profundidad en el interior de la corteza de la Tierra y el manto superior. Cuando el magma sale a superficie y se desgasifica, da lugar a la lava.

PLACAS TECTÓNICAS Y SISMICIDAD

Las dos capas más externas del Planeta Tierra, la litosfera y la astenosfera, están directamente involucradas en la tectónica de placas, por lo que son las únicas partes de la Tierra que se describen en detalle aquí. El término tectónica de placas toma su nombre de las rígidas placas litosféricas que forman la capa más externa alrededor de toda la Tierra.

La corteza terrestre está dividida en placas tectónicas (Figura 7), bloques rocosos los cuales no son estáticos, sino que **se mueven entre sí**. Estas placas tectónicas chocan generando la acumulación de esfuerzos y produciendo grandes fracturas con desplazamientos llamadas fallas. De acuerdo al desplazamiento vertical de los bloques a ambos lados de la falla, se pueden presentar: fallas normales y fallas inversas; además cuando los bloques se mueven de manera horizontal se llaman fallas transcurrentes o de desgarre (Figura 8).

Estos movimientos de placas **son muy lentos** (en el caso del Perú, la velocidad de convergencia es de 7 a 8 cm/año) y producen la acumulación de esfuerzos tectónicos y una gran cantidad de energía potencial elástica en un lapso de tiempo muy grande. Cuando los esfuerzos tectónicos acumulados son tan grandes que sobrepasan el límite de ruptura de las rocas, **se producen los movimientos sísmicos**.

Figura 7. Principales placas tectónicas de la Tierra (Fuente: JohoMaps.net).

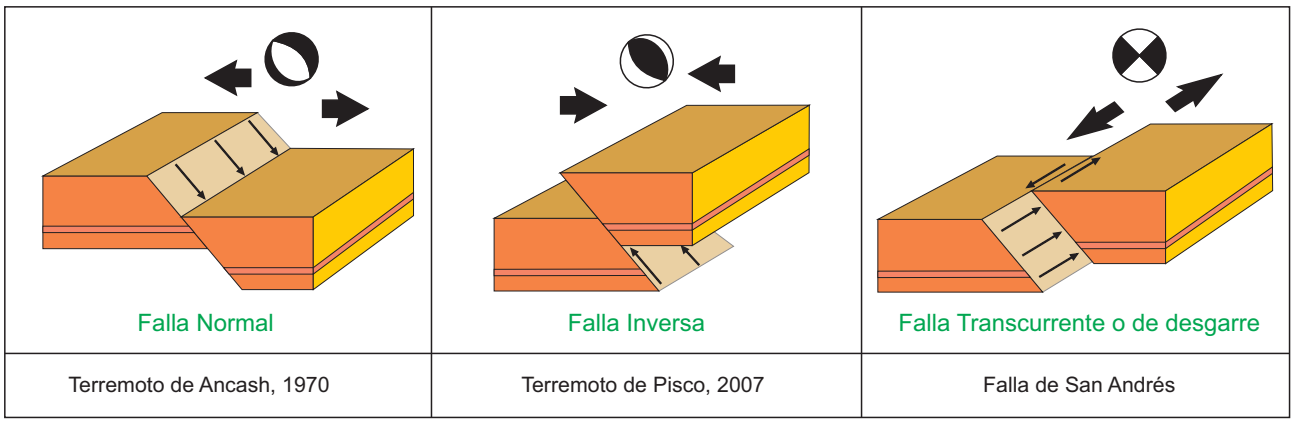


Figura 8. Tipos de falla según el desplazamiento de bloques: normal, inversa y horizontal o de rumbo (modificado de Fossen, 2010). Se mencionan ejemplos en cada tipo de falla.

El **Perú es un lugar altamente sísmico** por encontrarse en una zona de subducción (convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana). Por ello, una gran cantidad de los epicentros de los sismos superficiales ocurren en el mar, lo cual aumenta la posibilidad de ocurrencia de un tsunami. La Figura 9 muestra un mapa de la sismicidad del Perú, se observa que la mayoría de los sismos superficiales se ubican entre la fosa marina y la costa peruana. En la Figura 10 se observa el proceso de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana.

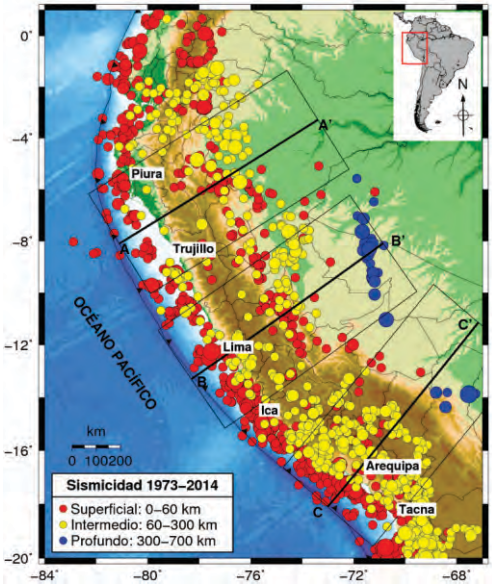


Figura 9: Mapa de sismicidad del Perú (Mw≥5.0). Los datos sísmicos provienen del USGS (Modificado de Jiménez, 2015).

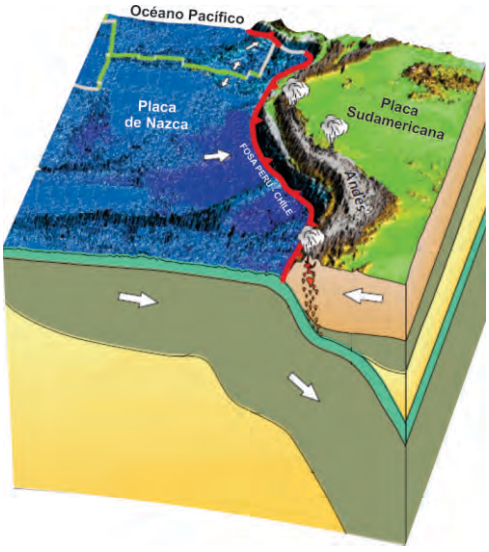


Figura 10: Proceso de subducción comprendida entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana (Modificado de Frish, Meschede y Blakey, 2011)

INTENSIDAD Y MAGNITUD DE UN TERREMOTO

La intensidad de un sismo es la medida de la severidad o violencia del movimiento de la Tierra en un lugar determinado, en relación a los efectos que ésta produce en el hombre y en las edificaciones (es decir, cómo es percibido por el hombre) y se mide en la escala modificada de Mercalli, que va del I al XII. La intensidad es un parámetro cualitativo que depende del tipo de suelo, tipo de edificación, entre otros.

Escala de Mercalli Modificada

Esta escala fue desarrollada en 1931 por los sismólogos estadounidenses Harry Wood y Frank Neumann, se compone de 12 niveles en orden creciente de intensidad. **No tienen una base matemática**, se trata de una **clasificación basada en efectos observados** (figura 11).

I.	Imperceptible.
II.	Apenas perceptible.
III.	Débil, observado parcial.
IV.	Observado por muchos.
V.	Las personas despiertan.
VI.	Las personas se asustan.
VII.	Daños en los edificios.
VIII.	Daños considerables en edificios.
IX.	Hundimientos parciales y grietas en el suelo.
X.	Destrucción de edificios.
XI.	Quedan en pie pocos edificios.
XII.	Destrucción total.

Figura 11: Tabla de intensidad de Mercalli Modificada (fuente: USGS.gov)

Un terremoto superficial, en cierto tipo de terreno, puede producir intensidades muy altas y, en cambio, corresponder a una magnitud o energía liberada relativamente pequeña.

La magnitud sísmica, por su propia definición, es una medida directa que da una idea de la cantidad de energía liberada por un terremoto. La magnitud de un sismo es un parámetro relacionado a la energía liberada por éste, medida por un sismógrafo. Es un parámetro objetivo y cuantitativo que no depende de variables macroscópicas. Para fines de esta publicación se describen dos tipos de escalas de magnitud:

a) Escala de Magnitud Local (ML)

Ideada por Richter en 1935, se fundamenta en que la amplitud de las ondas sísmicas es una medida de la energía liberada en el foco. La magnitud local o escala de Richter es **sólo aplicable para sismos locales y regionales** (d < 600 km) menores a 7.0, debido a la saturación de la escala.

b) Escala de Magnitud de Momento (Mw)

Está relacionado con el momento sísmico (Mo) de un terremoto. Este parámetro **describe mejor la idea del tamaño de un sismo**. Los terremotos de gran tamaño o tsunamigénicos, mayores a 7.0 Mw son mejor cuantificados por esta escala, debido a que no se satura.

Estadísticamente, cada año la Tierra es sacudida por un terremoto catastrófico de magnitud mayor a 8.0 Mw. Un sismo de esta magnitud libera una energía equivalente a 1,161 bombas atómicas de Hiroshima.

El hipocentro o foco sísmico es el lugar donde se originan las ondas que ocasionan un terremoto, normalmente se ubica a cierta profundidad de la superficie terrestre. El epicentro es el punto en la superficie directamente sobre el hipocentro (figura 12).

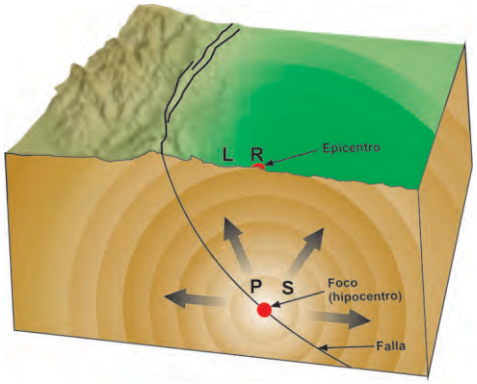


Figura 12. Ubicación del hipocentro y epicentro (modificado de Tarbuck y Lutgens, 2007). Las ondas P y S se generan en el foco mientras que las ondas L y R se generan en el epicentro.

LOCALIZACIÓN DEL EPICENTRO DE UN TERREMOTO

Al viajar las ondas P y S a diferentes velocidades, proporcionan información para determinar los parámetros hipocentrales de un sismo que son: **el epicentro, la profundidad y el tiempo origen**. A partir de la diferencia del tiempo de arribo entre las ondas S y P para tres o más estaciones sísmicas, podemos trazar una circunferencia alrededor de cada estación, la intersección de estas circunferencias indicará la posición del epicentro del sismo (figura 13). Esto constituye el método gráfico; sin embargo, actualmente se usa otro tipo de algoritmo computacional para el cálculo del epicentro, como el método de inversión.

La profundidad del terremoto es muy importante, ya que los sismos intermedios (60 km < H < 300 km) y profundos (H > 300 km) tienen menos probabilidades de generar tsunamis.

El tiempo de propagación es relativo: se trata de la cantidad de minutos y segundos que tarda la onda en completar su viaje. La hora de llegada (o de arribo) es el tiempo en que se registra en los instrumentos; se trata de un tiempo absoluto que suele expresarse en la hora internacional UTC (Universal Time Coordinated / Tiempo Universal Coordinado).

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), administra la red de estaciones sísmicas distribuidas en todo el Perú. Al ocurrir un evento sísmico, las señales son transmitidas vía ondas de radio o vía satelital, las cuales ingresan a una computadora y son procesadas digitalmente para la determinación del tipo de onda (P o S), epicentro, magnitud y profundidad del sismo. Mientras más rápido y preciso se proporcionan estas características de los sismos, menor será el tiempo para la evaluación sobre la ocurrencia o no de un tsunami y su consiguiente emisión de boletín de alerta o alarma.

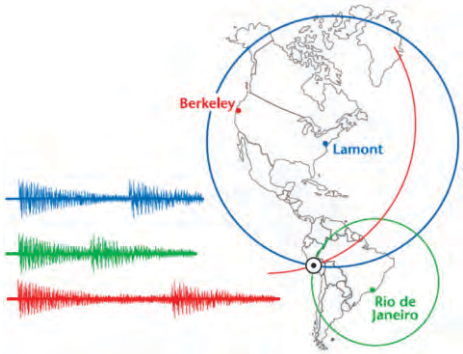


Figura 13: Localización del epicentro de un terremoto (Fuente: Guía de Referencia para Centros de Alerta de Tsunamis, 2007).

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TSUNAMIS

La presente sección aborda conceptos esenciales en el conocimiento de tsunamis.

CAPÍTULO II
Conceptos básicos sobre Tsunamis

Tsunami es una palabra de origen japonés, es usada internacionalmente y denomina al fenómeno que se traduce como “olas en el puerto”. Este fenómeno natural presenta la característica de no causar daños en alta mar, pero puede ser destructivo en las costas (figura 14).

En realidad, no se trata de una ola sino de **una serie de olas** que se producen al ser empujadas con violencia por una perturbación de la superficie oceánica con desplazamiento vertical, provocando el **movimiento de una gran masa de agua** que se propaga en todas las direcciones.

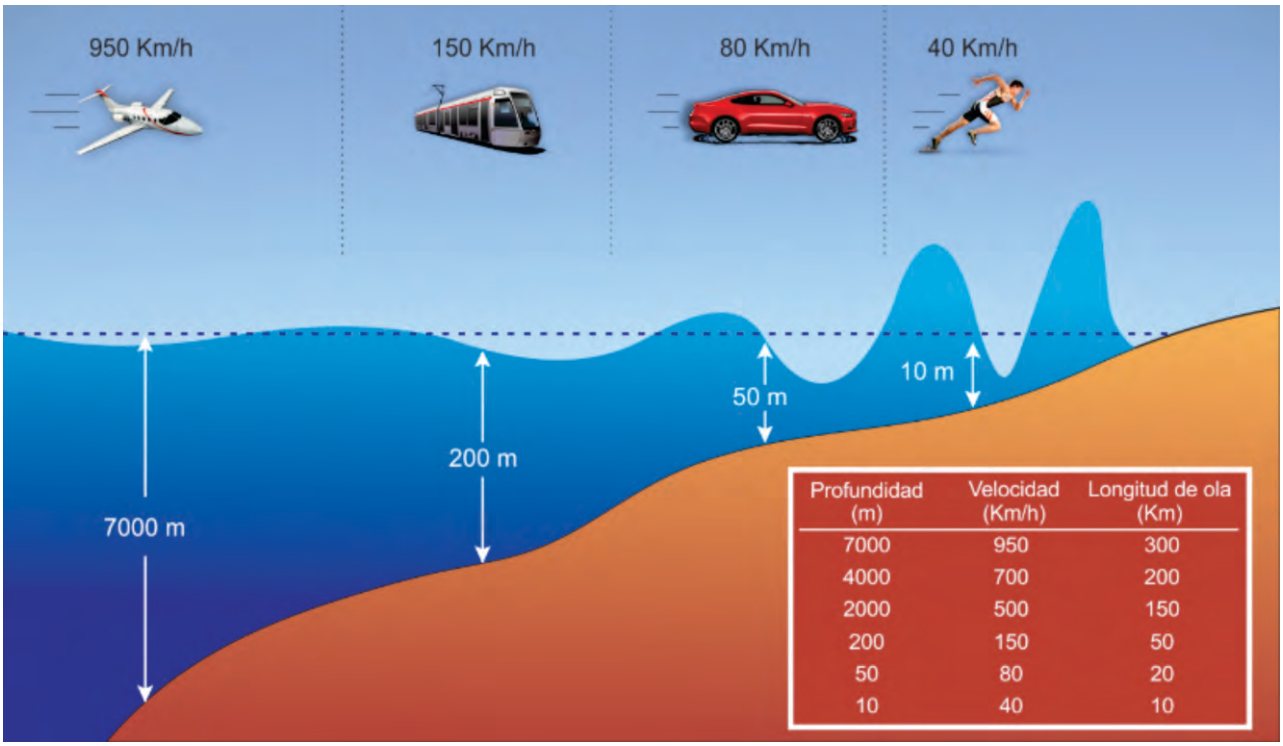
Desde un punto de vista físico, un tsunami o maremoto es un tren de ondas gravitacionales generadas por una perturbación en la superficie oceánica debido, por lo general, a un sismo (en un 88% de casos según PTWC, 2015).

Al acercarse a la costa en forma de ondas, parte de la **energía cinética** que posee durante la propagación se transforma en **energía potencial**, originando grandes olas cuando llega a la costa, puesto que la velocidad de las ondas es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad del fondo marino o batimetría, según la ecuación:

$$v = \sqrt{gh}$$

Donde g representa la aceleración de la gravedad (9.8 m/s) y h es la profundidad del mar.

La energía asociada al movimiento se conoce como energía cinética mientras que la asociada a la posición dentro de un campo de fuerza se conoce como potencial. Un tsunami en altamar tiene gran velocidad (movimiento) pero poca elevación, al aproximarse a costa se incrementa la altura de ola (aumenta la energía potencial) y disminuye su velocidad.



Profundidad (m)	Velocidad (Km/h)	Longitud de ola (Km)
7000	950	300
4000	700	200
2000	500	150
200	150	50
50	80	20
10	40	10

Figura 14: Características de un tsunami en altamar y cerca de la costa (fuente: Guía para Centros de Alerta de Tsunamis, 2007)

CAUSAS DE GENERACIÓN DE TSUNAMIS

a) Sismos con epicentro en el mar: Son la principal causa de generación de los tsunamis (88% de tsunamis registrados están relacionados con actividad sísmica). Para que un terremoto origine un tsunami el fondo marino debe ser movido abruptamente en sentido vertical. No todos los terremotos generan tsunamis, sólo aquellos de magnitud considerable, que ocurren bajo el lecho marino y que son capaces de deformarlo (figura 15).

b) Eventos volcánicos en el mar: Una explosión de isla volcánica, una erupción volcánica submarina y flujos piroclásticos en el agua (8% de eventos tsunamigénicos registrados históricamente son por actividad volcánica); estos fenómenos pueden ocasionar un tsunami (figura 16).

c) Deslizamientos submarinos: Grandes cantidades de sedimentos que caen por la pendiente hacia zonas más profundas (3% de eventos de tsunami son a causa de deslizamientos). Se genera una violenta alteración del fondo oceánico produciendo así un tsunami (figura 17).

d) Caída de un asteroide o meteorito al océano. Se trata de una causa muy poco probable, sin embargo se han encontrado cráteres y restos de meteoritos debajo del mar alrededor del mundo, los cuales por su dimensión pudieron haber ocasionado tsunamis (figura 18).

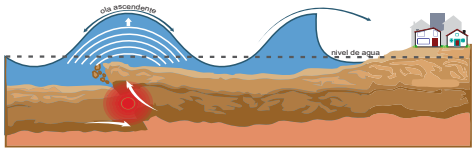


Figura 15: Sismo con epicentro en el mar

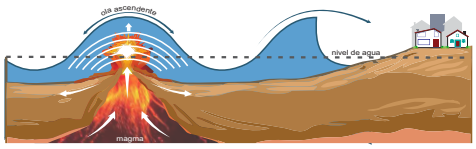


Figura 16: Explosión volcánica submarina

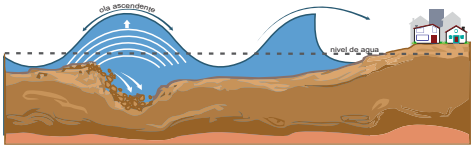


Figura 17: Deslizamiento submarino

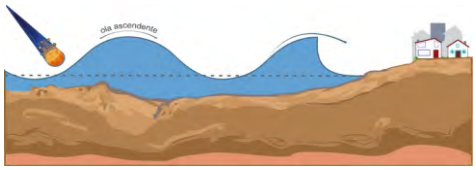


Figura 18: Caída de asteroide o meteorito

Figuras 15, 16,17 y 18 fueron modificadas de instagram.com/geologiapop)

2018: año de tsunamis no sísmicos

Tsunami en Palu

El 28 de setiembre se produjo un sismo de magnitud 7.5 Mw y profundidad de 10 Km con epicentro en la isla Silawesi. La Agencia de Meteorología, Climatología y Geofísica de Indonesia inicialmente emitió una alerta de tsunami, pero luego la revocó, sin embargo se produjo un tsunami que trajo como consecuencia 2075 fallecidos y muchos daños materiales. La población más afectada fue Palu, ubicada en el extremo de la Bahía del mismo nombre.

¿Cómo pudo generarse un tsunami de gran magnitud? El evento tuvo un componente vertical y debido a la gran zona de ruptura (unos 112 km) pudo haberse generado el tsunami, además el movimiento sísmico originó un deslizamiento submarino. Es posible que estos factores en conjunto hayan potenciado la generación de ondas tsunamigénicas.

Tsunami en Java

El Anak Krakatoa ("hijo de Krakatoa") se formó sobre el mismo lugar que el antiguo volcán Krakatoa (famoso volcán que erupcionó en 1883) como un estrato volcán, ósea una estructura formada por capas de ceniza volcánica acumulada, entre Sumatra y Java.

La actividad volcánica en el Anak Krakatoa inició en el mes de junio de 2018 y cada vez se hizo más intensa; el 22 de diciembre se produjo una erupción violenta con expulsión de lava y fragmentos hacia el exterior. La ubicación del volcán, en una isla, hizo que el material volcánico se deslice hacia el mar, provocando un tsunami que afectó a las poblaciones ubicadas en las islas aledañas. Las olas que llegaron a las costas de Sumatra y Java fueron de 3 metros de altura, y dejaron un saldo de unas 400 personas fallecidas y más de 16 000 afectadas.

TSUNAMIS GENERADOS POR SISMOS

Las condiciones para que un sismo pueda generar un tsunami son:
- Terremoto de gran **magnitud** (mayor a 7.0 Mw).
- **Epicentro** del sismo en el mar o cerca de la línea de costa (hasta 60 km tierra adentro).
- **Profundidad** focal superficial, menor a 60 km (como valor referencial).

Los tsunamis generados por sismos se clasifican de acuerdo a la **distancia epicentral**, en:

a) Tsunami local o de origen cercano.- Cuyos efectos destructivos se originan en menos de 1 hora de viaje, normalmente unos 200 km desde su origen. Históricamente, el 90% de víctimas por tsunamis han sido causadas por tsunamis locales.

b) Tsunami regional.- Tsunami que causa destrucción en una región en particular; generalmente entre 1 – 3 horas de viaje, o 1000 km desde su origen. Estos tsunamis pueden también causar efectos menores fuera de la región.

c) Tsunami lejano, distante o teletsunami.- Originados en una fuente lejana (superior a los 1000 km), a más de 3 horas de viaje. Son menos frecuentes que los tsunamis regionales; se inician como un tsunami local causando gran destrucción en las zonas cercanas.

Ante un tsunami de origen cercano es muy importante mantenerse preparado y evacuar hacia zonas seguras en el menor tiempo posible, ya que el arribo de olas hacia las costas puede ser relativamente rápido.

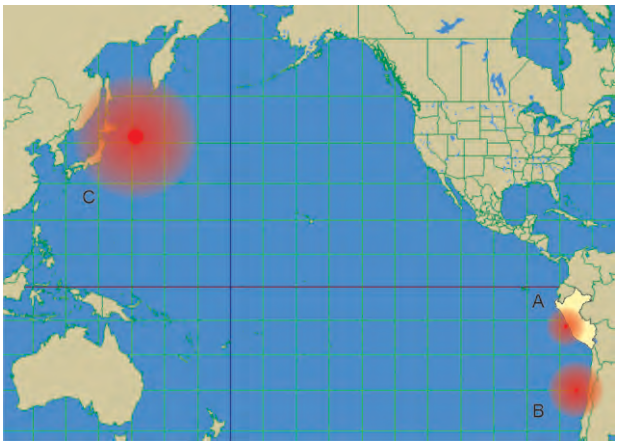


Figura 19: Representación de tsunami local (A), regional (B) y lejano (C) respecto a Perú.

PROCESOS DE UN TSUNAMI

La dinámica de un tsunami generado por sísmo, presenta tres procesos: generación, propagación y proceso de inundación (figura 20).

a) Proceso de Generación

Se inicia con la **deformación del fondo oceánico** debido al sismo, en el cual la componente vertical es mucho mayor que la componente horizontal. Si se considera al océano como un fluido incompresible, se producirá un **empuje hacia arriba** (efecto pistón), deformando grandes volúmenes sobre la superficie. Esto es la condición inicial del siguiente proceso.

b) Proceso de Propagación

La fuerza recuperadora de la gravedad contribuye a la **formación de ondas** que se propagan en todas las direcciones. La velocidad de estas ondas es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad del océano (batimetría) por la cual se propaga. Es decir, las ondas son muy rápidas en altamar, pero disminuyen su velocidad al acercarse a la costa. En el caso de eventos lejanos el tiempo de arribo del tsunami es aproximadamente similar al tiempo de vuelo de un avión desde el punto de generación hasta la zona costera (punto de observación).

c) Proceso de Inundación

Cuando **la onda llega a costa**, su velocidad se reduce, pero su altura se incrementa. La altura alcanzada por el tsunami al arribar a la costa se debe a la interacción de varios factores físicos y morfológicos.

Estos factores determinan que el arribo del tsunami a costa sea un proceso complejo, lo cual genera diferencias notables de altura máxima de inundación (run-up), aún a cortas distancias a lo largo de la

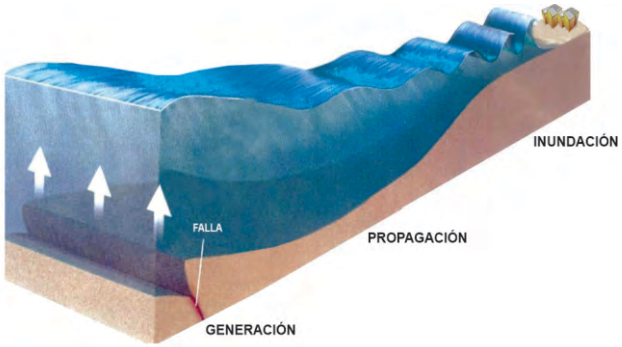


Figura 20: Fases de un tsunami: generación, propagación e inundación (fuente: Scientific American, 1999)

SISTEMA DE ALERTA DE TSUNAMIS

Ahora hablaremos sobre el Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis en el Perú.

CAPÍTULO III
Sistema de alerta de Tsunamis

SISTEMA INTERNACIONAL DE ALERTA DE TSUNAMIS DEL PACÍFICO (PTWS)

En abril de 1946 ocurrió en el archipiélago de las Islas Aleutianas situadas al Sudoeste de Alaska, uno de los tsunamis más destructivos a lo ancho del Océano Pacífico. Fue generado por un terremoto de magnitud 8.6 Mw produciendo una enorme ola de 35 m que destruyó el faro U.S. Guard´s Scotch Cap en la isla Unimak, ocasionando la muerte a los cinco residentes. El faro era una estructura de hormigón armado de acero de aproximadamente 30 m por encima del mar. Sin alguna advertencia o alerta, las destructivas olas del tsunami alcanzaron las islas hawaianas cinco horas más tarde, causando considerables daños y pérdidas de vidas humanas. Las olas destruyeron completamente los muelles de la ciudad de Hilo en las islas Hawai, causando la muerte de 159 personas. Un total de 165 personas perdieron sus vidas en este tsunami incluyendo niños que asistían a la escuela en Laupahoehoe Point de Hawai, donde las olas alcanzaron hasta 8 m destruyendo también un hospital.

En 1948 y como consecuencia de este tsunami, Estados Unidos estableció un **sistema de alerta de tsunami** para las islas Hawai, que demostró ser muy útil para preparar a la población en estos casos.

El gran sismo de Chile (9.5 Mw) que generó un tsunami en mayo de 1960 y el de Alaska en marzo de 1964 (9.2 Mw), centraron la atención en la necesidad de crear un centro internacional de alerta de tsunamis (figura 21). Con la experiencia del sistema de alerta de Hawai, los Estados Unidos aceptaron en 1965 extender éste y transformarlo en el Sistema Internacional de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWS).

Tsunami de Valdivida, 1960

El 22 de mayo en Valdivia (Chile) se sintió un terremoto de 9.5 Mw, 30 minutos después se retiró el mar y luego de 10 minutos arribaron olas de hasta 10 metros.

Las olas del tsunami llegaron a otros lugares como Japón, Nueva Zelanda y Hawai; dejando un total de 2300 víctimas. (fuente: sismo24.cl).

Figura 21: Estación de recepción y envío de lecturas de nivel del mar entre 1960 y 1970 en Honolulu, Hawai (fuente: ITIC, 2015)

Cuando ocurre un sismo de gran magnitud, este centro de operaciones se encarga de detectar los **parámetros de ocurrencia sísmica**, con esta información se analiza el peligro de generación de un tsunami e inmediatamente, este Centro de Alertas transmite un boletín a todos los países integrantes de la Cuenca del Pacífico informando la evaluación del evento.

Cada país recibe la información y evalúa el peligro del probable tsunami en sus costas de acuerdo al epicentro del sismo, su intensidad e información histórica que tenga sobre casos similares ocurridos en el pasado. Para estimar el tiempo de arribo de la primera ola del tsunami a las costas, el **Sistema Internacional de Alerta de Tsunamis**, ha desarrollado una serie de mapas y programas para estimación del tiempo de propagación donde, conocido el epicentro, se puede calcular el tiempo en horas que tardará en llegar la primera ola. Esto permite a las autoridades de cada país emitir boletines de alerta oportunamente según sus protocolos vigentes ante tsunamis. La figura 22 muestra un mapa de tiempos de arribo para un sismo ocurrido en Japón según el software TsuDig; en este escenario, el posible tsunami generado llegaría a las costas del Perú alrededor de 20 horas después de generado el sismo, lo cual permitiría **alertar oportunamente a la población**.

Es necesario tener en cuenta que **los tsunamis más peligrosos son los de origen local**, es decir generados por sismos frente a nuestras costas, en cuyo caso el tiempo de su arribo podría ser de 10 a 30 minutos. En estos casos la alerta es el terremoto mismo y la población debe alejarse lo más pronto posible del borde costero, de preferencia a zonas altas.

Los tsunamis más peligrosos son los de origen local, pues no se cuenta con muchos minutos para que la población se diriga hacia zonas más elevadas.

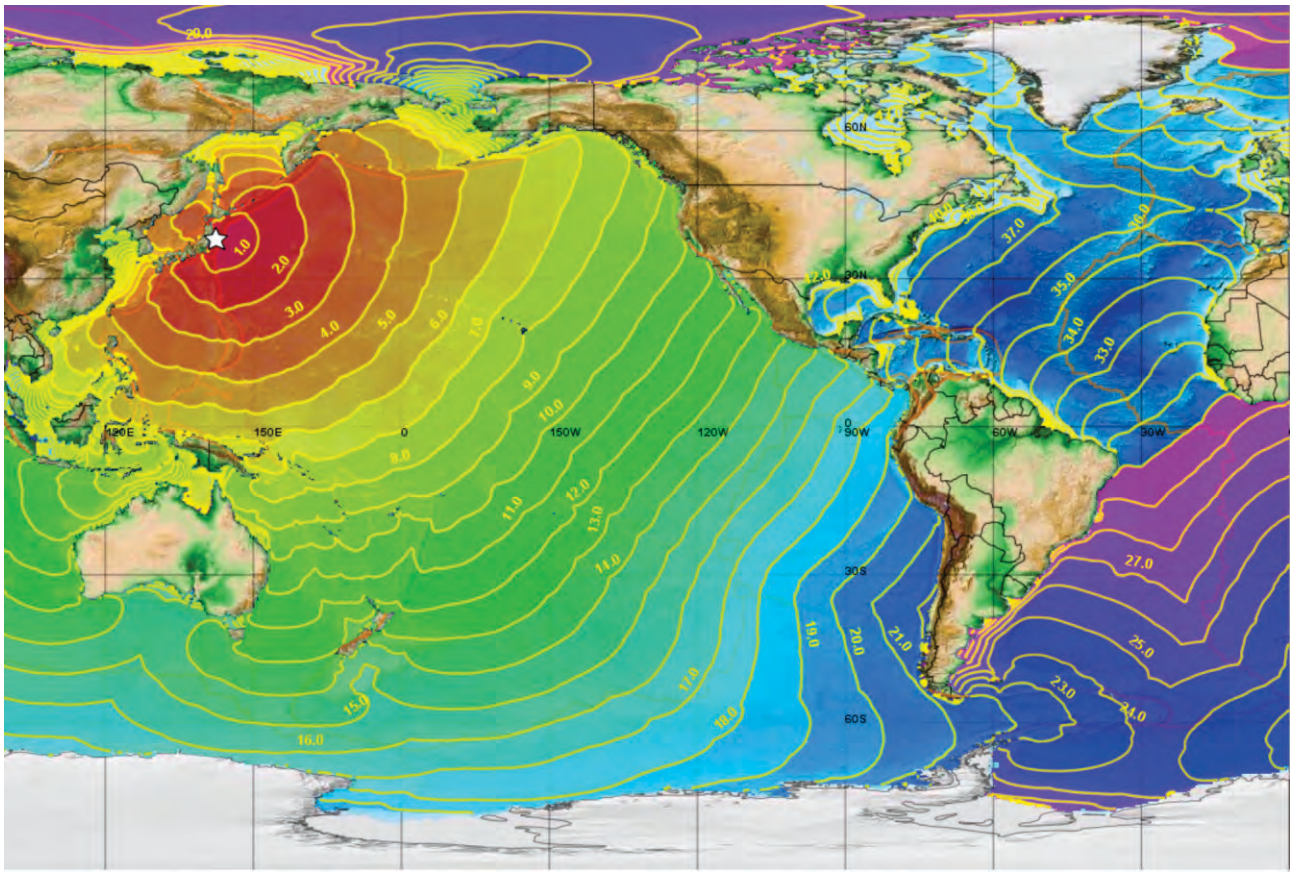


Figura 22: Mapa de tiempo de propagación de un tsunami generado en Japón (fuente: software TsuDig)

SISTEMA NACIONAL DE ALERTA DE TSUNAMIS (SNAT)

El Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis - SNAT está conformado por organismos públicos rectores (figura 23):

- **Instituto Geofísico del Perú (IGP).**
- **Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú – Centro Nacional de Alerta de Tsunamis (CNAT).**
- **Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI).**

Estas instituciones contribuyen y complementan la información necesaria para la toma de decisiones.

En el año 2011, mediante el Decreto Supremo N° 014-2011-RE, se designó a la Dirección de Hidrografía y Navegación como representante oficial del Perú ante el Sistema Internacional de Alerta contra Tsunami en el Pacífico.

Figura 23: Componentes del Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis - SNAT (fuente: DIHIDRONAV)

PROTOCOLO OPERATIVO DEL SISTEMA NACIONAL DE ALERTA DE TSUNAMI (PO SNAT)

Mediante un trabajo conjunto de la Marina de Guerra del Perú representada por la Dirección de Hidrografía y Navegación (DIHIDRONAV), el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) se establecieron las responsabilidades y funciones de cada institución en caso ocurra un evento que origine tsunami en nuestra costa.

El establecimiento del Protocolo Operativo del SNAT es un logro para el Perú, ya que es uno de los países en Sudamérica que ha podido articular esfuerzos para la elaboración de este importante documento, siendo sus objetivos específicos los siguientes (figura 24):

- Definir **niveles de responsabilidades** en la toma de decisiones dentro del proceso de Información, alerta y/o alarma de tsunami.

- Establecer la **guía y procesos** correspondientes a cada entidad a fin de informar, alertar y/o alarmar a la población en el caso de un eventual riesgo de tsunami.

- Establecer los **criterios de acción** de las instituciones que conforman el Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis (SNAT) frente a la ocurrencia de un sismo con características tsunamigénicas, considerando los componentes de información, análisis, difusión, ejecución, vigilancia y cancelación con el propósito de salvaguardar la vida de la población ubicada en la costa del litoral peruano.

- Establecer una **línea de tiempo de acción** y actividades principales a seguir por cada institución desde la generación del sismo hasta la difusión de información a la población a través de los Gobiernos Locales y Regionales por parte de INDECI.

Figura 24: Protocolo Operativo del Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis (fuente: DIHIDRONAV)

En la actualidad, DIHIDRONAV está inmersa en la responsabilidad de mantener un contacto permanente y directo con las instituciones que conforman este sistema, dando cumplimiento a los siguientes procedimientos:

Procedimiento operacional normalizado para un tsunami local

Para el caso de un sismo de origen cercano, DIHIDRONAV - CNAT recibe información del IGP a través de la Red Sísmica Nacional sobre los parámetros hipocentrales del sismo (epicentro, profundidad y magnitud). Luego de la recepción, análisis y evaluación de dicha información, el CNAT se encarga de emitir el boletín correspondiente al Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN - INDECI) y Capitanías de puerto para su difusión y activación de los planes de evacuación. Se contempla este proceso dentro de 24 minutos a partir de la ocurrencia del sismo, el tiempo de respuesta de cada institución es muy importante. Los boletines ante tsunami pueden ser:

a) Boletín de alarma: Una alarma es un estado que corresponde a la **confirmación inminente de la ocurrencia de tsunami** el cual puede causar grandes daños al arribar a una determinada zona costera, por lo cual las autoridades competentes (INDECI y gobiernos locales) deberán activar sus planes de evacuación de la población.

b) Boletín de alerta: Es un estado que se declara con el fin que los organismos operativos activen protocolos de acción para que la población tome precauciones específicas debido a la **"posible" ocurrencia de un tsunami** que afecta a una determinada zona.

c) Boletín de información: Según las características y del tipo de peligro, la evaluación puede indicar:

- Peligro detectado, **no reúne condiciones para generar un tsunami**. Indica que no hay amenaza de tsunami destructivo y se utiliza para impedir evacuaciones innecesarias en determinadas zonas costeras.
- Peligro detectado, **se intensifica la vigilancia**. Sin embargo, es posible elevar la categoría a alerta o alarma, de obtenerse información más actualizada.

d) Boletín de cancelación de alerta o alarma: Información que proporciona DIHIDRONAV cuando se presenta una **gradual disminución del nivel del mar** a condiciones normales, respaldados por los registros de los sensores mareográficos instalados a lo largo de la costa, indicando que ya no existe riesgo de tsunami.

Procedimientos operacionales normalizados para un tsunami regional y de origen lejano

Ante la posible ocurrencia de un tsunami regional y de origen lejano para nuestras costas, se recibe información del Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWC) proveniente de Hawai (a través del sistema de comunicación aeronáutica del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez de CORPAC - AMHS) y se inicia la etapa de **vigilancia del fenómeno** estimando mediante modelos de aproximación las horas de arribo de olas y sus alturas, asimismo al recibir los parámetros sísmicos del USGS-NEIC se procede a analizar y se emite el boletín correspondiente (alerta o alarma) según los umbrales establecidos. En ambos casos, estas decisiones y acciones que se ejecutan se realizan de forma inmediata, minutos después de la ocurrencia del evento sísmico.

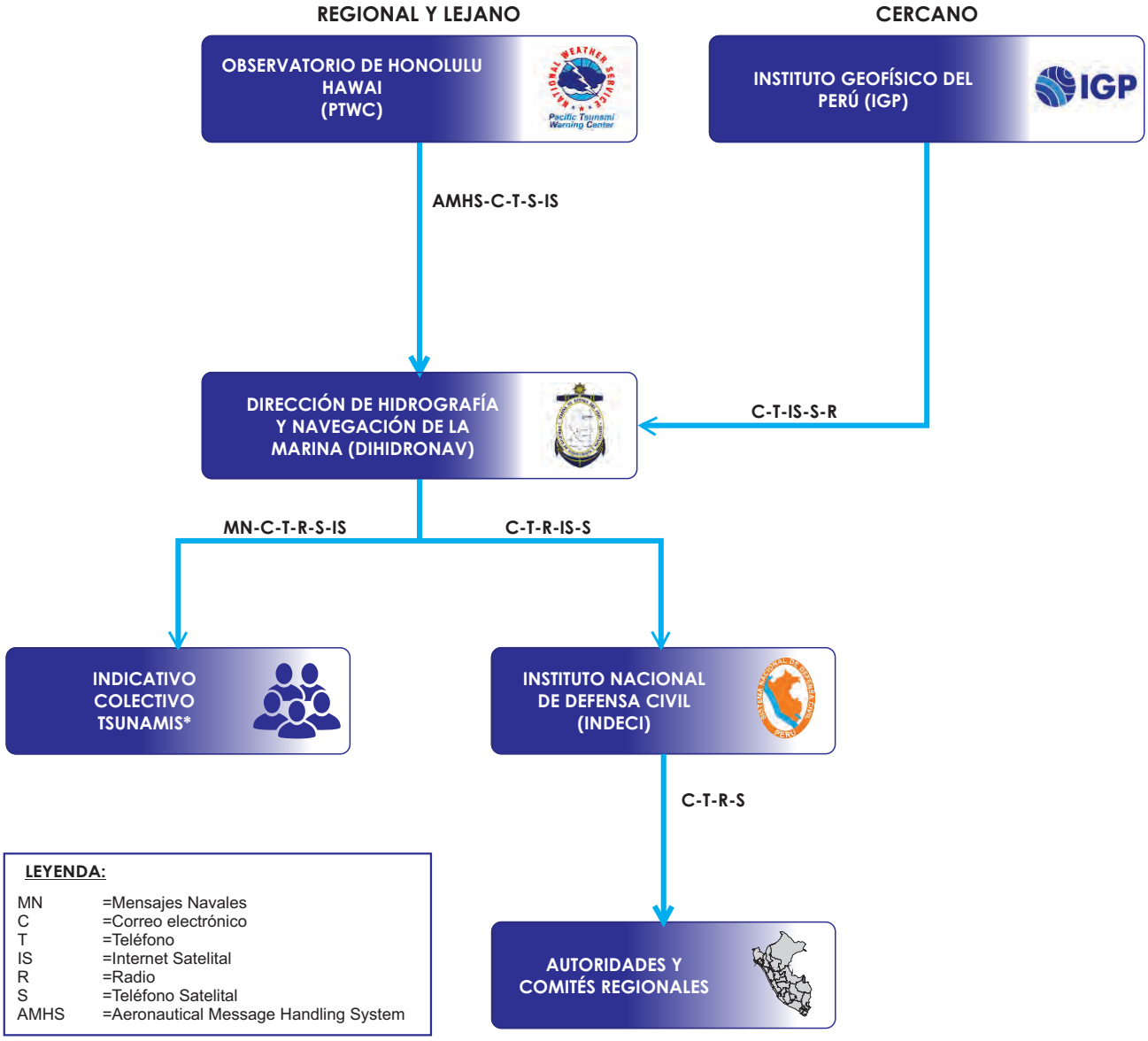
EL CENTRO NACIONAL DE ALERTA DE TSUNAMIS (CNAT)

El Centro Nacional de Alerta de Tsunamis (CNAT) es un departamento técnico de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DIHIDRONAV) de la Marina de Guerra del Perú, el cual emite **información oportuna sobre la generación de un posible tsunami** que podría afectar a nuestro litoral costero, permitiendo salvar o reducir la pérdida de vidas humanas, esta labor es realizada en base a la vigilancia que se realiza constantemente durante las 24 horas del día y los 365 días del año.

El CNAT se encuentra enlazado con una serie de instituciones nacionales e internacionales quienes comparten información sobre la posible amenaza de un tsunami, lo que permite colaborar con las autoridades locales y regionales para tomar adecuadas decisiones en caso de prevención y respuesta.

Formato para boletines de información, alerta, alarma y cancelación respectivamente (fuente: DIHIDRONAV).

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INFORMACIÓN RECIBIDA PARA EVENTOS DE TSUNAMIS:



* Unidades y dependencias de la Marina de Guerra del Perú expuestas a tsunami.

Figura 25: Diagrama del flujo de información del Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis - SNAT (fuente: DIHIDRONAV)

SISTEMAS DE VIGILANCIA DEL SNAT

1. Sistema de comunicaciones

a) Sistema AMHS

Sistema que recepciona, guarda, procesa y transmite mensajes de tráfico aeronáutico (como mensajes de alerta de tsunami provenientes de Hawai). Se reciben a través del sistema de comunicación de la Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial (CORPAC), vía Sistema de Manejo de Mensajes Aeronáuticos (AMHS).

b) Sistema de Comunicación Radial VHF

Sistema radial VHF Red 800 a nivel de capitanías de puerto y Red 810 a nivel de la Región de Lima y Callao, se opera mediante la transmisión de voz a corta distancia, en las frecuencias y canales radioeléctricos atribuidos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

c) Sistema de Comunicaciones Satelital

Sistema que cuenta con equipos de telefonía satelital (IRIDIUM). Es un servicio de telefonía móvil con cobertura total de la tierra (incluyendo océanos, vías aéreas y regiones polares); cuenta con internet satelital de IP dedicada Broadband Global Area Network (BGAN) el cual permite la comunicación entre los integrantes del SNAT (IGP, DIHIDRONAV e INDECI) y entre cada capitanía de puerto en todo el litoral costero; cuenta además con internet satelital *Very Small Aperture Terminal* (VSAT) como soporte en comunicaciones que requieran mayor ancho de banda.

2. Sistema de vigilancia sísmica

a) Sistema REDSSAT-IGP (Red Sísmica Satelital del IGP)

Sistema integrado compuesto por estaciones sísmicas de banda ancha, acelerógrafos y estaciones GPS, que realizan el registro, análisis y procesamiento automático para generar y emitir el reporte sísmico y así también emitir oportunamente el boletín de alerta o alarma por tsunami. En el 2016 se contaba con 7 estaciones sísmicas (figura 26); siendo actualmente 65 estaciones.

b) Sistema CISN (California Integrated Seismic Network)

Es un sistema de vigilancia sísmica a nivel mundial en tiempo casi real, que funciona a través de comunicación IP (vía Internet). Dicho sistema muestra gráficamente la distribución de la sismicidad a nivel mundial en los últimos 7 días, así como también información relevante sobre el último sismo ocurrido.

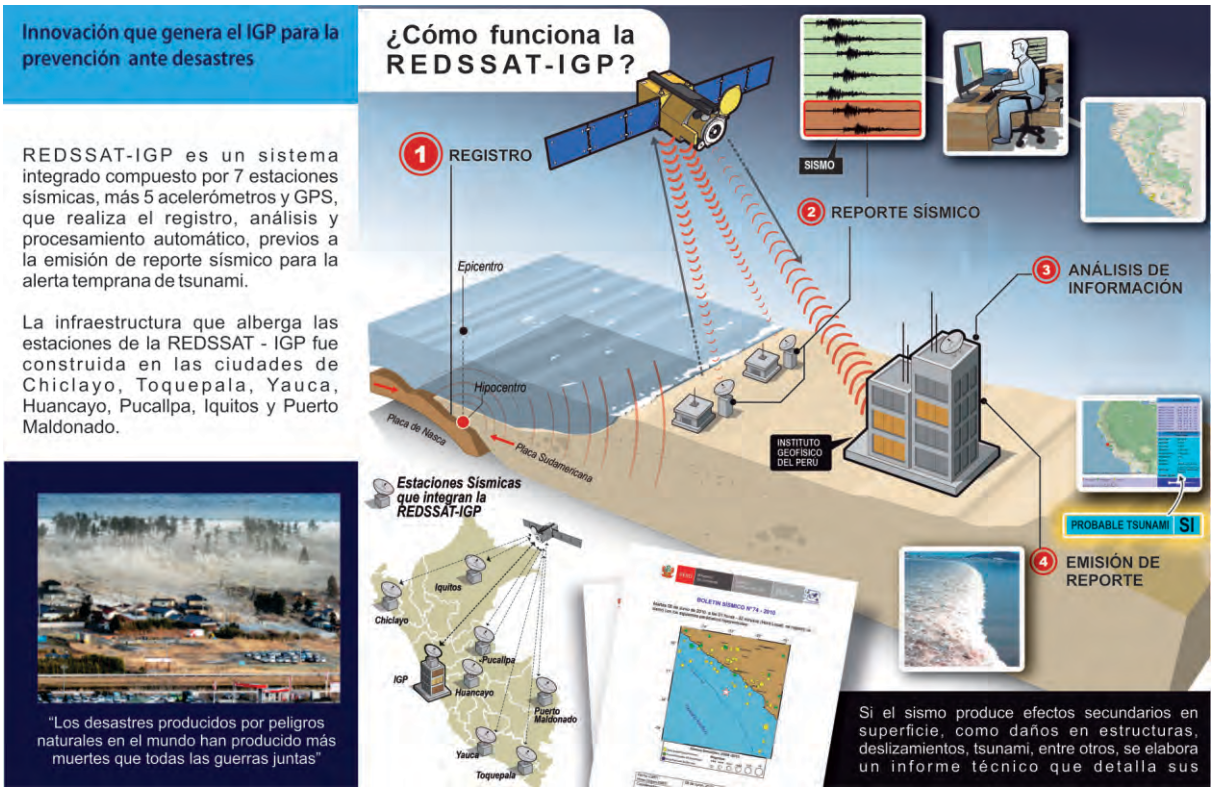


Figura 26: Funcionamiento del sistema RESSSAT-IGP (Modificado de Portal IGP)

3. Sistema de Vigilancia del Nivel del Mar

a) Red Mareográfica Nacional

La Marina de Guerra del Perú a través de la Dirección de Hidrografía y Navegación en su calidad de responsable del Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis y ente rector de la Oceanografía en el Perú, tiene como una de sus principales actividades, la medición y vigilancia de los niveles del mar y para ello mantiene y opera una red de estaciones mareográficas en el litoral. Esta red tiene gran importancia, específicamente en la detección y registro del nivel del mar, siendo uno de los métodos más utilizados en la vigilancia y confirmación de los eventos tsunamigénicos.

Actualmente se cuenta con 20 estaciones mareográficas ubicadas a lo largo de litoral peruano (figura 27). Cada una de las estaciones se compone por mareógrafos automáticos (tipo radar, flotador y presión), una regla mareométrica, una cámara de vigilancia y un sistema de puntos de referencia (BMs) o marcas para la nivelación geodésica periódica. También cuentan con otros sensores para la medición de parámetros como: temperatura de agua de mar y aire, oxígeno, salinidad, humedad relativa, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, precipitación, etc. Asimismo, cada estación cuenta con la atención constante de un observador océano-meteorológico, quien se encarga de la operatividad y buen funcionamiento de los equipos.

b) Sistema de cámaras de video vigilancia

Se cuenta con cámaras de vigilancia del nivel del mar en 12 puertos de la costa peruana, conectados y monitoreados en tiempo real en el Centro Nacional de Alerta de Tsunamis; este sistema es complementado con observadores hidrográficos desplegados en 14 capitanías a lo largo del litoral peruano.

c) Sistema de Boyas DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)

Las boyas DART son sistemas de registro y evaluación del nivel del mar que se utilizan para la vigilancia y detección de tsunamis, particularmente de origen lejano, detectando cambios pequeños o drásticos en la presión de agua mediante sensores ubicados en el fondo marino.

Actualmente existen 47 boyas DART instaladas como parte del Sistema de Alerta de Tsunamis del Océano Pacífico. El proyecto DART es un esfuerzo para mantener y mejorar la capacidad de detección temprana e informar en tiempo real de la existencia de tsunamis en mar abierto. Las boyas DART también ayudan a detectar y monitorear eventos tsunamigénicos por causas no sísmicas.

d) Sistema de estaciones de monitoreo del nivel del mar (SLSMF)

Sistema internacional que une información del nivel global del mar, con datos tomados en tiempo real de 170 proveedores estatales a nivel mundial. Este sistema permite monitorear eventos con potencial de generar tsunamis, principalmente regionales o lejanos, para en base a ello, emitir boletines de alerta, alarma o información, según corresponda. El Perú aporta a este sistema con 18 estaciones.

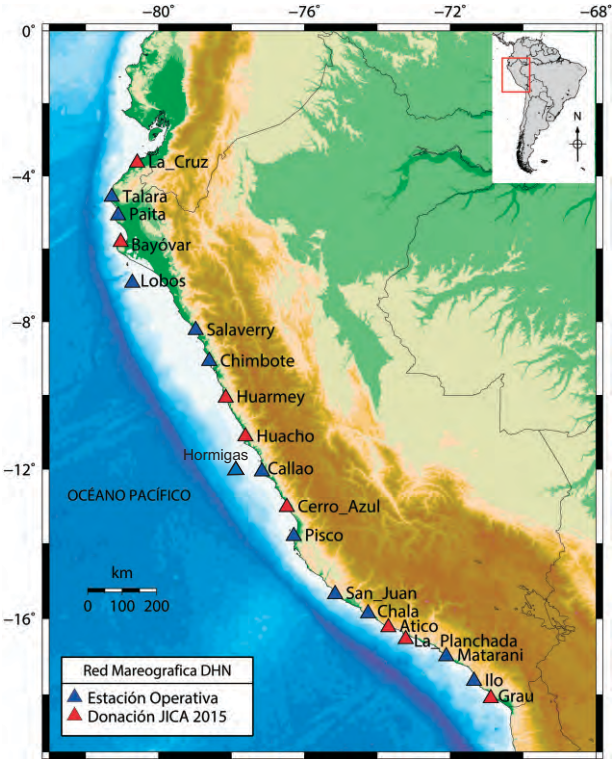


Figura 27: Red Mareográfica Nacional (fuente: DIHIDRONAV)

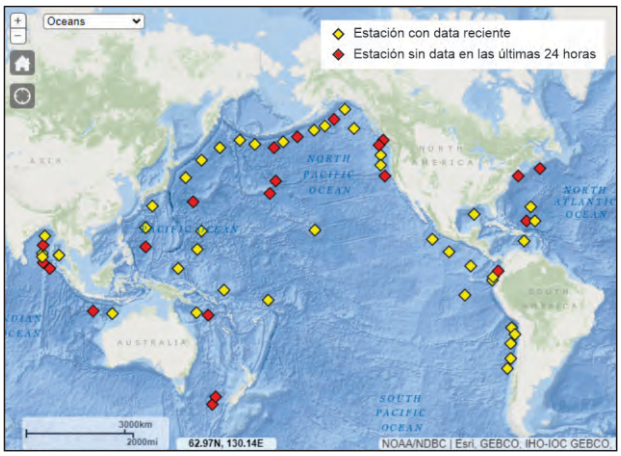


Figura 28: Red Global de Boyas DART (fuente: ndbc.noaa.gov)

Figura 29: Oficina actual del Centro Nacional de Alerta de Tsunamis (fuente: DIHIDRONAV)

CENTRO NACIONAL DE ALERTA DE TSUNAMIS
RECEPCIÓN Y EVALUACIÓN
CNAT

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE TSUNAMIS

La modelación numérica se ha transformado en el **principal método para caracterizar** el **proceso de generación, propagación e inundación** de tsunami en áreas costeras. En la actualidad, las técnicas de modelación son suficientemente exactas dependiendo del modelo de fuente sísmica y de cómo se realice el ingreso de datos topográficos y de batimetría en el área a modelar.

Uno de los propósitos, es obtener una **base de datos de eventos sísmicos tsunamigénicos** en diferentes escenarios simulados, lo que permitirá rápidamente estimar los tiempos de arribo y la altura máxima de la ola en las diferentes localidades costeras. Para esto, se utilizan diferentes modelos numéricos como: TUNAMI, Proyecto TIME (Tsunami Inundation Modeling Exchange), WinITDB o ComMIT.

En la DIHIDRONAV se ha implementado un software para evaluar los tsunamis de origen cercano y regional; ingresando los parámetros sísmicos como magnitud, profundidad y las coordenadas del epicentro (latitud y longitud) se realiza el **cálculo de los tiempos de arribo y la máxima altura del tsunami** en los diferentes puertos del Perú, esto para evaluar el peligro de la llegada del tsunami y emitir el boletín que corresponda (figura 30).

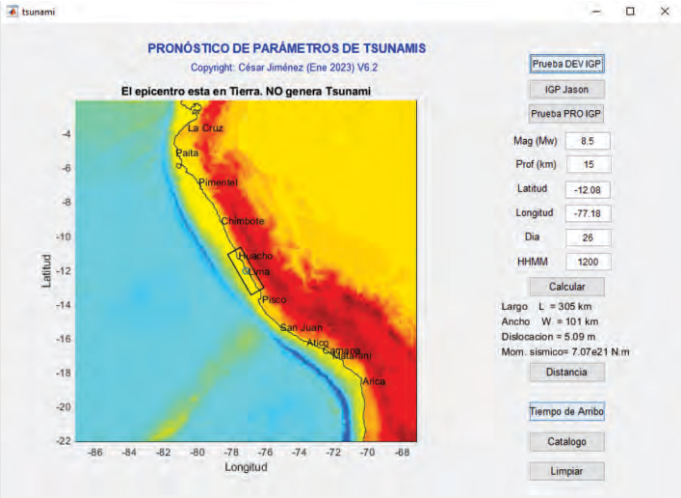
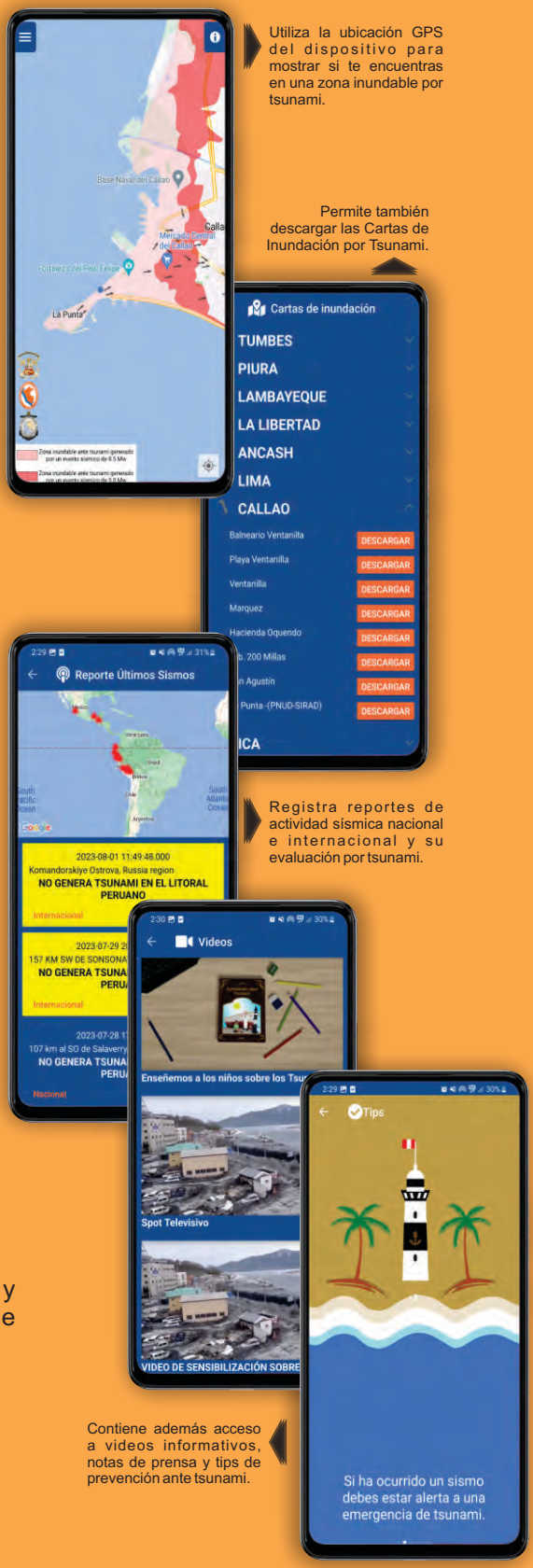


Figura 30: Software implementado para evaluar la ocurrencia de tsunamis (fuente: DIHIDRONAV)

La app gratuita "MGP Tsunamis" es una herramienta de preparación y prevención ante tsunamis.



¿Cómo obtengo el aplicativo MGP Tsunamis?

Esta herramienta se encuentra disponible para sistemas IOS y Android, obtenla buscando MGP Tsunamis en la tienda de aplicaciones o escaneando el código QR según tu dispositivo.

Android IOS

Figura 31: Vigilancia permanente de la actividad sísmica global y del nivel del mar en el Centro Nacional de Alerta de Tsunamis (fuente: DIHIDRONAV)

TSUNAMIS IMPORTANTES QUE HAN AFECTADO AL PERÚ

En este capítulo veremos los principales tsunamis que afectaron al Perú.

CAPÍTULO IV
Tsunamis importantes que han afectado al Perú

CRONOLOGÍA DE TSUNAMIS QUE AFECTARON AL PERÚ

El Perú es parte del **Cinturón de Fuego del Pacífico**, zona conocida así por la intensa actividad volcánica y sísmica debido a la interacción entre placas tectónicas. La placa de **Nazca** se subduce debajo de la placa **Sudamericana** a una razón promedio de 8 cm/año, debido a lo cual se producen un gran número de sismos de variada magnitud en la costa peruana. Como se indicó previamente, un sismo de magnitud 7.0 Mw o mayor con epicentro en el mar podría generar un tsunami.

A lo largo de la historia, numerosos eventos tsunamigénicos han azotado las costas peruanas causando grandes pérdidas materiales y de vidas humanas; pudiendo mencionar los siguientes:

1586 — 09 de julio, Lima. Debido a un sismo de intensidad VII. El mar se elevó hasta 4 m, las olas inundaron parte del puerto Callao (llegaron hasta el monasterio de Santo Domingo) y Lima, ocasionó la muerte de 22 personas.

1604 — 24 de noviembre, Arica (que actualmente forma parte de Chile). Debido a un sismo de magnitud entre 8.5 Mw y 9.0 Mw. Afectó Arica, Ilo, Camaná y Pisco; murieron en total 74 personas.

1664 — 12 de mayo, Ica. Terremoto de magnitud aproximada de 8.0 Mw, el terremoto produjo 400 muertos. Un tsunami afectó la ciudad de Pisco, 60 personas murieron.

1687 — 20 de octubre, Lima. Se produjeron dos terremotos, uno de magnitud 8.0 Mw y el otro de 8.4 Mw (1541 víctimas). El segundo terremoto originó un tsunami, murieron a causa del tsunami cerca de 300 personas.

1716 — 10 de febrero, Pisco. Sismo de magnitud 8 Mw con probable epicentro en el mar de Ica que produjo un tsunami. Por sus características, este evento es muy similar al de Pisco 2007.

Figura 32: Representación de la destrucción por del sismo y tsunami de Lima, 1586 (fuente: hispanopress.blogspot)

Figura 33: Recreación del sismo y tsunami de Arica, 1604 (fuente: hispanismo.cl)

1746 28 de octubre, Callao. Sismo con magnitud estimada de 9 Mw que originó un tsunami con olas de hasta 10 m. En el Callao, de los 5000 habitantes solo se salvaron 200. Probablemente el maremoto más destructivo registrado a la fecha en el Perú central.

1806 01 de diciembre, Lima. Sismo de magnitud 8 Mw, con hasta 2 minutos de duración. El tsunami con olas de hasta 6 m arrastró un ancla de 1.5 Tn y afectó Lima y Callao.

1868 13 de agosto, Arica. Sismo de magnitud 9 Mw. Se generó un tsunami con altura de ola máxima registrada de 16 m, murieron a causa de este evento alrededor de 700 personas.

Figura 34: Registro histórico del evento de 1868 en Arica (fuente: Ilustrated London News, 1867)

1940 24 de mayo, Callao. Terremoto de magnitud 8.2 Mw acompañado de un maremoto que afectó desde Guayaquil a Arica. Se contabilizaron aproximadamente 1000 muertos debido a este evento. Se produjo un pequeño tsunami observado en Ancón y Callao.

Figura 35: Registro histórico del evento de 1940 en Lima y Callao (portal: El Comercio, 2015).

Figura 36: Fotografías del evento de 1940 en Callao (fuente: peru.com, 2017)

1960 20 de noviembre, norte del Perú. Terremoto de magnitud 7.8 Mw y tsunami con olas de hasta 9 m de altura que afectó Piura y Lambayeque. Murieron tres personas a causa del tsunami. La isla Lobos de Afuera fue barrida totalmente.

1974 03 de octubre, Lima. Sismo de magnitud 8.1 Mw y tsunami que afectaron Lima e Ica. Se registraron 252 muertos además muchas fábricas, muelles y zonas de cultivo afectadas.

Figura 37: Registro del evento de 1974, Lima (publimetro.pe, 2019)

1996 21 de febrero, Chimbote. Sismo de magnitud 7.5 Mw que ocasionó un tsunami, se reportaron daños en los puertos Salaverry y Chimbote, 15 personas fallecieron.

1996 12 de noviembre, Nazca. Sismo de magnitud 7.7 Mw y profundidad de 46 km, generó un tsunami que afectó principalmente el puerto de San Juan de Marcona. 20 personas murieron en este evento.

2001

23 de junio, Camaná. Sismo de magnitud 8.4 Mw que ocasionó un tsunami. Este evento afectó las localidades de Ocoña, Camaná, Quilca y Matarani. Aproximadamente 240 personas murieron.

Figura 38: Zona inundada en Balneario Cuevas - evento en Camaná 2001(DHN, 2001)

2007

15 de agosto, Ica. Tsunami producido por un terremoto de 8.0 grados. El tsunami alcanzó una altura máxima de casi 10 metros. A causa del evento se reportaron 595 personas fallecidas y numerosas pérdidas.

EL PAIS

DIARIO INDEPENDIENTE DE LA MAÑANA

"Que UPN quiera un grupo parlamentario propio no debe asustar al PP"

Un terremoto en Perú arrasa cuatro ciudades y causa cientos de muertos

La búsqueda de supervivientes continúa pese a la falta de agua, luz y alimentos

DESDE ICA: Una larga noche esperando la muerte en las viviendas de adobe

DESDE LIMA: "Fue horrible. El edificio temblió como si estuviera hecho de juguete"

Chávez aumenta su poder para dictar expropiaciones en Venezuela

La CIA y el Vaticano montaron Wikipedia

Hoteleros vanguardistas

Menos que amar el rock

Servet & Sabina

Las Bolsas se desploman presas del pánico

El Ibex 35 cede un 5,7%, la mayor caída desde el 11-M ● Los mercados europeos, en pérdidas anuales ● Sarkozy pide una reunión del G-7 ● 11 n fondo de Banca March, primera víctima en España

AUDEMARS PIGUET

Figura 39: Registro del evento de 2007 en Ica (elpais.com, 2019).

2010

27 de febrero, Talcahuano (Chile). Sismo de magnitud 8.8 Mw, y posterior tsunami que dejó 593 víctimas en Chile. Las olas llegaron al litoral peruano con un promedio de altura aproximado de 1 m.

2011

11 de marzo, Honshu (Japón). Sismo de magnitud 9.0 Mw, produjo olas de 10 m en Japón, dejando un total de 25, 000 victimas en Japón. Al litoral peruano llegaron luego de unas horas, olas entre 0.44 y 1.75 m.

2014

01 de abril, Iquique (Chile). Fuerte sismo en el norte de Chile, magnitud 8.1 Mw, con tsunami cuyas olas alcanzaron hasta 3 m registradas en Iquique. En Perú, el puerto de Ilo registró olas de 1 m e inundación leve.

2015

16 de setiembre, Coquimbo (Chile). Sismo al noroeste de Santiago, magnitud 8.3 Mw, un tsunami con altura de ola de 4,5 m se registró en Coquimbo. En Perú, el puerto del Callao registró un máximo de altura de ola de 0.6 m.

Figura 20: A causa del Tsunami murieron algunos animales en Laguna Grande, evento de Ica 2007 (IGP, 2007).

Figura 41: Máximo alcance de olas en Lagunillas, evento de Ica 2007 (IGP, 2007).

Figura 42: Puerto Caballas mostrando los efectos del tsunami, evento de Ica 2007 (modificado de IGP, 2007).

TSUNAMI DE CALLAO: 28 DE OCTUBRE DE 1746

ASPECTOS HISTÓRICOS

La tragedia empezó el 28 de octubre de 1746 a las 10:30 de la noche. Hacia el norte, el terremoto fue sentido hasta Guayaquil, a 1100 km de Lima, y en una misión jesuita ubicada cerca de la confluencia de los ríos Marañón y Huallaga, a 750 km de Lima. En Huancavelica se observaron severos movimientos acompañados de estruendos. Las edificaciones colapsaron al sur de Lima en todo el camino hasta Cañete, y al norte hasta Huacho (alrededor de 120 km al norte de Lima), donde un puente sobre el río Huaura colapsó. Las carreteras que conducían al interior fueron bloqueadas por derrumbes. Los valles de Supe, Barranca y Pativilca fueron seriamente dañados. El movimiento también fue sentido en Cusco, Tacna y los poblados fronterizos. Las réplicas se sintieron en Lima durante toda la noche, y en un lapso de 24 horas se contaron no menos de 200 eventos (figura 43).

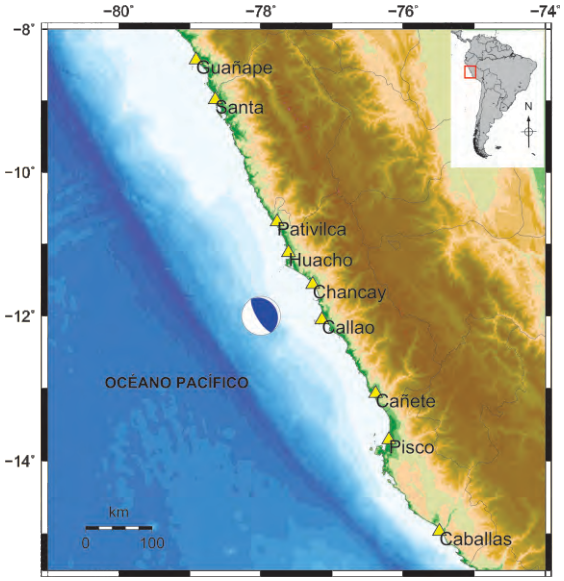


Figura 43: Ubicación de puertos y balnearios afectados por el maremoto (Jiménez, 2015).

El puerto del Callao soportó el mayor daño de esta catástrofe. La ciudad estaba encerrada por una muralla, cuya base era alcanzada algunas veces por la marea y el oleaje. El número de habitantes alcanzaba a 5000 personas. Luego de media hora después del sismo, el mar se elevó hasta los 10 m, en su avance rompió las murallas e inundó la ciudad. Cuando el mar retrocedió la mayoría de las casas y edificios fueron arrancados de sus cimientos y llevados por las aguas. Una gran parte de las murallas de la ciudad fueron arrastradas por las aguas.

Casi todos los habitantes de la ciudad perecieron en este desastre. Puesto que el tsunami avanzó cerca de 4 km tierra adentro, alcanzó a las personas que trataban de huir hacia Lima. Sólo 200 personas lograron salvarse aferrados a objetos de madera y fueron lanzados entre el área de la costa y la isla San Lorenzo, a una distancia de hasta 8 km. De los 23 barcos anclados en el puerto, 19 se hundieron, y 4 fueron llevados tierra adentro. A eso de las 4 de la mañana del día siguiente, el Callao fue nuevamente inundado por otra ola. La máxima altura de inundación fue estimada en 24 m (en los acantilados de la Costa Verde).

Figura 44: Devastación ocasionada por el sismo y tsunami de 1746 (fuente: diariocorreo.pe)

Las ondas del maremoto destruyeron Caballas, Pisco (Ica), Chancay (Lima) y Guañape (La Libertad). Cerca de Huacho, el camino fue completamente inundado, y los vehículos que estaban en el camino, junto con las mulas de carga, fueron arrastrados por el reflujo del mar. Similar escenario se vivió en Huaura (Salinas), donde el mar inundó más de 4 km tierra adentro, ahogándose las mulas y los conductores. Cerca al Callao, después del terremoto, parte de la línea de costa sufrió una subsidencia, hasta el punto que se formó una nueva bahía. En un espacio de 6 horas después de la inundación en el Callao, el maremoto llegó hasta Concepción (Chile); y en Acapulco (México) un barco fue arrojado a la orilla.

Se estima la magnitud de este terremoto en 9.0 Mw. Probablemente la ruptura se inició al norte del área de ruptura y luego se propagó hacia el sureste (figura 45).

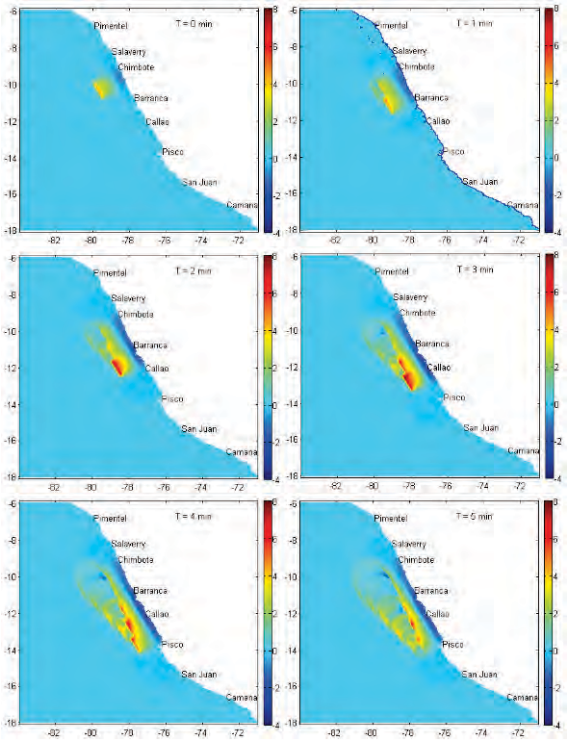


Figura 45: Propagación secuencial del maremoto de Callao 1746. (Jiménez, 2015).

La figura 46 muestra los mareogramas virtuales. En la zona de Chucuito DIHIDRONAV, colindante con la zona del puerto, la primera ola tuvo una altura de 10 m con un tiempo de arribo de 23 minutos. En la zona de la Punta, la primera ola es menor a los 10 m, mientras que en la zona de la Costa Verde, la altura de la primera ola es mayor a 22 m. Estas diferencias se deben esencialmente a la batimetría, topografía y morfología de cada zona particular.

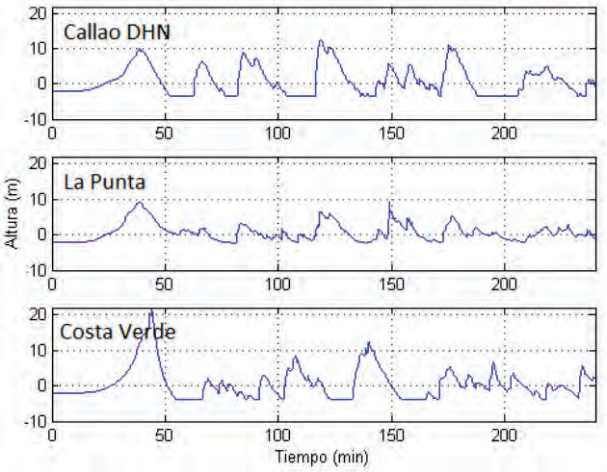


Figura 46: Mareogramas sintéticos. Nótese el corte inferior debido a la cercanía de los mareógrafos virtuales a la línea costera. La altura de la primera ola en el Callao es de 10 m, mientras que el máximo runup es de más de 22 m en la Costa Verde (Jimenez, 2015).

En la figura 47 se observa el mapa de inundación para el Callao. La inundación llegaría aproximadamente hasta las intersecciones de las avenidas Miguel Grau y Guardia Chalaca. También se observa que en la Costa Verde, las olas podrían ser de más de 22 m de altura, lo que concuerda con la información histórica (Jiménez, 2015).

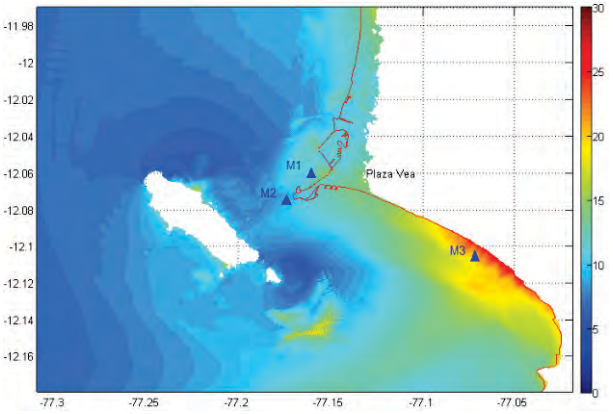


Figura 47: Mapa de inundación por maremoto para el Callao y para la bahía de Miraflores. Nótese la gran altura (zona roja) alcanzada por el maremoto en la Costa Verde. Los triángulos azules corresponden a los mareógrafos virtuales: M1 = Callao-DHN, M2 = La Punta, M3 = Costa Verde (Jiménez, 2015).

TSUNAMI DE CHIMBOTE: 21 DE FEBRERO DE 1996

El 21 de febrero de 1996 un sismo sacudió la región norte del Perú. A pesar de haber sido percibido levemente en Chimbote, este generó un maremoto con olas de 2 a 3 m de altura, provocando la muerte de 12 personas.

El terremoto de Chimbote (Perú) de 1996 fue un evento atípico en el sentido que a pesar de su magnitud relativamente pequeña (7.6 Mw) y una intensidad máxima de IV en la escala de Mercalli Modificada, generó un maremoto con efectos mayores a lo que se esperaba . Como efecto del impacto del maremoto con olas entre 2 y 3 m de altura, murieron 12 personas principalmente en la desembocadura del río Santa (al norte de Chimbote). Este tipo de evento es conocido en la literatura como **sismo tsunamigénico o "tsunami earthquake"** el cual debido a su ruptura lenta, produce olas mayores a las que se esperarían por su magnitud.

Ocola y Huaco (2006) realizaron observaciones de campo posteriores al evento indicando alturas de ola de 3 a 5 m en Casma y Samanco con inundaciones de hasta 200 m. En Coishco la altura de ola llegó hasta 15 m.

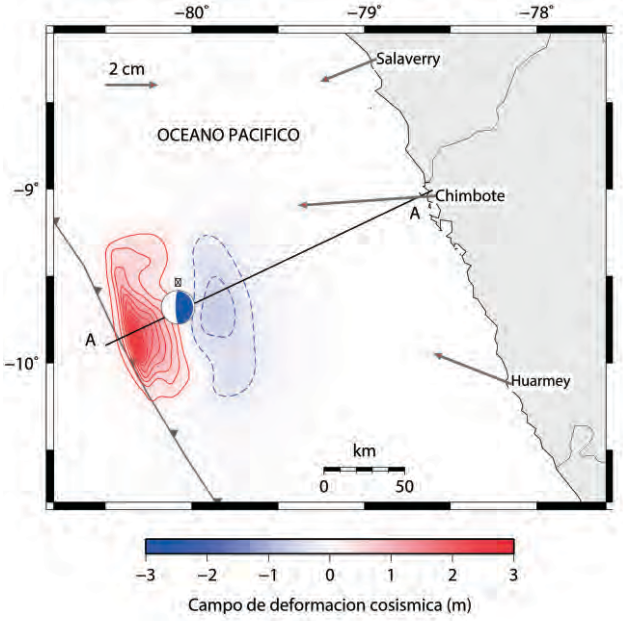


Figura 48: Resultado de la deformación vertical causada por el sismo. El color rojo indica el levantamiento y el color azul indica la subsidencia. El intervalo de las curvas de nivel representa 0.25 m. Las flechas representan a los vectores de desplazamiento cosísmico horizontal (Jiménez et al., 2015).

Los resultados de la simulación numérica muestran una máxima altura de ola de 1.81 m y un tiempo de arribo de la primera onda negativa (retiro) de 60 min en Chimbote (figura 48). Los registros mareográficos de Chimbote y Salaverry son analógicos y de baja resolución, impidiendo realizar una comparación para efectos de validación. El mareograma observado en Chimbote se saturó en el minuto 69 después de ocurrido el sismo (y dejó de registrar por el lapso de una hora) cuando la altura de la ola llegó a 1.3 m aproximadamente. El mareograma sintético de Salaverry muestra una amplitud máxima de 1.04 m y un tiempo de arribo de la primera ola de 83 min (Jiménez et al., 2015). El tsunami destruyó puerto Culebras, 110 km al sur de Chimbote (figura 50).

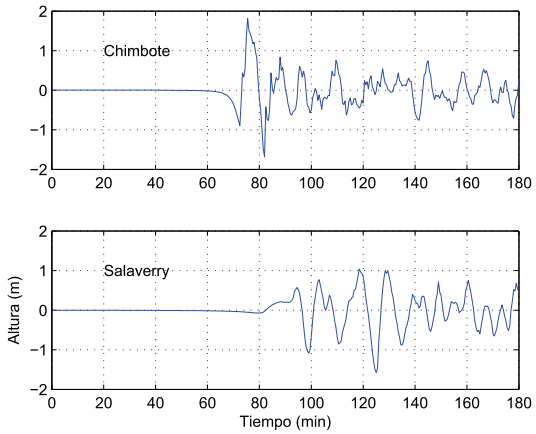


Figura 49. Mareogramas sintéticos para Chimbote y Salaverry. La máxima amplitud en Chimbote es 1.81 m con respecto al nivel medio del mar, se observa un retiro inicial del mar de poco menos de 1 m. La máxima amplitud en Salaverry es 1.04 m (Jiménez et al., 2015).

Figura 50. Muro derribado por el tsunami en Puerto Culebras (earthweb.es).

TSUNAMI DE CAMANÁ: 23 DE JUNIO DE 2001

El 23 de junio de 2001 a las 15:33 hora local ocurrió un sismo de magnitud 8.4 Mw, ubicado a 15 km al noroeste de la localidad de Atico, departamento de Arequipa, Perú. (figura 51). A consecuencia del sismo se produjo un tsunami que afectó significativamente a las poblaciones costeras de Ocoña, Camaná, Quilca y Matarani, ubicadas en litoral Sur del Perú. En el valle de Camaná, el tsunami penetró más de un kilómetro causando destrucción y muerte (figura 52). Tanto al norte de Atico como al sur de Matarani, la altura del tsunami no sobrepasó el nivel de pleamar (nivel más alto en marea creciente).

Cabe mencionar que el tsunami impactó la costa en el momento en el que la marea alcanzaba su nivel más bajo. La propagación transoceánica del tsunami se registró en los mareógrafos de Hawai, Japón, Australia, Nueva Zelanda, y Chile. En el mareógrafo del Callao, el tsunami se registró a los 90 min después del sismo con una altura máxima de 40 cm.

La DIHIDRONAV envió una comisión de reconocimiento 2 días después del sismo. Durante la visita de campo se recabaron testimonios que describen la respuesta de la población al impacto del tsunami y se documentaron tanto los daños materiales como la pérdida de vidas humanas por causa de este fenómeno (figuras 53, 54 y 55).

Posteriormente, con la información recabada durante el primer reconocimiento, en coordinación con instituciones de diferentes países se conformó el "Grupo Internacional de Estudios Post-Tsunami" ("International Tsunami Survey Team, ITST"), cuya finalidad fue delimitar la altura y extensión horizontal de inundación y estudiar minuciosamente la respuesta de la población en caso de desastre, así como los efectos costeros del tsunami.

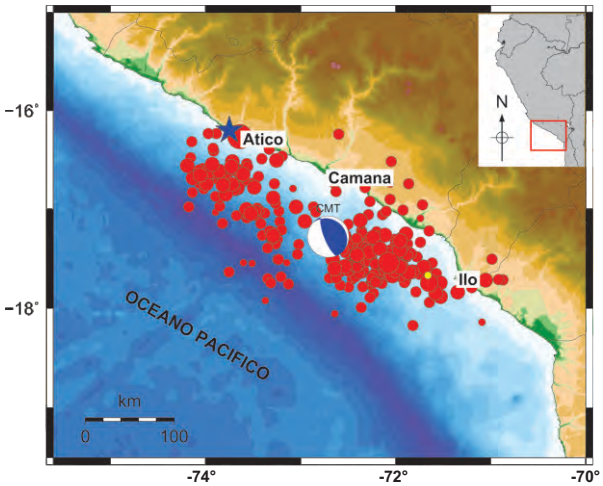


Figura 51: Ubicación del epicentro (en estrella azul) y réplicas del sismo de Camaná (periodo de 23 Jun a 23 Jul). El círculo blanco-azul representa al mecanismo focal. Datos obtenidos del USGS-NEIC(Jiménez, 2010)

La mayoría de las personas entrevistadas en comunidades de pescadores tenían conocimiento de la posibilidad de ocurrencia del tsunami debido al sismo. Sin embargo, esperaron a observar que el mar se retirara para constatar la ocurrencia del tsunami. Este hecho sugiere la necesidad de enfatizar que un terremoto fuerte es la alerta misma del tsunami y que no se debe esperar a que ocurra primero una retirada del mar.

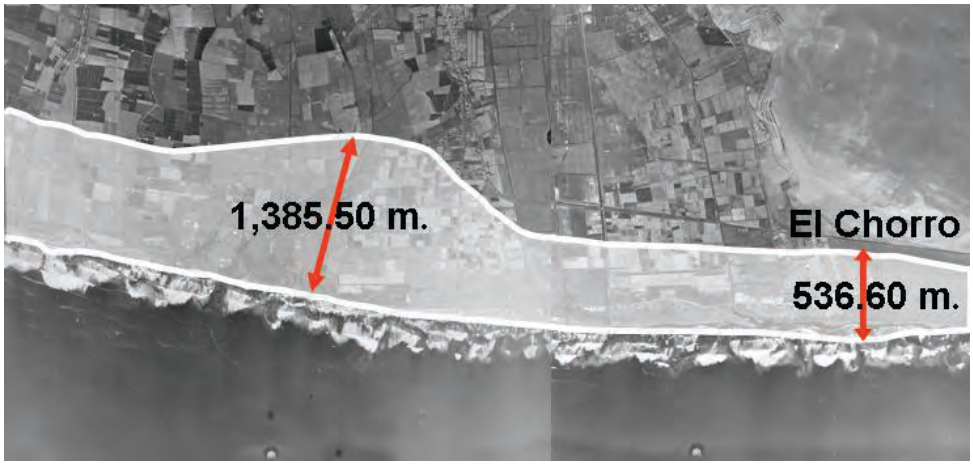


Figura 52: Fotografía aérea de Camaná, se puede apreciar la inundación del Tsunami desde la zona agrícola hasta el balneario (fuente: DIHIDRONAV)

Figura 53: Colapso de la vivienda por socavamiento de las cimentaciones por acción del retorno de las aguas del Tsunami al mar (fuente: DIHIDRONAV)

Figura 54: Zona inundable agrícola "La Dehesa", se observa que el tsunami llegó hasta la carretera panamericana Sur km 836 (fuente: DIHIDRONAV)

Las personas entrevistadas que estuvieron en la costa durante el tsunami, pero que no habitan en poblaciones costeras, no tenían conocimiento de este fenómeno, este caso indica la necesidad de incluir la descripción de este tipo de fenómenos en los libros de texto de educación secundaria a nivel nacional. Asimismo, el hecho de que la población afectada por el tsunami haya permanecido pernoctando en los cerros por más de 15 días por temor a que el mar se saliera de nuevo, es una evidencia contundente de la magnitud del trauma psicológico, e indica la necesidad de consolidar un grupo de expertos para estudiar, evaluar y mitigar los efectos psicológicos post-tsunami y post-sismo.

La experiencia de este tsunami en la zona de balnearios de Camaná ha mostrado que las construcciones con columnas y paredes de bloques de concreto no resisten el embate del tsunami. Las columnas de algunas de estas casas prevalecieron, pero la mayoría de las paredes fueron derribadas por la fuerza del agua. Algunas construcciones de concreto reforzado no experimentaron daños estructurales por el sismo y el tsunami, sin embargo, el suelo bajo algunas de estas construcciones fue socavado por el flujo de agua provocando la pérdida total de la construcción.

Figura 55: Balneario de "La Punta Vieja", se observa la inundación dejada por el tsunami y el colapso de la cimentación de las viviendas (fuente: DIHIDRONAV)

TSUNAMI DE PISCO: 15 DE AGOSTO 2007

El 15 de agosto del 2007 a las 6:40 de la tarde ocurrió un sismo a unos 50 km de la costa de Pisco, a una profundidad de 18 km, con una magnitud de 8.0 Mw, frente a las localidades de Tambo de Mora-Chincha Baja. Este sismo se generó en el área de convergencia entre la Placa de Nazca y la Placa de Sudamérica, con una intensidad VII-VIII en la escala de Mercalli en Pisco, causando graves daños a las edificaciones de esta ciudad costera, afectando principalmente a las poblaciones ubicadas en la Bahía de Pisco, Tambo de Mora y Península de Paracas (figura 56). Se generó un tsunami que arribó a cada una de las regiones costeras del Perú, con diferentes tiempos y alturas.

Lamentablemente no todos los residentes costeros estaban enterados del tsunami. En Caleta Lagunillas, al sur de la Península de Paracas, los residentes no se pusieron a salvo después del terremoto. Tres personas fueron arrastradas por las olas y sus cuerpos fueron recuperados aproximadamente 1,800 m tierra adentro. Estas muertes eran evitables puesto que había un terreno elevado (área segura en caso de tsunami) a no menos de 100 m de distancia donde se encontraban los residentes.

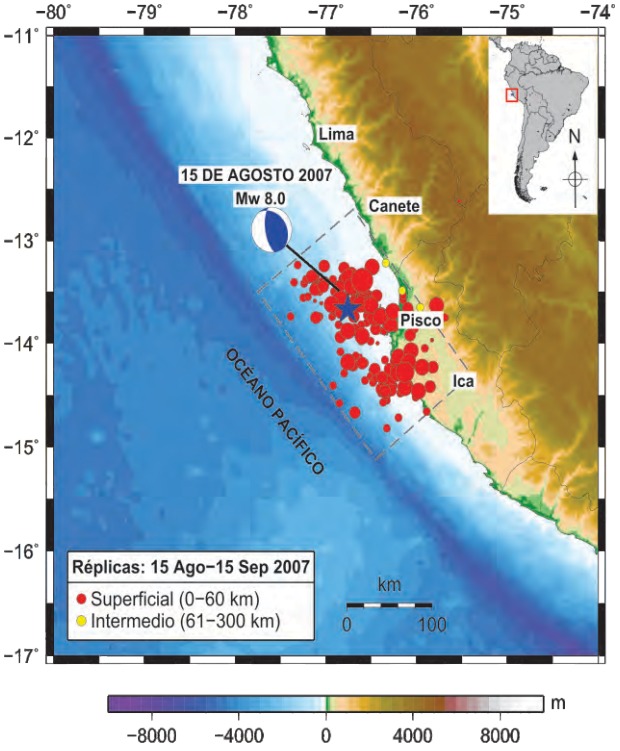


Figura 56: Réplicas del terremoto para el periodo del 15 Ago al 15 Set 2007 (fuente: Moggiano, 2013).

El estudio de campo Post-Tsunami tuvo lugar del 4 al 7 de septiembre 2007. Comprendió un recorrido de línea de costa de 275 km aproximadamente desde Lima por el norte hasta la bahía de la Independencia en Paracas (Ica).

Los testigos presenciales describieron dos a tres olas principales, incluyendo un retroceso inicial del mar correspondiente a la principal depresión del tsunami.

El mayor incremento del nivel del mar que se pudo documentar fue localizado en la playa Yumaque, donde alcanzó una altura máxima de inundación de 10 m respecto al nivel medio del mar, logrando una inundación horizontal de 70 m al norte y 150 m al sur (figura 57).

Los establecimientos permanentes más cercanos a Rancherío y Lagunillas fueron fuertemente afectados por las olas. En Lagunillas, el tsunami inundó hasta 2 km tierra adentro con un máximo run-up de hasta 4 m en el límite de inundación y alturas de run-up de 5 a 6 m en el lugar en que se encontraba el pueblo en la línea de costa (figura 57). Más de veinte embarcaciones fueron arrastradas y depositadas hasta 1.3 km tierra adentro (figuras 58, 59, 60).

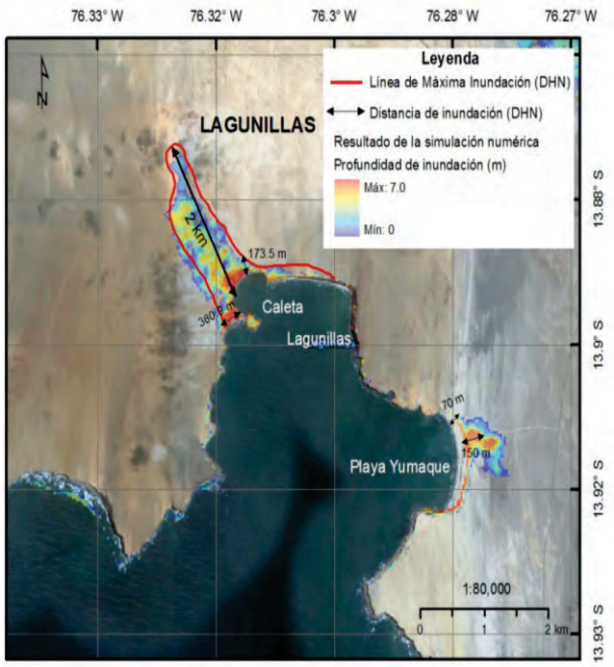


Figura 57: Áreas inundadas por el tsunami de Pisco, 2007 en el sector de Caleta Lagunillas y Puerto Yumaque (fuente: Moggiano, 2013).

Al norte de la Península de Paracas el tsunami alcanzó alturas de alrededor de 3 m. Las embarcaciones fueron arrastradas a las calles en Pisco. La prisión de Tambo de Mora fue parcialmente inundada, y sus paredes colapsaron debido al terremoto, por lo que se tuvo que liberar a 600 presos antes del impacto del tsunami, la mayoría de ellos regresaron luego de varios días.

El tsunami de Pisco se propagó a través de todo el Océano Pacífico. Quedando registrado en todos los mareógrafos de las costas de esta cuenca. De acuerdo a la información brindada por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA), el tsunami arribó a la provincia de Iwate al norte de Honshu - Japón con una altura de 20 cm. Posteriormente, se registraron anomalías en altura de olas en las costas de Hokkaido (al norte de Japón) y Kyushu (al sureste de Japón), así como en el archipiélago meridional de Okinawa.

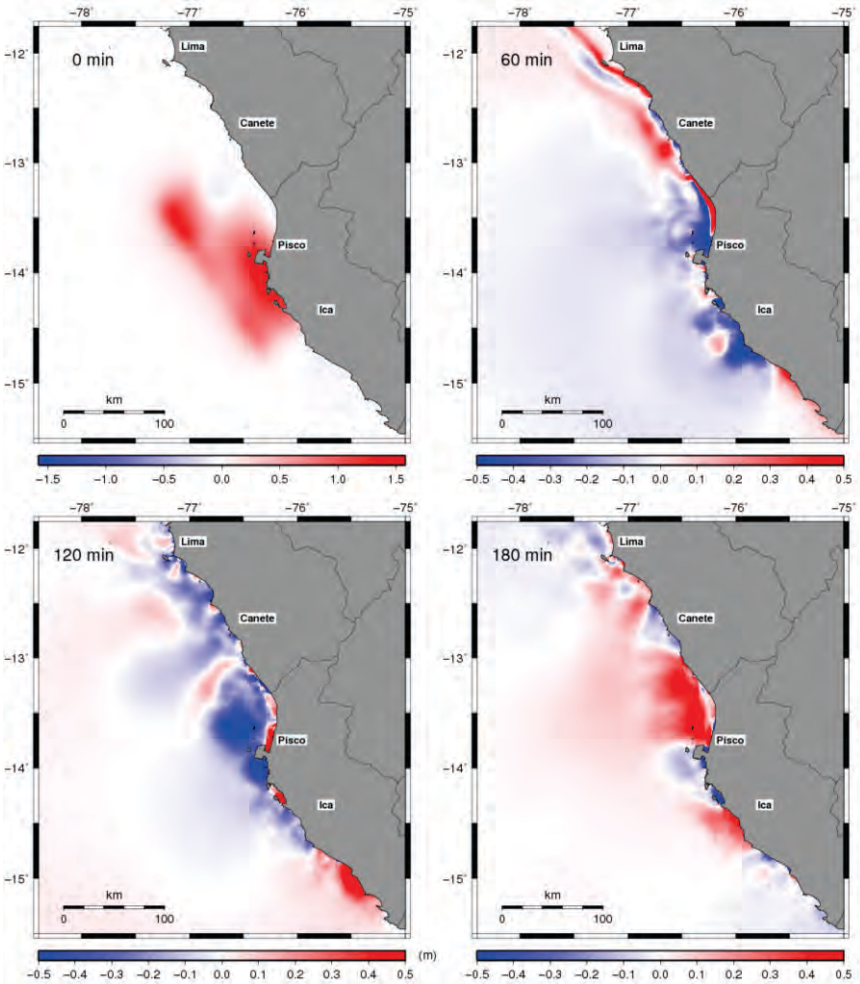


Figura 58: Simulación numérica de la propagación del tsunami de Pisco 2007 (Fuente: Moggiano, 2013)

Figura 59: Daños ocasionados a los pobladores en las zonas costeras de Pisco (fuente: DIHIDRONAV)

Figura 60: Caleta San Andrés. Vista de embarcaciones afectadas por el arribo de la ola, y escombros distribuidos por todas las calles de esta localidad (fuente: DIHIDRONAV)

TSUNAMI DE CHILE: 27 DE FEBRERO 2010

El 27 de febrero de 2010, a la 1:34 de la madrugada, la Red Sísmica Integrada de California (CISN), PTWC y el NEIC (National Earthquake Information Center/Centro Nacional de Información de Terremotos), registraron un evento sísmico con una magnitud 8.8 Mw, profundidad de 23 km y con epicentro en el mar a 104 km al suroeste de Talcahuano, Chile (figura 61).

La PTWC emitió una alerta de tsunami para todos los territorios y países que circundan el Océano Pacífico, incluidos Nueva Zelanda, Australia, Rusia, Japón y Filipinas, además de la costa sudamericana.

El tsunami cobró tres vidas en el archipiélago chileno de Juan Fernández, desaparecieron otros 13 residentes después que una ola gigante inundara el pueblo de San Juan Bautista (figuras 62, 63, 64, 65, 66 y 67). Las olas también arribaron a la polinesia francesa, con una altura de 1.08 m por encima de su nivel normal, según la Administración Nacional de Atmósfera y Océanos de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés).

El Sistema Internacional de Alerta de Tsunami del Pacífico (PTWC) emitió la alerta de tsunami para toda la cuenca del Pacífico. El Sistema Nacional de Alerta de Tsunami en el Perú a cargo de la DIHIDRONAV, activó la alerta de tsunamis en todo el litoral indicando el tiempo de arribo de las primeras olas:

- Hora de arribo: Litoral sur: 04:42 de la mañana.
- Hora de arribo: Litoral centro: 05:39 de la mañana.
- Hora de arribo: Litoral norte: 06:53 de la mañana.

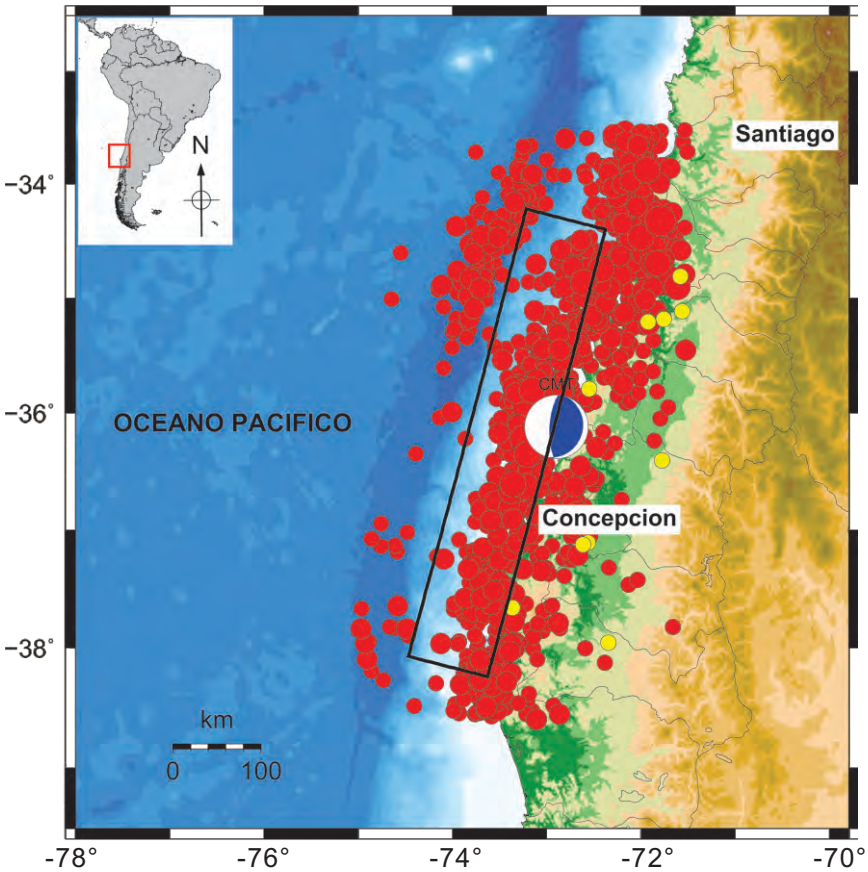


Figura 61: Mapa de réplicas del terremoto de Chile para un mes. (fuente: Jiménez 2017)

Figura 62: Casa arrancada desde sus cimientos por el tsunami hasta las calles de Pelluhue, Chile.

A las 6 de la mañana, después de haber evaluado las redes mareográficas instaladas en el litoral peruano y haber determinado la altura de la ola de aproximadamente de 1 m, las cuales no afectarían consecuentemente las costas peruanas, la DIHIDRONAV emitió la cancelación de alerta de tsunamis en todo el litoral del Perú.

Figura 63: Embarcación arrastrada a tierra por el tsunami en Talcahuano, Chile, 2010 (fuente: portalportuario.cl)

Figura 64: El tsunami que barrió la costera sureña de Chile atrajo pequeñas embarcaciones a tierra (fuente: portalportuario.cl)

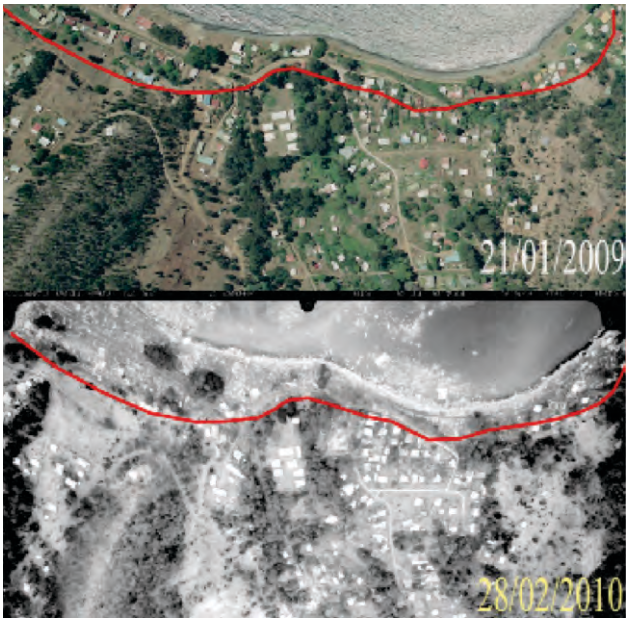


Figura 65: Imagen satelital del poblado de Dichato (al norte de Talcahuano): antes y después del tsunami (fuente: DIHIDRONAV)

Figura 66: Atico de una casa destruida por el sismo y tsunami (fuente: Santillan G, UNESCO)

Figura 67: Puerto de Talcahuano afectado por el tsunami (fuente: portalportuario.cl)

TSUNAMI DE JAPÓN: 11 DE MARZO 2011

Tsunami en las Costas de Honshu-Japón 2011

El 11 de marzo de 2011 a las 12:46 de la madrugada se produjo un sismo de magnitud 9.0 Mw cerca de la costa este de Honshu en Japón, a 130 km de Sendai y a una profundidad de 24 km (figura 68).

Japón sufrió el más grande terremoto en 140 años, el cual ocasionó un tsunami con alturas de ola de hasta 10 m en la costa noreste del país, dejando miles de muertos y arrasando todo a su paso. Se generó una alerta de tsunami para la costa pacífica de Japón y países de la cuenca del Pacífico, incluidos Nueva Zelanda, Australia, Rusia, Guam, Filipinas, Indonesia, Papúa Nueva Guinea, Nauru, Hawái, Islas Marianas del Norte, Estados Unidos, Taiwán, América Central, México y en Sudamérica, Colombia, Perú, Ecuador y Chile. El número total de víctimas mortales ascendió a 25,000 personas en Japón a consecuencia del tsunami.

Los registros mareográficos del litoral peruano evidenciaron el arribo del tsunami a más de 19 horas de ocurrido el terremoto, estas ondas alcanzaron alturas entre 0.44 y 1.75 m sobre el nivel medio del mar y un periodo promedio de 15 minutos. Asimismo, se observó que a pesar de haber terminado este evento se continuaron presentando algunas perturbaciones, debido principalmente a la geomorfología costera y a la presencia de oleajes anómalos que arribaron a las zonas sur y central del litoral. Hubo muchas embarcaciones, principalmente artesanales, que sufrieron daños como consecuencia del tsunami acoplado al oleaje irregular presente en esa fecha.

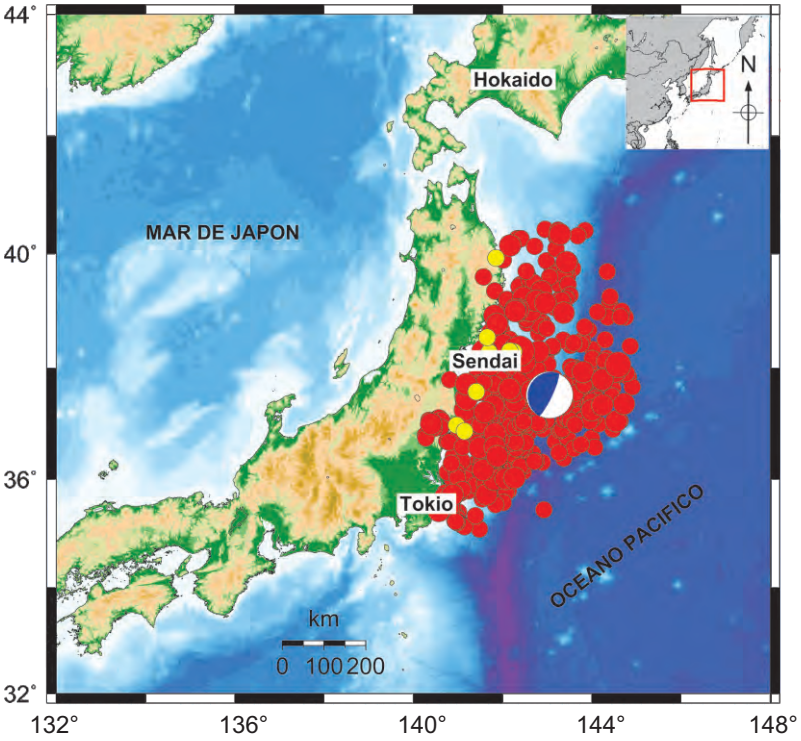


Figura 68: Mapa de réplicas del terremoto de Japón (periodo de un mes). Datos: NEIC-USGS. El diagrama focal representa a la fuente sísmica principal (fuente: DIHIDRONAV)

Figura 69: Inundación del tsunami en Miyako, Japón (fuente: elmundo.es)

Figura 70: Inundación en la zona costera de Sendai,Japón (fuente: preventionweb.net)

Figura 71: Varias horas después de la inundación, vehículos apilados (fuente: nbcnews.com)

Figura 72: Viviendas destruidas por el tsunami en Minami-Sanriku (fuente: chanel4.com)

Figura 73: Destrucción del puerto de Onagawa debido al maremoto (fuente: Yeh et. al., 2015)

TSUNAMI DE CHILE: 01 DE ABRIL 2014

Tsunami en las costas de Iquique - 2014

El 01 de abril del 2014 a las 6:46 de la tarde según el reporte final del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) ocurrió un sismo de magnitud 8.2 Mw cuyo epicentro se ubicó en el mar a una profundidad de 20 km, localizado a 95 km al noroeste de Iquique, Chile. Este sismo tuvo una duración aproximada de 2 minutos y se produjo dentro de la zona del gap sísmico "Arica – Antofagasta" en la cual la placa de Nazca se introduce debajo de la placa Sudamericana mediante el proceso de subducción (figura 74). Después de ocurrido el terremoto, se generó un tsunami local, activándose la alerta en forma simultánea a través del Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWC) para los integrantes de esta cuenca, que incluye a países centroamericanos y sudamericanos, entre ellos, el Perú.

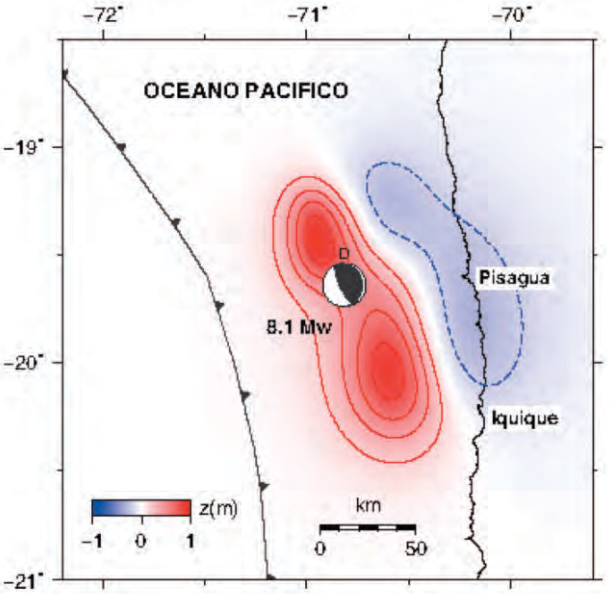


Figura 74: Representación de la deformación vertical por el sismo, el color rojo representa el levantamiento y el color azul representa el hundimiento. El diagrama focal representa el mecanismo de la fuente sísmica (fuente: Jiménez, 2019)

Figura 75: En la imagen se aprecian las huellas dejadas por la ola del tsunami, dentro del área deportiva del malecon de Ilo frente al municipio (fuente: DIHIDRONAV)

TSUNAMI DE CHILE: 16 DE SETIEMBRE 2015

Tsunami en la costa de Coquimbo - 2015

El 16 de setiembre de 2015 a las 5:45 de la tarde ocurrió un fuerte sismo de magnitud 8.3 Mw y profundidad de 22 km, a 48 km al Oeste de la ciudad de Illapel y a 230 km al noroeste de Santiago de Chile. Luego del terremoto principal hubieron muchas réplicas. Según las autoridades, hubo 13 víctimas mortales y 6 desaparecidos, así como cuantiosos daños materiales. En la Figura 76 se observa el patrón de deformación producido por el sismo, en la parte norte hubo una mayor liberación de energía, lo que explica la gran destrucción (debido al sismo y al impacto del tsunami) en la región de Coquimbo.

Como efecto se produjo un tsunami que se propagó por todo el Océano Pacífico. Se registró la máxima altura de ola de 4.5 m en la ciudad de Coquimbo, donde se reportó el mayor daño e impacto, tal como se observa en las figuras 77 y 78. Luego de ocurrido el sismo, las autoridades chilenas emitieron una alarma de tsunami para todo su litoral, la población respondió con una masiva evacuación en la zona de la fuente sísmica. El PTWC emitió una alerta de tsunami para varios países en la cuenca del Pacífico.

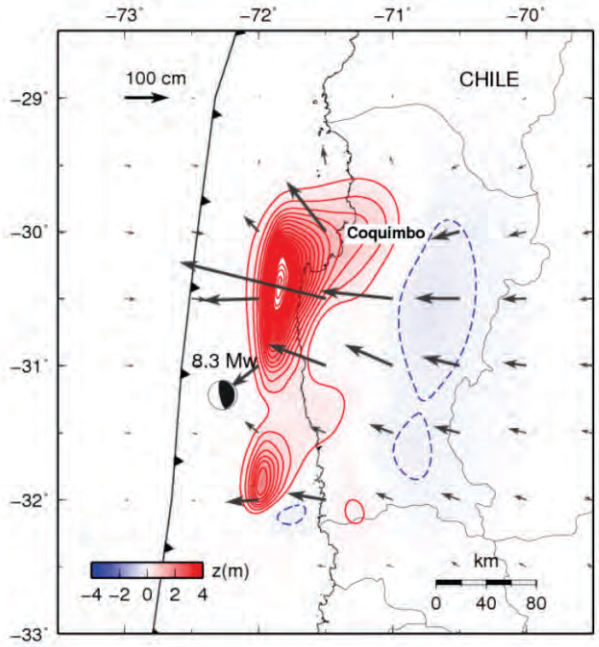


Figura 76: Deformación cosísmica generada por el sismo, el color rojo representa levantamiento y el azul representa subsidencia o hundimiento. Los vectores indican el desplazamiento horizontal (fuente: DIHIDRONAV)

Para el caso del Perú, se emitió una alerta de tsunami para la región sur, la cual fue cancelada pocas horas después. Los estaciones de la Red Mareográfica Nacional registraron el evento, con las siguientes máximas alturas de ola: Callao: 60 cm, Pisco: 30 cm e Ilo: 30 cm.

Figura 77: El tsunami destruyó construcciones en la costa de Coquimbo (fuente: codexverde.cl)

Figura 78: Embarcación afectada por el tsunami en el puerto de Coquimbo (fuente: elmostrador.cl)

Resumen histórico de Tsunamis en Perú

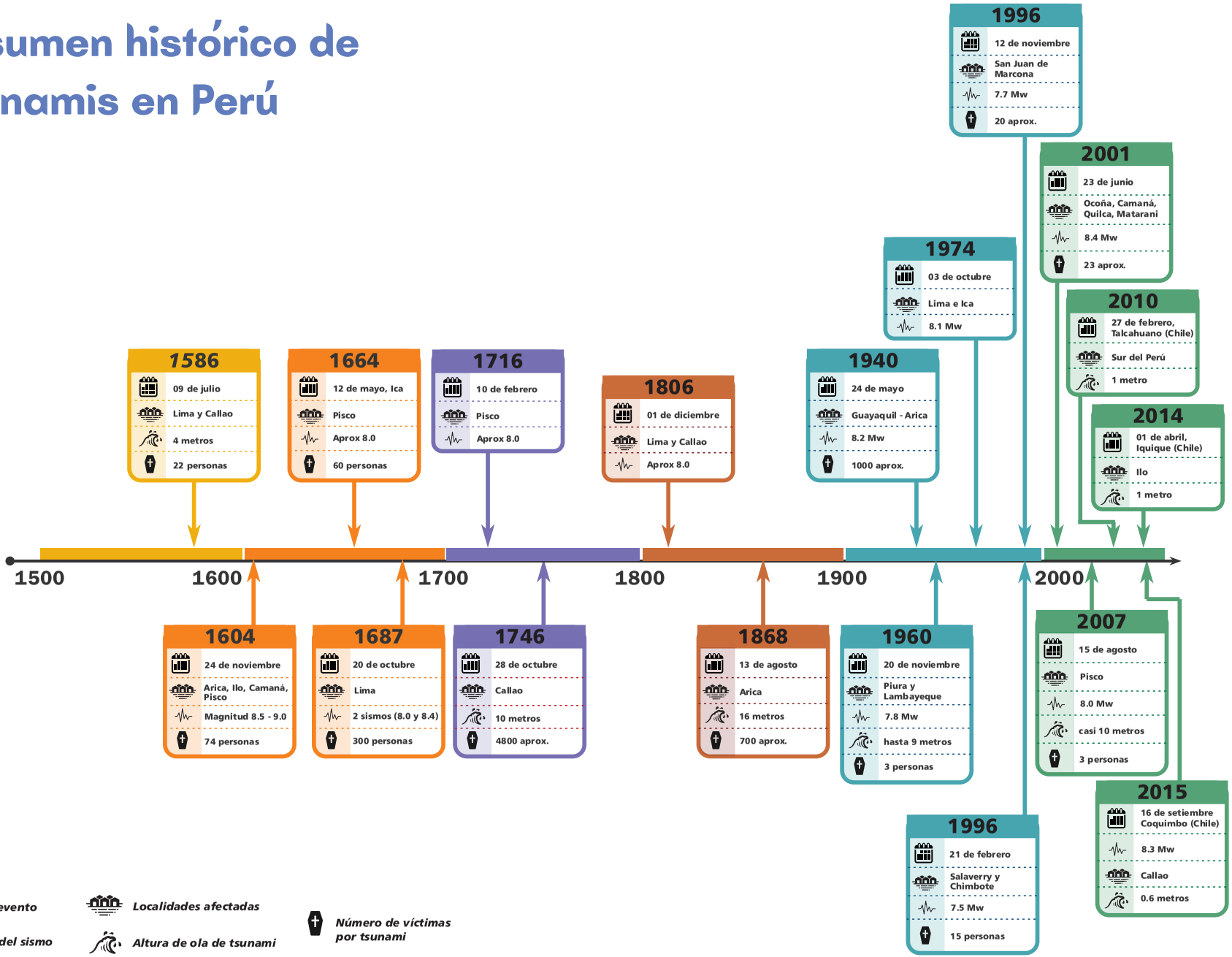


Figura 79: Resumen histórico de tsunamis en Perú (fuente: Informe s/n de fecha 31 de mayo de 2022, DIHIDRONAV)

CARTAS DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI

A continuación conoceremos las Cartas de Inundación por Tsunami, y cómo puedes usarla.

CAPÍTULO V
Cartas de Inundación por Tsunami

Las Cartas de Inundación por Tsunami son herramientas preventivas donde se muestra el límite máximo de inundación provocado por un evento tsunamigénico extremo. Estas cartas contienen elementos fundamentales como las rutas de evacuación y zonas de refugio para las localidades, balnearios y puertos costeros del litoral peruano con el fin de proteger a la población mitigando los efectos del tsunami y por consiguiente reducir los daños materiales y pérdidas de vidas humanas, apoyando además a un crecimiento urbano ordenado y seguro de las zonas costeras bajas que puedan ser inundadas por la ocurrencia de este fenómeno (figura 80).

DIHIDRONAV como parte de su compromiso por el bienestar de nuestra nación, elabora las Cartas de Inundación por Tsunami (CIT) desde hace más de dos décadas. Estos productos son elaborados mediante el uso de modelos numéricos para simulación de eventos de tsunami.

Las CIT se elaboran según criterios de priorización articulada junto a instituciones como PCM y el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgos de Desastres (CENEPRED). El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) elabora y designa las rutas de evacuación, las cuales son incluidas en las CIT que finalmente son publicadas en la página web de DIHIDRONAV.

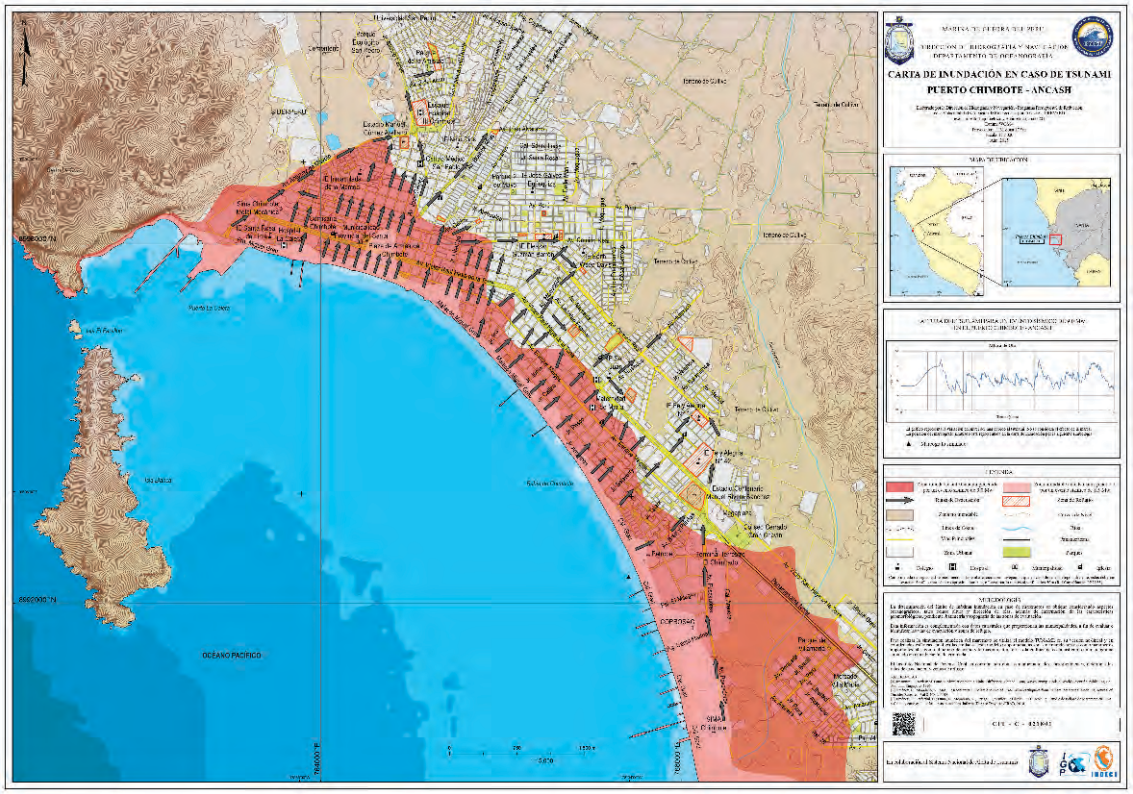


Figura 80: Carta de Inundación por Tsunami de Puerto Chimbote - Ancash (elaborado en el año 2015, fuente: https://www.dhn.mil.pe/cnat/cartas-inundacion)

Metodología aplicada

Con el fin de reconocer las posibles zonas afectadas ante una inundación por tsunami, se procede a realizar las siguientes etapas de trabajo:

a) Trabajo de Campo

Se hace un levantamiento topográfico y batimétrico, así como la supervisión de campo del estado de construcción y característica geomorfológicas relevantes del lugar que infieran de manera directa e indirecta en el caso de peligro de tsunami, así como la identificación de los servicios básicos, teniendo así una toma de datos cuantitativos y cualitativos de toda la zona de estudio (figura 81).

Figura 81: Trabajo de campo.

b) Trabajo de Gabinete:

Se realizan simulaciones con modelos numéricos, los cuales reproducen un evento de sismo de magnitud 8.5 Mw y 9.0 Mw, con generación de tsunami; teniendo como resultado la inundación en el área afectada, pudiendo así delimitar el área de máxima inundación.

De manera complementaria a la presentación de resultados, se elabora un sistema de información geográfico, el cual aloja toda la información espacial referida al peligro de tsunami, finalizando en la presentación de la Carta de Inundación por Tsunami, donde se muestra el estado actual de la zona de estudio, remarcando las áreas inundables, las rutas de evacuación y zonas de refugio, etc. (figura 82).

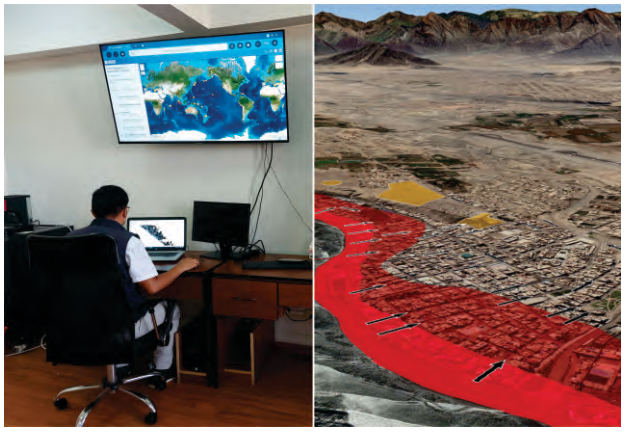


Figura 82: Trabajo de gabinete. Procesamiento y elaboración de las cartas.

Distribución de las Cartas de Inundación por Tsunami

Las Cartas de Inundación por Tsunami en el Perú están distribuidas a lo largo de todo el litoral y se encuentran catalogadas de acuerdo a su ubicación geográfica. Es posible acceder y descargarlas en la página web de la Dirección de Hidrografía y Navegación o por medio de la aplicación móvil “MGP Tsunamis” (figura 83).

Figura 83: Publicación de las cartas de inundación.

Las Cartas de Inundación por Tsunami son herramientas muy importantes en simulacros

Sistema de Alerta a la población

La DIHIDRONAV tiene presente que en estos casos "Educar a la población es el mejor sistema de seguridad y alerta ante un tsunami", en ese sentido, viene dictando charlas de difusión para sensibilizar a la población sobre las necesidades de conocer aspectos básicos acerca de los tsunamis. También genera diversas publicaciones como folletos, revistas y material informativo digital. Estos materiales son distribuidos en diferentes eventos públicos y centros educativos del Perú.

La DIHIDRONAV cuenta con una página web (dhn.mil.pe) de **acceso libre a la población**, con información acerca de tsunamis, información de los últimos sismos ocurridos y registro de movimiento anómalo en el mar, se encuentra activa las 24 horas del día. Se tiene presencia también en las **redes sociales** para difusión y concienciación a la población. La aplicación móvil gratuita **"MGP Tsunamis"** permite visualizar la Carta de Inundación por Tsunami más cercana de acuerdo a la ubicación del celular, contiene además consejos de prevención para saber las acciones a tomar en caso de un evento, enlaces a videos informativos, notas de prensa y permite descargar las Cartas de Inundación por Tsunamis. En todos los medios de difusión digitales se publican los boletines (información, precaución, alerta, alarma) de manera inmediata para el conocimiento del público en general.

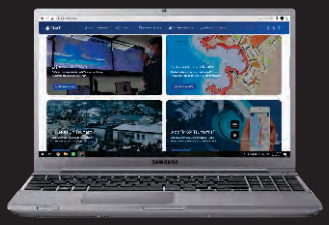
Actualmente, el Centro Nacional de Alerta de Tsunamis cuenta con un equipo de profesionales, técnicos y operadores de guardia que laboran durante las 24 horas del día, de lunes a domingos, incluidos feriados. Para mejorar la efectividad operativa de acción y respuesta ante tsunamis, este Centro realiza continuamente ejercicios de comunicación y verificación de operatividad entre los integrantes del SNAT, así como simulaciones de eventos de tsunamis bajo diferentes escenarios.

Se cuenta también con un **Centro Alterno** ubicado en La Perla (Callao), preparado con los principales sistemas de comunicación y vigilancia redundantes, en caso de problemas en la sede principal.

¿Cómo descargo una Carta de Inundación por Tsunami?

Puedes descargar las Cartas de Inundación desde la página web de la Dirección de Hidrografía y Navegación.

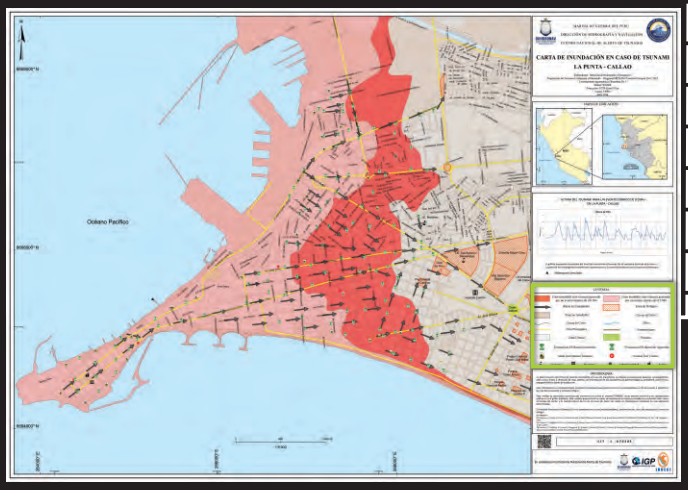
También puedes acceder a través del aplicativo móvil MGP Tsunamis (disponible para Android e IOS).



¿Qué información encuentro en una Carta de Inundación por Tsunami?

- Zona inundable ante tsunami generado por un evento sísmico de 9.0 Mw.
- Zona inundable ante tsunami generado por un evento sísmico de 8.5 Mw.
- Zona de Refugio
- Ruta de Evacuación

Otros elementos cartográficos



Carta de Inundación por Tsunami de La Punta, Callao

ANEXOS

Anexos

I. REGLAS DE SEGURIDAD EN CASO DE TSUNAMI

La alerta natural ante un tsunami es un sismo de gran magnitud con epicentro en el mar, si se observa disminución o incremento del nivel del mar, la población que se encuentre en las playas costeras debe tomar medidas inmediatas para el proceso de evacuación.

No permanecer en zonas costeras bajas, cuando haya ocurrido un fuerte sismo. Prestar atención a las señaléticas.

Un tsunami no es sólo una ola, sino una serie de olas; aléjese de las zonas costeras hasta que las autoridades hayan declarado la cancelación de la alerta.

Una ola pequeña de un tsunami en algún lugar de la costa puede ser extremadamente grande a pocos kilómetros de ese lugar, esto quiere decir que no debemos confiarnos en el tamaño de la ola.

El Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico no emite alertas falsas. Cuando se emite una alerta es porque existe un tsunami.

Nunca se acerque a la playa para observar un tsunami. Aléjese antes de que sea demasiado tarde.

Colabore con las autoridades durante una emergencia de tsunami.

Señalética para ruta de evacuación ante emergencia de alerta de tsunami (fuente: INDECI)

II. EQUIPO BÁSICO DE EMERGENCIA

Prepare un botiquín de primeros auxilios y aprenda a utilizarlos. Este debe contener medicinas para: golpes, cortaduras, quemaduras, entre otros.

Prepare artículos de emergencia tales como: radio a pilas, linternas, toallas, velas, fósforos, alimentos envasados perecederos y depósitos con agua potable y otros que permitan asegurar su integridad física por lo menos 24 horas.

Mochila y artículos de emergencia

III. ESCALA DE INTENSIDAD DE TSUNAMI

La intensidad de un tsunami es medida en base a observaciones macroscópicas del efecto causado sobre el ser humano y los objetos de varios tamaños, incluyendo embarcaciones y edificios. La escala de intensidad para tsunamis inicialmente más aceptada fue publicada por Sieberg (1923).

En el 2001, Papadopoulus e Imamura propusieron una nueva escala de 12 niveles de intensidad independiente de la medida de parámetros físicos (como la amplitud de la ola) y sensible a pequeñas diferencias en los efectos producidos por un tsunami, en la cual cada nivel es lo suficientemente detallado como para cubrir la mayor cantidad posible de tipos de daños que la comunidad y el medio ambiente sufren a causa de los tsunamis. La escala está dividida en 12 niveles y es similar a la escala de intensidad de Mercalli modificada (MM) que se emplea para evaluar los efectos del sismo a través de los daños causados. La nueva escala se organiza de acuerdo a tres factores:

(a) Efectos sobre seres humanos,
(b) Efectos sobre objetos, incluido barcos, y en la naturaleza,
(c) Daños a los edificios.

Escala de Intensidad de Tsunami
(modificado de Papadopulus e Imamura, 2001)

Intensidad	Descripción de los daños
I. No sentido	No se sintió incluso en las circunstancias más favorables. Ningún efecto. Ningún daño.
II. Apenas sentido	Sentido por pocas personas a bordo de pequeñas embarcaciones. No se observó en la costa. Ningún efecto. Ningún daño.
III. Débil	Sentido por la mayoría de personas a bordo de pequeñas embarcaciones. Observado por pocas personas en la costa. Ningún efecto. Ningún daño.
IV. Muy observado	Sentido por todos a bordo de pequeñas embarcaciones y pocas personas a bordo de grandes buques. Observado por la mayoría de personas en la costa. Ningún daño.
V. Fuerte	Sentido por todos a bordo de buques grandes y observado por todos en la costa. Trazas de capas de arena se depositan en las zonas inundadas. Los límites de inundación llegan a cultivos y estructuras cercanas a costa.
VI. Ligeramente perjudicial	Mucha gente se atemoriza y evacua a tierras más altas. Daños e inundaciones en estructuras de madera. El efecto es soportado por la mayoría de edificios de mampostería (material noble).
VII. Perjudicial	La mayoría de gente tiene miedo y trata de correr hacia terrenos altos, muchas embarcaciones pequeñas dañadas. Capas de arena y acumulaciones de guijarros quedan rezagadas. Muchas estructuras de madera son demolidas o arrastradas. Daños de grado 1 e inundaciones en edificios de mampostería.
VII. Muy perjudicial	Todas las personas escapan a tierras más altas, algunas son arrastradas. Algunos buques grandes se mueven a tierra o chocan entre sí. Objetos grandes se van a la deriva. Persiste la remoción de playas, ensuciándolas plenamente. Extensas inundaciones. Muchas balsas o botes son arrastrados y algunos parcialmente dañados. Las estructuras de madera son demolidas. Daños de grado 2 en edificios de mampostería.
IX. Destructivo	Muchas personas son arrastradas por la salida del mar en tierra. Grandes buques se mueven violentamente hacia tierra. Remoción extensa de playas. Hundimiento del terreno local. La mayoría de embarcaciones artesanales son arrastradas y muchas parcialmente dañadas. Daños de grado 3 en edificios.
X. Muy destructivo	Pánico general. La mayoría de personas son arrastradas por el mar. Los buques se mueven violentamente hacia tierra, muchos se destruyen y/o colisionan con edificios. Los vehículos son arrastrados, se producen incendios y hundimientos de tierra. Daños de grado 4 en edificios.
XI. Devastador	Carreteras interrumpidas. Se producen incendios. El agua desplaza automóviles y otros objetos hacia el mar. Daños de grado 5 en muchos edificios.
XII. Muy devastador	Prácticamente todos los edificios de mampostería demolidos.

REFERENCIAS

Dávila Jorge (2011). Diccionario Geológico. Perú: INGEMMET.

Frisch W., Meschede M. y Blakey R. (2011). Plate Tectonics, Continental Drift and Mountain Building. Springer Science.

Fossen H. (2010). Structural Geology. Cambridge University Press.

Grotzinger J., Jordan T., Press F., Siever R. (2007) Understanding Earth (Fifth Edition). Estados Unidos: W. H. Freeman and Company.

Hill C., LeDuc A. y Mitchell C. (2007). Guía de Referencia para Centros de Alerta de Tsunamis. US Indian Ocean Tsunami Warning System Program, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Imamura, F. (1996). Review of Tsunami Simulation with a Finite Difference Method. Long Waves Runup Models. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.

I**ntergovernmental Oceanographic Commission (2019).** Tsunami Glossary 2019 (Technical Series 85). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

Jiménez, C., Moggiano, N., Mas, E., Adriano, B., Koshimura, S., Fujii, F and Yanagisawa, H. (2013). Seismic Source of 1746 Callao Earthquake from Tsunami Numerical Modeling. Journal of Disaster Research, vol 8, N 2, pp 266-273.

Jiménez, C. (2015). El Maremoto Notable de 1746. Tesis de Maestría. UNMSM. UPG Física. Lima – Perú.

Jiménez, C., Calvo, M. y Tavera, H. (2015). Modelado numérico del sismo y maremoto de Chimbote 1996. Revista de Investigación de Física, Vol 18, N° 1.

Lay T., Wallace T. (1995). Modern Global Seismology, Estados Unidos: Academic Press.

Levin B., Nosov M. (2016). Physics of Tsunamis (Second Edition). Springer.

Moggiano, N. (2013). Modelado numérico del maremoto de Pisco 2007. Tesis de Licenciatura. UNMSM, Facultad de Ciencias Físicas.

Ocola, L. y Huaco, P. (2006). El maremoto de Chimbote del 21 de febrero de 1996: observaciones de campo y medidas de mitigación. Informe Técnico, IGP.

Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space. Bulletin of Seismological Society of America Vol. 75, Nº 4, pp 1135-1154.

Perfettini, H., J.P Avouac, H. Tavera, A. Kositsky, J.M. Nocquet, F. Bondoux, M., Chlieh, A., Sladen, L. Audin, D.L. Farber, and P. Soler. (2010). Seismic and aseismic slip on the Central Peru megathrust, Nature, 465, 78-81, doi:10.1038/nature09062.

Silgado, E. (1978). Historia de los Sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 – 1974). Boletín Nº 3. Instituto de Geología y Minería. Lima, Perú.

Soloviev, S., Go, Ch. (1975). Catalogue of Tsunamis on the Eastern Shore of the Pacific Ocean (1513-1968). Nauka Publishing House, 204 pp. Moscow, USSR.

Tarbuck E., Lutgens F. (2013) Ciencias de la Tierra, una introducción a la geología física (10ª edición). España: Pearson Educación S.A.

Tatsuhiko Saito (2019). Tsunami Generation and Propagation. Springer Geophysics.

Robinson A. H. (1985). The look of Maps, an examination of Cartographic Design (3rd edition). Estados Unidos: The University of Winconsin Press

Shearer P. (2009). Introduction to Seismology (2nd edition). Estados Unidos: Cambridge University Press.

Wood H. y Neumann F.(1931). Modified Mercalli Intensity Scale of 1931, Seismological Society of America Bulletin. 21, 4, pag. 277 – 283.

Portal de la delegación de alumnos de Topografía - Universidad Politécnica de Madrid: http://delegacion.topografia.upm.es/wp-content/uploads/2016/03/Tema_3._Ondas_sismicas.pdf

USGS - http://www.usgs.gov/
Guía de Referencia para Centros de Alerta de

Tsunamis (2007)-USAID-NOAAPortal – JohoMaps: http://www.johomaps.net/world/worldtecton.html

Portal USGS: https://pubs.usgs.gov/gip/earthq4/severitygip.html

www.dhn.mil.pe
Calle Roca 118 Chucuito - Callao Perú
Teléfono: 0511-207 8160. Email: dihidronav@dhn.mil.pe

ISBN: 978-9972-764-18-9