IOC/INF-1124

Plan Básico del ITSU

Segunda Edición
Abril de 1999

Revisión de la edición de diciembre de 1989

El Grupo Internacional de Coordinación del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico (GIC/ITSU), de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO, está compuesto por Estados Miembros del conjunto de la región del Pacífico. Su objetivo es proporcionar o mejorar todos los elementos de la mitigación de los tsunamis en el Pacífico, esto es, la evaluación de riesgos, las alertas, la preparación y la investigación mediante un sistema de cooperación y coordinación de las actividades en el plano internacional. Este documento, que constituye la segunda edición del Plan Básico del Sistema de Alerta contra los Tsunamis, contiene un breve panorama de la situación de los tsunamis y los riesgos conexos en el Pacífico. En el contexto de esa información se presenta la situación actual del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico y se señalan sus limitaciones, y se exponen las opiniones del GIC/ITSU sobre las correspondientes orientaciones para el futuro.

UNESCO **Comisión Oceanográfica Intergubernamental**

IOC/INF-1124
París, julio de 1999
Original: Inglés

INDICE

HISTORIA Y ESTRUCTURA ORGANIZATIVA DEL ITSU 1
LOS TSUNAMIS Y LOS RIESGOS CONEXOS 3
Tsunamis locales y regionales 3
Tsunamis que afectan a todo el Pacífico, o de origen lejano 4
Características de los fenómenos de tsunamis 5
SITUACIÓN ACTUAL, LIMITACIONES Y ORIENTACIONES FUTURAS 7
Evaluación de los riesgos 7
Datos históricos sobre tsunamis 7
Datos sobre paleotsunamis 9
Estudios posteriores a los tsunamis 9
Modelos numéricos 9
Alerta 11
Sistemas y centros de alerta 11
El Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico 11
El Centro de Alerta contra los Tsunamis de Alaska y la Costa Occidental . . . 12
Los centros de alerta contra los tsunamis del Japón 13
Los centros de alerta contra los tsunamis de la Federación de Rusia 14
El Centro de Alerta contra los Tsunamis de la Polinesia Francesa 14
El Sistema Nacional de Alarma de Maremotos de Chile 15
Otros sistemas nacionales de alerta 15
Datos 17
Datos sísmicos 17
Datos sobre el nivel del mar 19
Datos históricos sobre tsunamis y seísmos 22
Datos procedentes de modelos numéricos 22
Otros tipos de datos 22
Comunicaciones 23
Acceso a los datos en tiempo real 23
Difusión de mensajes 23
Preparación 24
Evacuación 24
Evacuación en caso de tsunami de origen cercano 25
Educación 26
Educación del público 26
Educación dirigida a encargados del funcionamiento de sistemas de alerta, administradores de situaciones de emergencia y responsables políticos . . . 26
Ordenación territorial 27
Ingeniería 27
Investigación 28
Estructura 28
Ambitos de investigación 29
Aplicaciones recientes de la investigación 31
CONCLUSIONES 32
Agradecimientos 33
Lista de acrónimos 34

La formulación del Plan Básico se mencionó por primera vez en Fiji en 1982, durante la 8ª reunión del Grupo Internacional de Coordinación del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico (GIC/ITSU). En esa oportunidad se aprobó la Resolución VIII.1 en la que, entre otras cosas, se pedía al Secretario de la COI que prestara "apoyo para la preparación, la publicación y la distribución de un Plan Básico". Con ese apoyo se preparó un documento titulado "Tsunami – Where Next?" que fue aprobado por el ITSU en su 9ª reunión en Honolulú (Hawai) en 1984 como anteproyecto del Plan Básico. En la Resolución IX.1 del ITSU se recomendó que se finalizara el Plan Básico con miras a su aprobación en la 10ª reunión, que se celebró en Sidney, B.C. (Canadá) en 1985; en esa ocasión se examinó el proyecto de Plan Básico que, empero, no fue aprobado en su forma final hasta la 11ª reunión del ITSU que tuvo lugar en Beijing en 1987. La primera edición del Plan Básico fue elaborada por G. C. Dohler, ex Presidente del ITSU, en cooperación con la Secretaría de la COI, el Director del Centro Internacional de Información sobre los Tsunamis y el Presidente del ITSU, y habida cuenta de los comentarios suministrados por los Enlaces Nacionales de los Estados Miembros del ITSU. La primera edición, documento IOC/INF-730, fue publicada el 23 de diciembre de 1989.

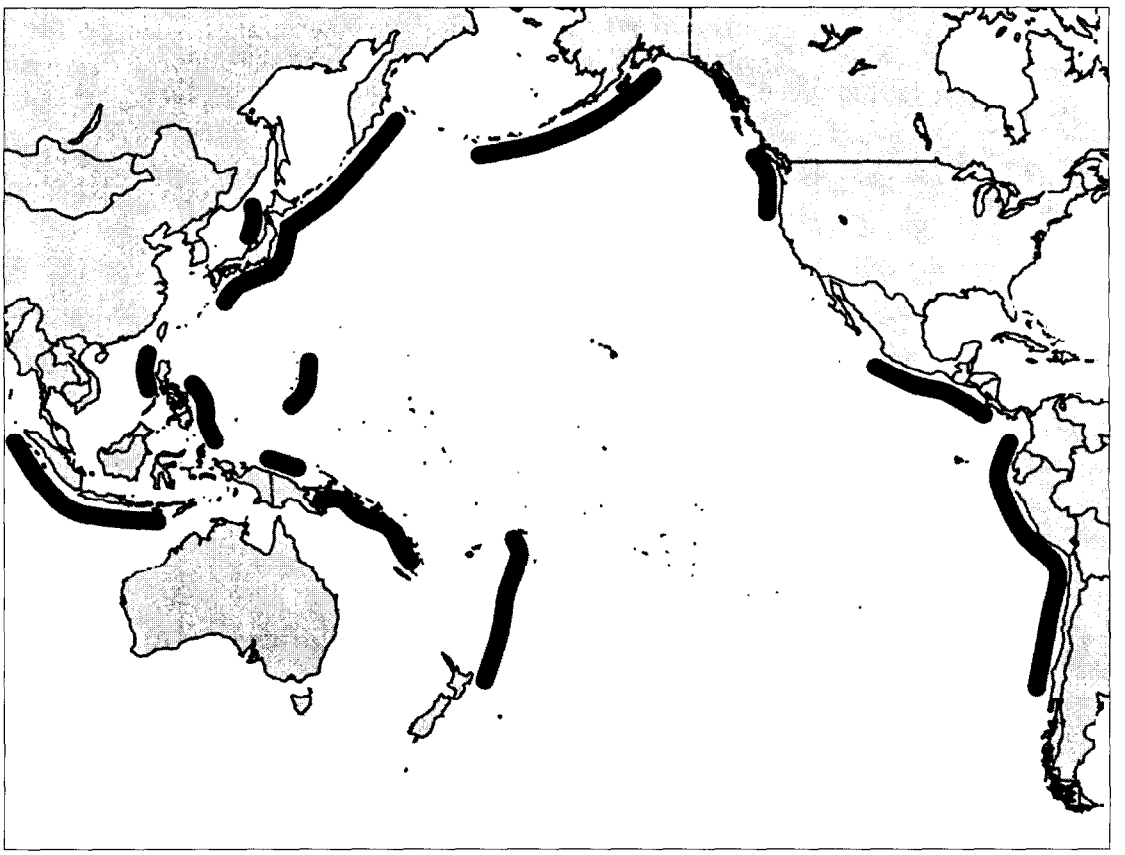
En la 15ª reunión del ITSU que tuvo lugar en 1995 en Papeete, Polinesia Francesa, los participantes pidieron que, habida cuenta de los recientes adelantos tecnológicos introducidos en el Sistema y del conocimiento científico acrecentado de la naturaleza de los tsunamis, se actualizara el Plan Básico y se estableciera un Grupo de Redacción a esos efectos. Se preparó un proyecto de la segunda edición que se sometió a los Estados Miembros en la 16ª reunión del ITSU celebrada en Lima (Perú), a fin de recabar sus comentarios y posibles correcciones. Sobre la base de sus contribuciones ulteriores se finalizó esta segunda edición del Plan Básico.

El Plan Básico del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico tiene por objeto ser una guía a largo plazo para el mejoramiento de dicho sistema sobre la base del análisis de sus componentes existentes. Desde 1987 las innovaciones tecnológicas como el mejoramiento de las redes de comunicación, el perfeccionamiento de las técnicas de análisis sísmico y las minicomputadoras de bajo costo y alto rendimiento han incrementado considerablemente la expectativa de que los mejoramientos recomendados en el Plan puedan materializarse en beneficio de los Estados Miembros. Se considera que los mejoramientos tecnológicos introducidos en el Sistema de Alerta, que sólo pueden ser beneficiosos, requieren asistencia financiera y un plan de acción que permita allegar y mantener el apoyo de los Estados Miembros a fin de obtener resultados positivos.

Frente a las actuales limitaciones operativas del Sistema de Alerta contra los Tsunamis existente, el Plan Básico destaca concretamente varios ámbitos que requieren mejoras. En la medida en que define los elementos fundamentales del Sistema de Alerta contra los Tsunamis y los mejoramientos requeridos, el Plan constituye un documento útil y actual que se puede modificar y revisar para sacar provecho de los adelantos tecnológicos, posibilidades de financiación aún no exploradas y la colaboración entre los Estados Miembros.

HISTORIA Y ESTRUCTURA ORGANIZATIVA DEL ITSU

En la tercera reunión de la **Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI)**, en junio de 1964, la Comisión pidió a la Secretaría de la COI que tomara las disposiciones necesarias para convocar una reunión, de preferencia en Honolulú, a principios de 1965, para examinar los aspectos internacionales del Sistema de Alerta contra los Tsunamis, a fin de garantizar la mejor cooperación internacional posible en todas las fases del Sistema de Alerta contra los Tsunamis, esto es: estaciones sismológicas y mareográficas, comunicaciones interiores e internacionales y emisión y comunicación de las alertas. Se enviaron invitaciones a todos los Estados Miembros de la COI interesados en la región del Pacífico, así como invitaciones especiales al Coast and Geodetic Survey de los Estados Unidos de América, el Organismo Meteorológico del Japón, los Servicios Hidrometeorológicos de la URSS, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Comisión sobre Tsunamis de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG), la Unión Internacional de Telecomunicaciones y otros organismos nacionales o internacionales interesados por la cuestión.



Principales zonas sísmicas y tsunamigénicas en la región del Pacífico. La mayoría de los tsunamis sólo son destructores a lo largo de las costas cercanas al seísmo que los genera. No obstante, cada siglo algunos son suficientemente poderosos para ocasionar destrucciones a muchos miles de kilómetros del lugar de origen.

De conformidad con la solicitud de la COI un Grupo de Trabajo sobre los Aspectos Internacionales del **Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico (TWSP)** se reunió en abril de 1965 en Honolulú. El grupo debatió sobre la Resolución III.8 de la COI, sus posibles repercusiones positivas para los Estados Miembros y las medidas requeridas para proporcionar, a escala internacional, alertas oportunas contra los tsunamis. En consecuencia, se constituyó el **Grupo Internacional de Coordinación del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico (GIC/ITSU, o ITSU)**, compuesto por Estados Miembros de la región del Pacífico. Su objetivo es recomendar y coordinar programas muy provechosos para los países pertenecientes a la COI cuyas zonas costeras están amenazadas por los tsunamis. Para lograr sus objetivos y asegurar el éxito del proyecto de sistema internacional de alerta contra los tsunamis, el ITSU se reúne aproximadamente cada dos años por invitación de uno de sus Estados Miembros en una localidad situada a orillas del Pacífico. Estas reuniones brindan la oportunidad de intensificar la cooperación y la coordinación entre los Estados Miembros, examinar las actividades del Grupo desde la reunión anterior y definir el programa del Grupo para el periodo siguiente.

Simultáneamente con la creación del ITSU, la COI aceptó la propuesta de los Estados Unidos de América de ampliar los servicios de su centro existente de alerta contra los tsunamis en Hawai, actualmente conocido como **Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico (PTWC)**, para convertirlo en sede operativa del TWSP. Asimismo, aceptó el ofrecimiento de los demás Estados Miembros de integrar sus servicios y comunicaciones existentes en el Sistema.

Además, la COI estableció el **Centro Internacional de Información sobre los Tsunamis (ITIC)** en Honolulú (Hawai, Estados Unidos de América), en apoyo del ITSU y del TWSP. El mandato del ITIC, revisado por el ITSU en 1977, tiene seis componentes que son, brevemente, los siguientes: 1) supervisar y recomendar mejoras en el sistema de alerta, 2) proporcionar a los Estados Miembros y a los no miembros información sobre las actividades del sistema de alerta, el ITIC y el ITSU, 3) prestar asistencia para el establecimiento de sistemas nacionales de alerta contra los tsunamis en la región del Pacífico, 4) acopiar y difundir conocimientos sobre los tsunamis y fomentar las investigaciones relativas a ellos así como su aplicación, 5) facilitar el acceso a todos los registros relativos a los tsunamis y 6) prestar asistencia y elaborar procedimientos para los estudios posteriores a los tsunamis.

Estados Miembros del ITSU

(abril de 1999)

Australia, Canadá, Chile, China, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Fiji, Filipinas, Francia, Guatemala, Indonesia, Islas Cook, Japón, México, Nueva Zelandia, Nicaragua, Perú, República de Corea, República Democrática Popular de Corea, Samoa Occidental, Singapur y Tailandia

COI/UNESCO

Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO

NOAA de Estados Unidos

Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos

GIC/ITSU

Grupo Internacional de Coordinación del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico

NWS

Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos

ITIC

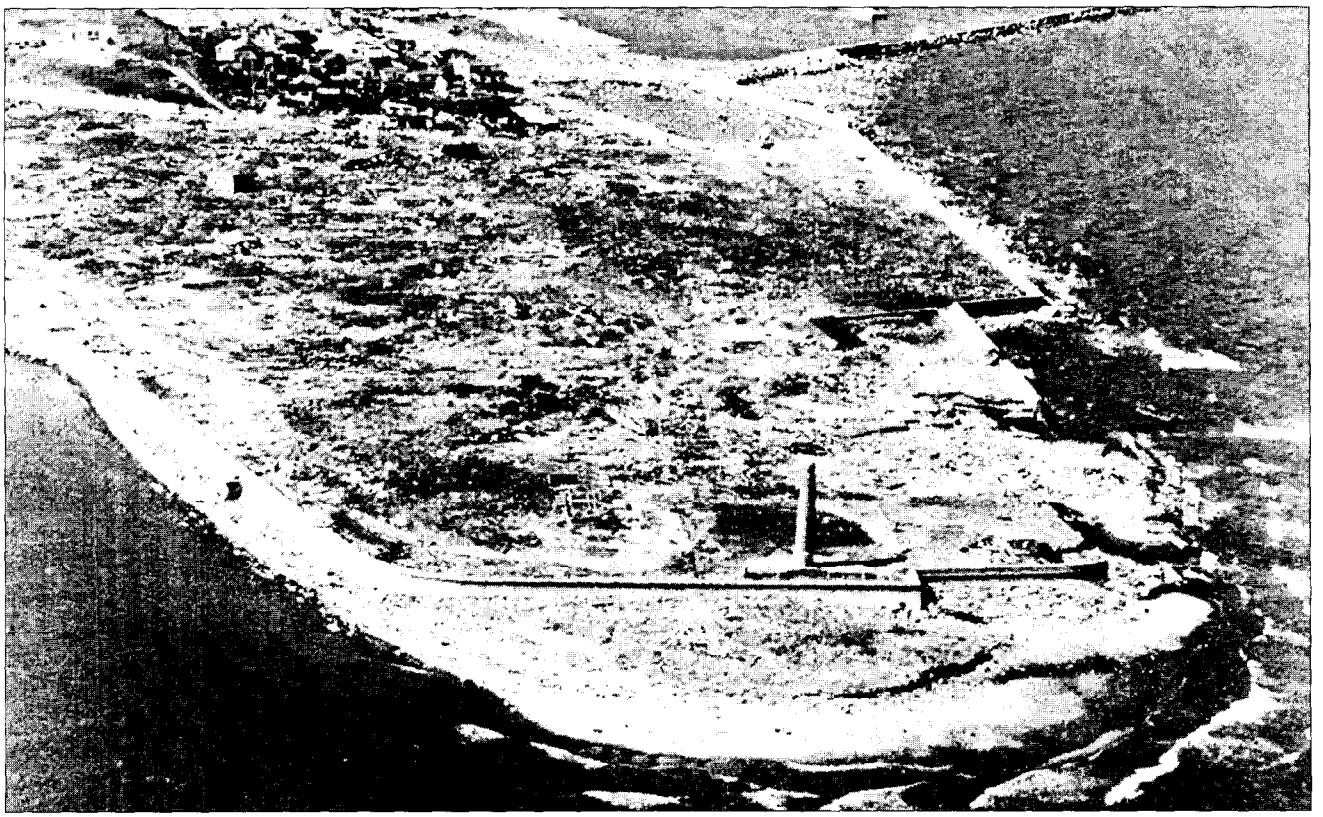
Centro Internacional de Información sobre los Tsunamis

PTWC

Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico

LOS TSUNAMIS Y LOS RIESGOS CONEXOS

Existen decenas de miles de kilómetros de litoral en la región del Pacífico, que forman parte de por lo menos 23 países ribereños y 21 Estados insulares. Estas zonas se están desarrollando a un ritmo cada vez más rápido con la expansión de las instalaciones portuarias e industriales en numerosas localidades, y aumentos de la densidad de población en casi todas partes. Este crecimiento tanto demográfico como de las infraestructuras expone a más personas y a sus hogares, a los edificios y a los sistemas de transporte a las arremetidas de los tsunamis. Desde 1992 los tsunamis locales más importantes se han cobrado más de 4.200 vidas y han causado centenares de millones de dólares de daños materiales. Actualmente, un tsunami que afectara al Pacífico, de magnitud similar al de mayo de 1960 generado frente a las costas de Chile, podría indudablemente tener consecuencias catastróficas.



Destrucción masiva en la ciudad de Aonae en la Isla de Okushiri (Japón) causada por el tsunami regional del 12 de julio de 1993.

Tsunamis locales y regionales

Los tsunamis más destructores se pueden clasificar en la categoría de locales o regionales, cuyos efectos devastadores se circunscriben a las costas a 100 km o como máximo a 1.000 km, respectivamente, del fenómeno que los genera – generalmente un seísmo. Por consiguiente, la mayoría de las pérdidas humanas y los daños materiales relacionados con tsunamis también se deben a tsunamis locales. Entre 1975 y 1988 han habido por lo menos 18 en el Pacífico y sus mares adyacentes, que produjeron un número importante de víctimas y/o daños materiales.

Por ejemplo, un tsunami regional que se produjo en 1983 en el Mar del Japón o Mar Oriental dañó gravemente las zonas costeras de Japón, Corea y Rusia, causando más de 800 millones de dólares de daños, y más de un centenar de muertes. Luego, tras

nueve años en los que no se registró ningún fenómeno, 11 tsunamis localmente destructores tuvieron lugar en un periodo de apenas siete años, entre 1992 y 1998, ocasionando más de 4.200 víctimas y centenares de millones de dólares de daños materiales.

En la mayoría de estos casos los esfuerzos realizados en esa época para atenuar los tsunamis no permitieron impedir importantes daños y numerosas víctimas. No obstante, las pérdidas que podrían causar tsunamis locales o regionales en el futuro se pueden reducir si se establecen una red más densa de centros de alerta, centros de acopio de datos sísmicos y relativos al nivel del agua y mejores comunicaciones a fin de dar la alerta a tiempo, y si se organizan programas más adecuados de preparación a los tsunamis y educación al respecto.

Tsunamis destructores de origen local o regional desde 1975

Fecha	*Localización del epicentro*	*Costo estimado en vidas*
29 nov 1975	Hawai, EE.UU.	2
17 ago 1976	Filipinas	8.000*
19 ago 1977	Indonesia	189
18 jul 1979	Indonesia	540
12 sep 1979	Nueva Guinea	100
12 dic 1979	Colombia	500
26 mayo 1983	Mar del Japón	100
2 sep 1992	Nicaragua	168
12 dic 1992	Islas Flores, Indonesia	1.000
12 jul 1993	Isla Okushiri, Japón	230
3 jun 1994	Java, Indonesia	222
4 oct 1994	Isla Shikotan, Rusia	11
14 nov 1994	Filipinas	74
9 oct 1995	Manzanillo, México	1
1 ene 1996	Sulawesi, Indonesia	9
17 feb 1996	Irian Jaya, Indonesia	110
23 feb 1996	Perú	12
17 jul 1998	Papua Nueva Guinea	2.500

* *Esta cifra puede incluir las víctimas causadas por el terremoto.*

Tsunamis que afectan a todo el Pacífico, o de origen lejano

Mucho menos frecuentes pero potencialmente mucho más peligrosos son los tsunamis ***que afectan a todo el Pacífico, o de origen lejano***. Estos se producen cuando la perturbación que genera al tsunami es suficientemente importante. Comenzando generalmente como un tsunami local que causa graves destrucciones cerca del lugar de origen, estas olas siguen desplazándose en toda la cuenca oceánica con suficiente energía para causar nuevas muertes y destrucciones en costas distantes del epicentro en más de 1.000 km. En los 200 últimos años se han producido por lo menos 17 tsunamis destructores de este alcance.

El tsunami destructor más importante que afectó a todo el Pacífico en la historia reciente se originó en un seísmo masivo frente a la costa de Chile el 22 de mayo de 1960. Todas las ciudades costeras chilenas entre los paralelos 36° y 44° fueron destruidas o gravemente dañadas por la acción del tsunami y el terremoto. El tsunami y el seísmo combinados ocasionaron 2.000 muertes y 3.000 heridos, dos millones de personas quedaron sin hogar y se registraron daños por 550 millones de dólares.

Frente a la ciudad costanera de Corral, Chile, se estimó que las olas tenían 20,4 metros de altura. El tsunami causó 61 víctimas en Hawai, 20 en Filipinas y 100 o más en Japón, 24 millones de dólares de daños en Hawai y varios millones más a lo largo de la costa occidental de los Estados Unidos y de Canadá. Las alturas de las olas de origen lejano variaron desde pequeñas oscilaciones en algunas zonas hasta 12,2 metros en la Isla Pitcairn, 10,7 metros en Hilo (Hawai) y 6,1 metros en algunos lugares de Japón.

No se han producido tsunamis destructores importantes a escala del Pacífico desde la creación del ITSU y del TWSP, y desde que el PTWC comenzó a funcionar como centro de alerta internacional para estos tipos de fenómenos. Pero es preciso seguir realizando esfuerzos constantes para mejorar todos los elementos del sistema de alerta a fin de reducir al mínimo los daños materiales y garantizar la seguridad de los habitantes de las costas del Pacífico cuando inevitablemente se produzca el próximo.

Destrucción sobre el litoral de Hilo (Hawai) causada por un tsunami que atravesó el Pacífico, generado frente a la costa de la Isla Unimak, Alaska (Estados Unidos de América) el 1° de abril de 1946.

Características de los fenómenos de tsunamis

Un tsunami es un sistema de ondas gravitacionales oceánicas formadas a raíz de una importante perturbación del mar de una duración relativamente breve. En el proceso en que el agua de mar vuelve por la fuerza de la gravedad a una posición de equilibrio, se produce una serie de oscilaciones tanto por encima como por debajo del nivel del mar, y se generan olas que se propagan a partir de la región de origen. La mayoría de los tsunamis se originan en seísmos, con un desplazamiento vertical de la columna de agua generalmente causado por un movimiento tectónico vertical del suelo marino a lo largo de una zona de fractura en la corteza terrestre que se halla debajo del fondo oceánico o en sus márgenes. En el caso de los terremotos tsunamigénicos más importantes, una superficie de 100.000 km^2 o más del fondo del mar se puede desplazar verticalmente a varios metros. Otros mecanismos generadores incluyen las erupciones volcánicas próximas al océano o submarinas, el desplazamiento de sedimentos submarinos, los deslizamientos de tierras costeras que se hunden en el agua, o explosiones de gran magnitud en el océano causadas por el ser humano o por impactos de meteoritos.

El tsunami se propaga a partir de la región de origen en forma de una sucesión de olas. Su velocidad depende de la profundidad del agua y, en consecuencia, las olas se aceleran o se desaceleran al pasar respectivamente sobre un fondo oceánico de profundidad mayor o menor. Debido a este proceso la dirección en que se propaga la ola también cambia, y la energía de la ola puede estar más o menos concentrada. En alta mar las olas de tsunamis pueden desplazarse a velocidades que varían entre 500 y 1.000 km por hora. Cerca de la costa, empero, la velocidad del tsunami disminuye a unos escasos 10 km por hora. La altura de un tsunami también depende de la profundidad del agua: puede tener apenas un metro de altura en alta mar y crecer hasta alcanzar decenas de metros en la costa. A diferencia de lo que sucede con las conocidas olas oceánicas impulsadas por el viento, que son una mera perturbación de la superficie del mar, la energía de la ola del tsunami se extiende hasta el fondo del mar. Cerca de la costa esa energía se concentra en sentido vertical debido a la disminución de la profundidad del agua, y en sentido horizontal a causa de una reducción de la longitud de onda inducida por la desaceleración de la ola.

Los tsunamis tienen periodos (el tiempo correspondiente al ciclo de una ola) que pueden variar de unos pocos minutos a una hora o más.

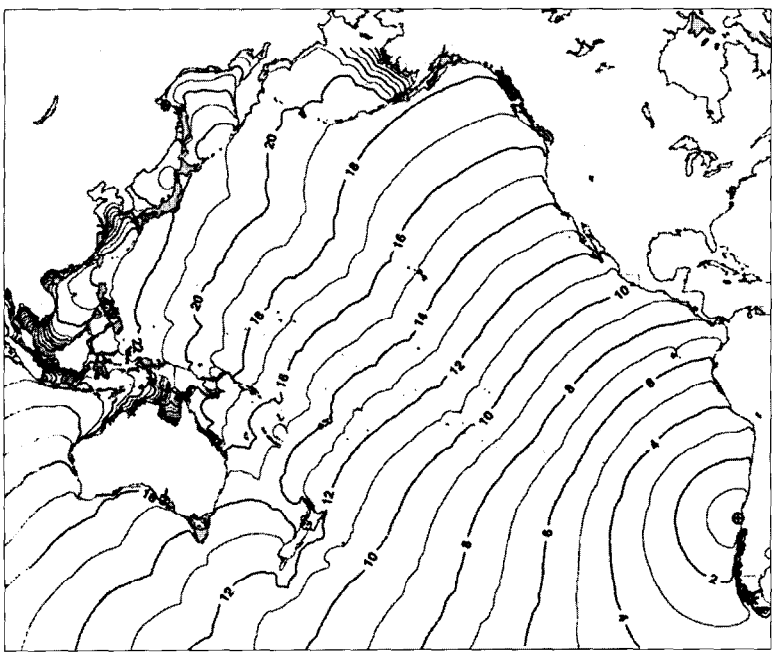
En la costa, un tsunami puede tener una amplia variedad de formas en función de la dimensión y el periodo de las olas, la batimetría de las aguas costeras y la forma del litoral, la situación de la marea y otros factores. En algunos casos un tsunami puede provocar solamente una inundación relativamente benigna de las zonas costeras bajas, que sumerge el litoral de un modo análogo a una marea que sube rápidamente. En otros casos llega a la costa como un macareo –un muro vertical de aguas turbulentas que puede ser muy destructivo. La mayoría de las veces también se produce una disminución del nivel del mar, antes de la llegada del tsunami o entre dos crestas, con lo que la línea de la costa retrocede, a veces en más de un kilómetro. Corrientes oceánicas fuertes e inusuales también pueden acompañar aun a los tsunamis de escasa magnitud.

La destrucción por los tsunamis es el resultado directo de tres factores: inundación, impacto de las olas sobre las construcciones y erosión. Fuertes corrientes inducidas por los tsunamis han erosionado cimientos de puentes y espigones, derribándolos. La fuerza de la inundación y el retroceso de las aguas ha desplazado casas y volcado vagones de ferrocarril. La fuerza de las olas asociadas a los tsunamis ha destruido edificios con armazón y otras construcciones. También causan daños considerables los escombros flotantes, comprendidos botes y automóviles que pueden convertirse en peligrosos proyectiles y estrellarse contra edificios, muelles y otros vehículos. El oleaje causado por tsunamis aun menores ha averiado buques e instalaciones portuarias. Los incendios resultantes de los vertidos o la combustión de hidrocarburos procedentes de buques dañados en el puerto, o de instalaciones de almacenamiento y refinerías de petróleo en la costa pueden ocasionar daños mayores que los que inflige directamente el tsunami. Otros daños secundarios pueden deberse a la contaminación con aguas residuales y productos químicos. Los daños causados a las instalaciones de abastecimiento, evacuación y almacenamiento pueden plantear peligrosos problemas. Es cada vez más preocupante el efecto posible del fenómeno de retirada de las aguas, a raíz del cual, por ejemplo, quedan al descubierto las tomas de agua de refrigeración de las centrales nucleares.

Tsunamis destructores que afectaron a todo el Pacífico desde 1800

Fecha	*Epicentro*	*Costo estimado en vidas*
20 feb 1835	Chile	2
7 nov 1837	Chile	62
13 ago 1868	Chile	25.000*
10 may 1877	Chile	500
15 jun 1896	Sanriku, Japón	22.000
31 ene 1906	Colombia-Ecuador	500
17 ago 1906	Chile	–
7 sep 1918	Islas Kuriles, Rusia	47
11 nov 1922	Chile	100
3 feb 1923	Kamchatka, Rusia	2
2 mar 1933	Sanriku, Japón	3.000
1º abr 1946	Islas Aleutianas (EE.UU.)	179
4 nov 1952	Rusia	–
9 mar 1957	Islas Aleutianas (EE.UU.)	5
22 may 1960	Chile	2.000
28 mar 1964	Alaska (EE.UU.)	112
4 feb 1965	Islas Aleutianas (EE.UU.)	–

** Las cifras pueden incluir las víctimas causadas por el terremoto.*



Tiempo de propagación (en horas) del tsunami del 22 de mayo de 1960, generado frente a las costas de Chile y que atravesó el Pacífico. Este tsunami fue sumamente destructor en las costas vecinas de Chile, y también causó daños materiales importantes y muertes en sitios tan lejanos como Hawai y Japón. La conciencia y la preocupación suscitadas por este tsunami de gran magnitud dio lugar a la constitución del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico y del ITSU.

SITUACIÓN ACTUAL, LIMITACIONES Y ORIENTACIONES FUTURAS

El alcance y las atribuciones del TWSP se siguen ampliando a medida que aumenta el interés por el GIC/ITSU y que éste se desarrolla; de hecho, actualmente cuenta con 25 Estados Miembros. Al haberse producido un número sin precedentes de tsunamis destructores locales en los últimos años, estos fenómenos y el TWSP suscitan un interés mucho mayor en toda la cuenca del Pacífico y otros lugares.

En la sección siguiente se presenta una breve reseña sobre el sistema actual de mitigación de los tsunamis en el Pacífico, las limitaciones de dicho sistema y las orientaciones y tareas necesarias para superarlas. El sistema actual es el fruto de los esfuerzos dedicados, tanto individuales como mancomunados, de los Estados Miembros del ITSU, y del ITSU en su conjunto. Aunque todavía quedan por resolver numerosas deficiencias, se han realizado progresos significativos para mitigar mejor los efectos de los tsunamis en el Pacífico desde que el ITSU fue fundado en 1965.

En un documento titulado "The Compilation of Data and Information for the Preparation of a Master Plan", que se presentó y aprobó en la 9ª reunión del ITSU celebrada en 1984, se esbozaban cinco ámbitos en los que debían centrarse los programas del ITSU y que, en síntesis, eran los siguientes: 1) preparación de material didáctico relacionado con los tsunamis; 2) acopio y recopilación de datos históricos sobre tsunamis y elaboración de técnicas más apropiadas para utilizar los datos históricos y sísmicos y crear modelos a fin de emitir alertas y predecir el alcance máximo de las aguas en la fase de inundación tierra adentro; 3) establecimiento de vías de comunicación más adecuadas para transmitir datos en tiempo real y difundir las alertas; 4) mejoramiento de los equipos y técnicas para el acopio y tratamiento de datos sísmicos y sobre el nivel del mar, creación de nuevas estaciones de acopio de datos, donde sean necesarias, y suministro de capacitación en materia de instalación y mantenimiento de equipos y estaciones; y 5) mejoramiento de los centros existentes de alerta contra los tsunamis y establecimiento de nuevos centros en los lugares en que sea necesario, junto con la transferencia de tecnología, la formación y la documentación correspondientes. Estos ámbitos de trabajo siguen vigentes y se estudian a continuación en el contexto del modelo conceptual de un plan de mitigación de los tsunamis.

A fin de mitigar los riesgos de tsunami, o de cualquier riesgo natural que se desencadena rápidamente, es fundamental evaluar con precisión el carácter de la amenaza que plantea el riesgo, diseñar y aplicar una técnica de alerta y preparar a las zonas en peligro para que tomen las medidas adecuadas con miras a limitar las consecuencias del riesgo. Estas tres medidas esenciales, a saber, 1) **evaluación de los riesgos**, 2) **alerta** y 3) **preparación**, constituyen los elementos principales del modelo de mitigación. Se pueden utilizar para determinar, organizar y clasificar la mayoría de las actividades necesarias a fin de atenuar de manera eficaz los efectos inevitables de los tsunamis. Otro elemento clave es la **investigación** relacionada con los tsunamis, que no es parte integrante de la mitigación pero apoya sus actividades.

Evaluación de los riesgos

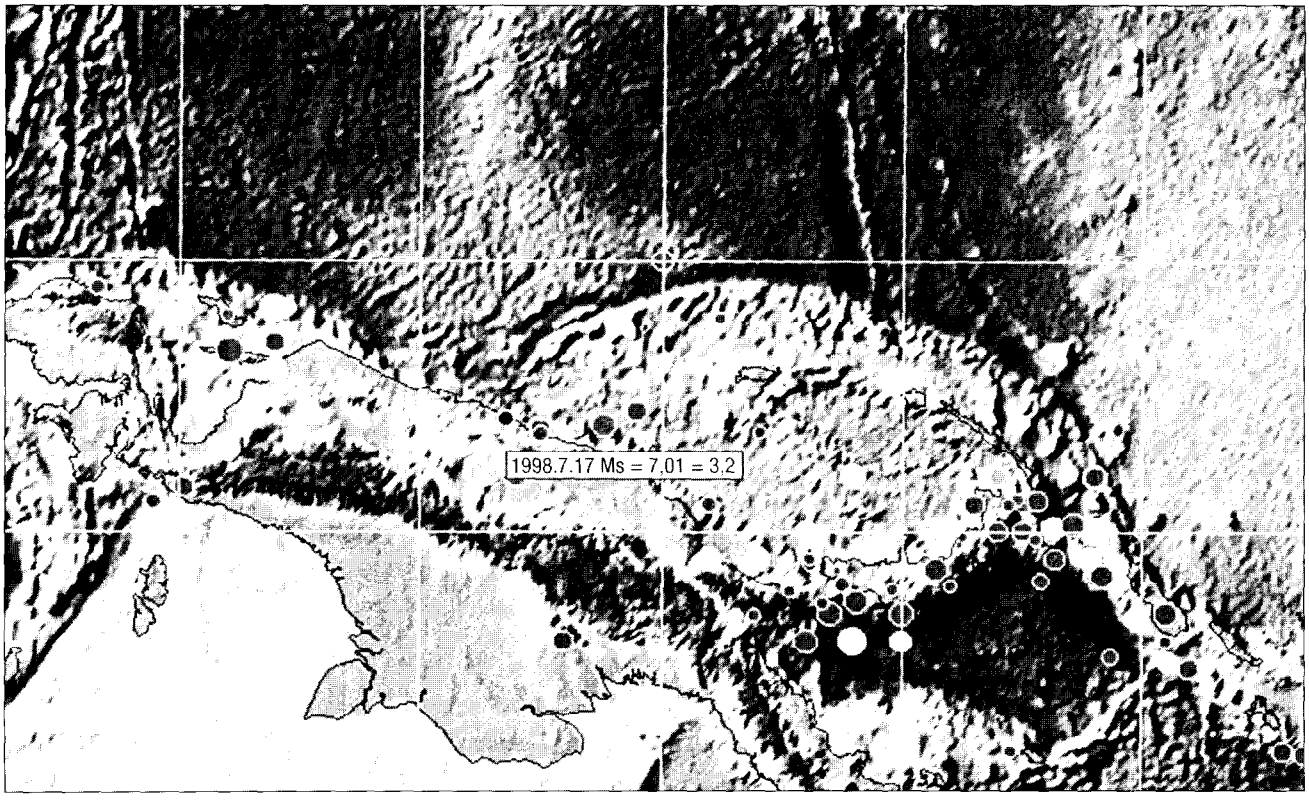
El primer elemento de una mitigación eficaz es la evaluación de los riesgos. En cada comunidad costera es necesario evaluar los riesgos de tsunami para localizar los grupos de población y los bienes que corren peligro, y la importancia de dicho peligro. Para realizar esta evaluación es preciso conocer las zonas en que es probable que se generen tsunamis, las posibilidades de que éstos se produzcan y las características de los tsunamis procedentes de esas zonas en distintos lugares de la costa. En algunas comunidades, los datos sobre tsunamis anteriores pueden contribuir a cuantificar estos factores. Sin embargo, en la mayoría de ellas los datos sobre el pasado son escasos o inexistentes. En estas costas, los modelos numéricos de inundaciones provocadas por tsunamis pueden aportar estimaciones sobre las zonas que se inundarían si se produjera un seísmo tsunamigénico de origen cercano o lejano. Los resultados de la evaluación de los riesgos también son fundamentales a la hora de impulsar y diseñar los otros dos elementos de la mitigación, es decir, la alerta y la preparación.

Datos históricos sobre tsunamis

Los datos históricos existentes se encuentran en numerosos lugares y revisten distintas formas, entre otras, los catálogos publicados y manuscritos de casos de tsunamis, los informes de investigación sobre el terreno, los relatos de experiencias personales, las reseñas de los diarios y las películas o vídeos. El Centro Internacional

de Información sobre los Tsunamis de Honolulú, Hawai, posee una de las mayores colecciones de este tipo. El Centro Mundial de Datos – A (WDC-A), que comparte locales con el Centro Nacional de Datos Geofísicos de Estados Unidos de Boulder, Colorado, también mantiene otra colección importante. Se les pueden encargar catálogos de tsunamis que han afectado a los Estados Unidos, México, Perú, Chile y otros lugares del Pacífico, y cuentan con una base de datos sobre tsunamis que se han producido en todo el mundo, un mapa mural en color de tsunamis, una selección de registros de mareómetros que se han utilizado a lo largo del tiempo y tres conjuntos de diapositivas de tsunamis. Distintas universidades y organizaciones gubernamentales conservan otros datos históricos sobre tsunamis. Varios Estados Miembros, entre los que se incluyen Australia, Chile, México, Ecuador, Japón y la Federación de Rusia también han compilado catálogos de tsunamis para su propio litoral y/o las costas cercanas. Con el aliento y el apoyo parcial del ITSU, la Federación de Rusia ha elaborado un programa para microcomputadoras denominado Base Experta de Datos sobre Tsunamis (ETDB) que permite consultar y examinar con rapidez los datos históricos sobre tsunamis en una amplia gama de formatos gráficos útiles. La Comisión de la IUGG sobre Tsunamis también ha estado trabajando en el diseño de un formato generalizado de base de datos sobre tsunamis a fin de que los Estados Miembros puedan presentar sus datos históricos en esta forma al ITIC o al WDC-A. Asimismo, la Comisión sobre Tsunamis está contemplando la posibilidad de organizar de manera más eficaz los datos históricos y de otro tipo relativos a los tsunamis y de facilitar su uso mediante un Centro de Datos Virtual consultable en la World Wide Web, con enlaces a otras

Los datos históricos de numerosas zonas del Pacífico son incompletos y difíciles de obtener, y su forma resulta poco adaptada para la evaluación de los riesgos. Es necesario acopiar y compilar datos históricos sistemáticamente, en particular respecto de aquellas zonas sobre las que no existe suficiente información en los catálogos actuales. Todos los datos históricos y los parámetros correspondientes se han de compilar de manera conjunta en una base de datos común. Asimismo, se requieren métodos más apropiados para consultar y examinar estos datos de modo provechoso. Entre ellos figura la creación de bases de datos electrónicas y las correspondientes interfaces gráficas para el usuario que se pueden difundir por medios electrónicos o a través de la World Wide Web.



Epicentros de seísmos tsunamigénicos que se han producido en la región de Nueva Guinea y las Islas Salomón. La figura se creó utilizando el programa gráfico "Base de datos históricos sobre tsunamis en la región del Pacífico, 47a. de C. - 1999d. de C." preparado por el Laboratorio de Tsunamis de la Academia Rusa de Ciencias.

organizaciones de todo el mundo que acopian y conservan esos datos.

Datos sobre paleotsunamis

Recientemente, en algunas regiones del Pacífico se han realizado investigaciones sobre los paleotsunamis, es decir, los fenómenos acaecidos antes de que se efectuaran los primeros registros de tsunamis. Esta labor se basa fundamentalmente en el acopio y análisis de sedimentos de tsunamis hallados en zonas costeras y en otros indicios relacionados con el levantamiento o el hundimiento causados por seísmos producidos en lugares cercanos. En un caso, los resultados de la investigación suscitaron una nueva preocupación al evidenciar que en el futuro se podrían producir grandes seísmos y tsunamis a lo largo de la costa noroccidental de América del Norte. En otro caso, el registro de tsunamis de la región de las islas Kuriles-Kamchatka se está extendiendo en mucha mayor medida hacia el pasado. A medida que prosigan las actividades en este campo, se podrá ofrecer un volumen significativo de información inédita sobre tsunamis anteriores que facilitará la evaluación de los riesgos asociados a estos fenómenos.

En relación con la mayoría de las costas del Pacífico existen registros que sólo abarcan algunos tsunamis, en el mejor de los casos. Las investigaciones sobre los paleotsunamis ofrecen la posibilidad de adquirir nuevos conocimientos sobre tsunamis significativos que se remontan muy lejos en el tiempo. Estos conocimientos pueden constituir una ayuda muy valiosa a la hora de evaluar los riesgos de tsunamis. Se alienta a los Estados Miembros del ITSU a apoyar los proyectos de investigación en este ámbito.

Estudios posteriores a los tsunamis

Durante los últimos años, después de cada tsunami destructivo importante se ha organizado un estudio sobre el terreno para efectuar mediciones del alcance máximo de las aguas tierra adentro y de los límites de las inundaciones y acopiar datos conexos de testigos presenciales, como el número de olas, su hora de llegada y la identificación de la ola de mayor tamaño. En general los estudios han sido organizados de manera ocasional por académicos que investigan sobre los tsunamis, y los participantes solían provenir de varios Estados Miembros del ITSU. A pesar de que el ITSU ha alentado la creación de equipos internacionales de expertos en distintas disciplinas relacionadas con los tsunamis para que realicen estudios bajo los auspicios de la COI, todavía no se ha establecido ninguno. El ITSU ha preparado una guía sobre los estudios consecutivos a los tsunamis a fin de contribuir a la preparación de los estudios, determinar las mediciones y observaciones que deberían realizarse y normalizar métodos de acopio de datos en aras de una mayor coherencia y precisión.

Los tsunamis son fenómenos relativamente poco frecuentes y la mayoría de sus indicios son efímeros. Por consiguiente, es esencial organizar estudios sobre el terreno y realizarlos con rapidez y minuciosidad después de que se produzca cada tsunami a fin de acopiar datos detallados valiosos para la evaluación de riesgos, la validación de modelos y otros aspectos de la mitigación de los tsunamis. El ITSU debería seguir prestando apoyo a la creación de equipos internacionales de expertos, bajo los auspicios de la COI u otras organizaciones, aportando recursos técnicos y financieros para llevar a cabo estudios posteriores a los tsunamis. Se alienta a los Estados Miembros a contribuir al Fondo Fiduciario de la COI con miras a prestar el apoyo preliminar que requieren dichos estudios y a facilitar también los procedimientos y medios logísticos necesarios para que los equipos puedan actuar sobre el terreno con rapidez. La guía sobre los estudios consecutivos a los tsunamis se deberá actualizar en la medida necesaria, editar y difundir ampliamente para contribuir a los estudios realizados por la COI y/u otros grupos.

Modelos numéricos

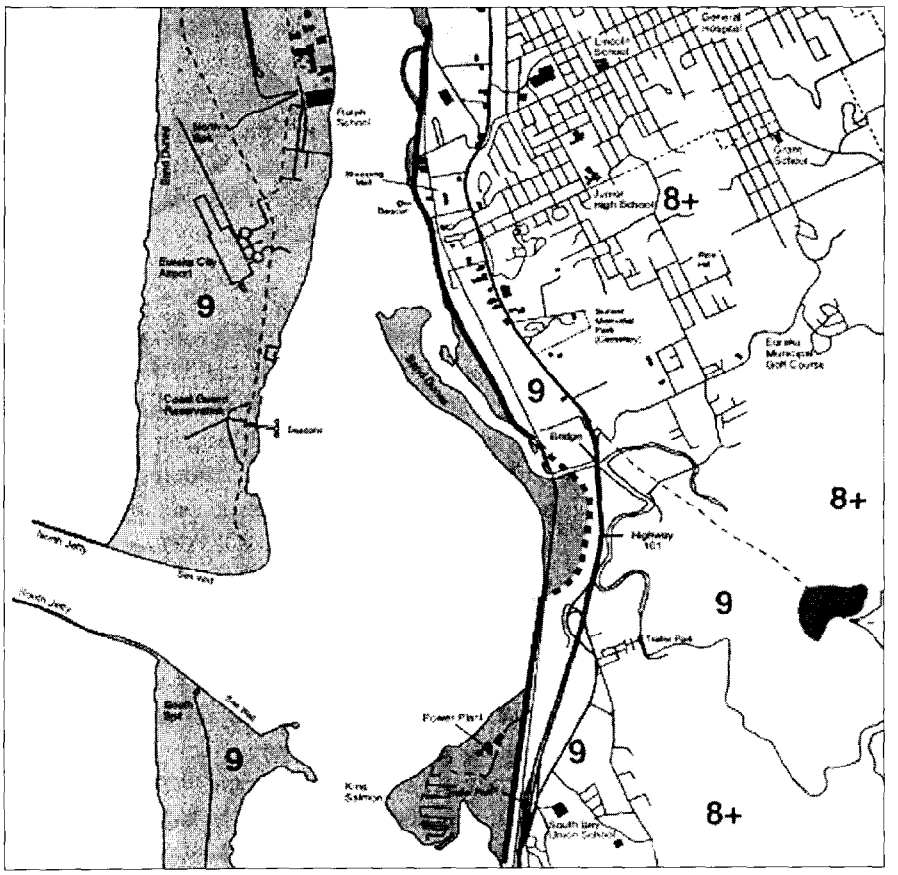
A menudo, la única manera de determinar el alcance máximo de las inundaciones potenciales de un tsunami local o de origen lejano consiste en utilizar modelos numéricos, ya que los datos sobre los tsunamis anteriores suelen ser insuficientes. Los modelos se pueden basar en las hipótesis más pesimistas posibles con respecto al origen de los tsunamis o a las olas que llegan a las costas a fin de determinar las hipótesis más pesimistas de subida de las aguas e inundaciones correspondientes. Los modelos también se pueden elaborar partiendo de seísmos menos importantes para determinar la gravedad del riesgo en el caso de los fenómenos menos extremos aunque más frecuentes. Esta información constituye la base para elaborar mapas y procedimientos de evacuación en caso de tsunami. Actualmente, sólo se han preparado modelos de este tipo para una pequeña parte de las zonas costeras amenazadas. Las técnicas de creación de modelos suficientemente precisos han aparecido recientemente, y estos modelos

requieren una capacitación que permita entenderlos y utilizarlos correctamente, así como la aportación de datos batimétricos y topográficos detallados sobre la zona a la que se aplica el modelo.

A fin de resolver este problema, el ITSU ha prestado apoyo al Proyecto de Intercambio de Modelos de Inundaciones provocadas por Tsunamis (TIME), mediante el cual se ha transferido un modelo numérico de inundación preparado por el Profesor Shuto de Japón a México, los Estados Unidos, Corea, Turquía, Canadá, Grecia, Colombia, Australia, Italia, Indonesia, Ecuador, Costa Rica y Chile. Y, lo que es más importante, el proyecto también proporciona formación en la utilización del modelo. Hoy día, muchos países del ITSU, comprendidos Chile, México, Francia, Japón y los Estados Unidos, poseen programas bien asentados para elaborar sistemáticamente modelos de inundaciones potenciales provocadas por tsunamis en sus zonas costeras vulnerables.

Los datos históricos relativos a la mayoría de las costas del Pacífico son muy limitados. Por consiguiente, los modelos numéricos constituyen el único medio para estimar el peligro potencial de tsunami en esas zonas. Actualmente, existen técnicas para llevar a cabo esta evaluación. Es preciso proporcionar los programas informáticos y los cursos de capacitación necesarios para elaborar estos modelos a todos los países del Pacífico que corren peligro mediante iniciativas como el Proyecto de Intercambio de Modelos de Inundaciones provocadas por Tsunamis. Se alienta a los Estados Miembros a que preparen sus propios programas nacionales para llevar a cabo estimaciones sobre el alcance máximo de las aguas de los tsunamis tierra adentro y las inundaciones consiguientes.

Eureka, California



Inundaciones provocadas por tsunamis

Licuefacción

Deslizamiento de tierras

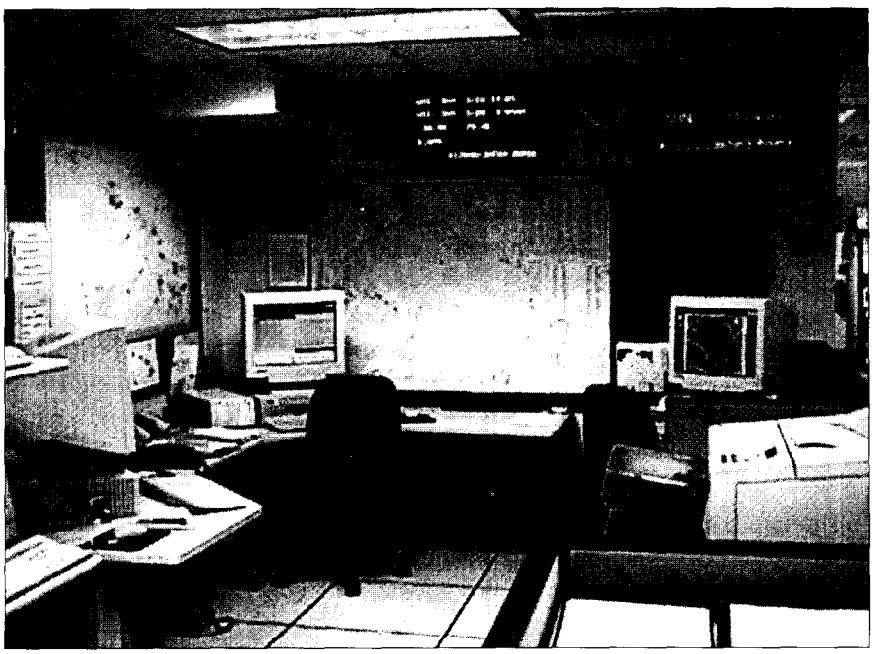
Inundación y licuefacción provocadas por los tsunamis

8+, 9 Intensidad en la escala de Mercalli modificada

Viviendas arrancadas de los cimientos, derrumbe parcial de construcciones de albañilería, vuelco de muebles pesados y aparatos de gran tamaño.

Mapa de la zona costera de Eureka, California, que presenta las inundaciones probables determinadas gracias a un modelo numérico para el caso de un tsunami de origen cercano. El mapa comprende igualmente los efectos potenciales de los terremotos, en particular, la licuefacción y los deslizamientos de tierras, que deberán tenerse en cuenta a la hora de diseñar las vías de evacuación.

El segundo elemento clave para mitigar los efectos de los tsunamis de manera eficaz es un sistema de alarma adecuado que permita avisar a la población de las zonas costeras de que existe un peligro inminente de tsunami. Los sistemas de alerta se fundan en datos sísmicos para dar una alerta inicial rápida, y en datos sobre el nivel del mar para confirmar y vigilar el tsunami o anular la alerta. Los sistemas de alerta recurren igualmente a distintas vías de comunicación para recibir datos sísmicos y sobre el nivel del mar y enviar mensajes a las autoridades competentes. Los centros de alerta tratan de ser: 1) rápidos – dan la alerta lo antes posible en cuanto surge la posibilidad de un tsunami, 2) precisos – emiten alarmas sobre todos los tsunamis destructores y reducen al mínimo las falsas alarmas y 3) fiables – aseguran que funcionan continuamente y que sus mensajes se envían y reciben rápidamente y son entendidos por los usuarios del sistema.



Sala de operaciones del Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico de Ewa Beach, Hawai.

Sistemas y centros de alerta

Los sistemas de alerta contra los tsunamis en el Pacífico se pueden clasificar en función de dos factores conexos: 1) el tipo de tsunami sobre el que están en condiciones de dar la alerta (desde los locales hasta los de origen lejano) y 2) la zona de responsabilidad a la que alertan según los distintos tipos de tsunamis (subnacional, nacional, regional o internacional). **El sistema para todo el Pacífico** que dirige el PTWC emite, entre aproximadamente media hora y una hora después de que se produzca el seísmo, una alarma internacional que llega a las comunidades situadas a más de varios cientos de kilómetros de la región de origen. Los **sistemas regionales**, como los que emplean los Estados Unidos, Japón, la Federación de Rusia, Francia y Chile, difunden esencialmente alertas nacionales aproximadamente durante los diez a quince minutos posteriores al seísmo y están destinadas a las comunidades situadas a cien kilómetros como mínimo de la región de origen. Los sistemas locales establecidos por Japón y Chile pueden emitir una alarma en cinco minutos como máximo para aportar alguna protección a las comunidades que se encuentran a menos de cien kilómetros de distancia del epicentro. Tan importante como emitir las alertas es anularlas con rapidez cuando se observa que no existen olas de tamaño considerable, y difundir mensajes informativos sobre seísmos de gran magnitud aunque, en principio, no sean tsunamigénicos.

Entre los centros que utilizan los sistemas de alerta contra los tsunamis figuran los siguientes: el Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico en Ewa Beach, Hawai, Estados Unidos; el Centro de Alerta contra los Tsunamis de Alaska y la Costa Occidental en Palmer, Alaska, Estados Unidos; los centros de alerta contra los tsunamis de la Federación de Rusia en Petropavlovsk-Kamchatskii, Kurilskie y Sajalinsk; los centros de alerta contra los tsunamis del Japón en Sapporo, Sendai, Tokio, Osaka, Fukuoka y Naha; el Centro de Alerta contra los Tsunamis de la Polinesia Francesa en Papeete, Tahití, y el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos Chile, con sede en Valparaíso.

Además, recientemente otros Estados Miembros han creado o mejorado sus instrumentos y servicios de análisis relacionados con los seísmos y/o el nivel del mar como base para los sistemas nacionales de alerta contra los tsunamis.

El Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico

En 1948, el Observatorio Sismológico de Ewa Beach, situado cerca de Honolulú, puso en funcionamiento el

Sistema de Alerta contra los Tsunamis con miras a advertir a las comunidades de las zonas costeras estadounidenses del Pacífico de los tsunamis inminentes, como el que dos años antes se había generado en las islas Aleutianas y había sorprendido a Hawai con consecuencias catastróficas. En 1966, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental aceptó la propuesta de los Estados Unidos de fortalecer esos servicios mediante el establecimiento con carácter permanente del Centro Internacional de Información sobre los Tsunamis. Poco después, el Observatorio pasó a denominarse Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico (PTWC) y se convirtió en el centro operativo del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico. A este respecto, su función principal consistía y sigue consistiendo en difundir alertas oportunas (por lo general en un plazo de 30 minutos aproximadamente) sobre todos los seísmos tsunamigénicos que se produzcan en la cuenca del Pacífico a todos los participantes internacionales que hayan designado una organización de gestión de situaciones de emergencia competente para recibir el mensaje. En 1970, el PTWC se convirtió en el centro de alerta contra los tsunamis locales generados en el Estado de Hawai y se encargó de emitir alertas en un plazo de quince minutos sobre los seísmos acaecidos cerca de la costa de Hawai en alta mar, cuya magnitud fuera de 6,8 como mínimo. Hawai ha tenido tsunamis destructores generados en el ámbito local por seísmos relacionados con su actividad volcánica.

Por consiguiente, el PTWC, administrado por el Servicio Meteorológico Nacional de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA/NWS), tiene tres funciones distintas: 1) es el centro internacional que alerta a la mayoría de los países del Pacífico sobre los tsunamis de origen lejano; 2) se trata del centro nacional que advierte a todos los territorios estadounidenses del Pacífico, con excepción de los Estados de Alaska, Washington, Oregón y California, de los tsunamis de origen lejano; y 3) es el centro regional de Hawai que alerta con rapidez al Estado de Hawai sobre los tsunamis locales. Para llevar a cabo estas tareas dispone 24 horas al día de instalaciones adecuadas de comunicaciones e informática y de un grupo de geofísicos. El Centro utiliza su propia red de sensores sísmicos telemétricos y de instrumentos de medición del nivel del mar situados en Hawai y en otros lugares del Pacífico, así como distintos datos sísmicos y mareográficos difundidos ampliamente por el Centro de Alerta contra los Tsunamis de Alaska y la Costa Occidental, otros organismos nacionales y el Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico.

La guía del usuario sobre las actividades del PTWC es el Plan de Comunicaciones del Sistema de Alerta contra los Tsunamis, 12ª edición, que se publicó en julio de 1996 y se ha ido actualizando en la medida necesaria. En él se facilita información básica sobre los tsunamis, información general sobre el Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico, definiciones clave, información sobre las estaciones mareográficas y sismográficas, los requisitos en materia de comunicaciones y los métodos de comunicación aplicables a cada país y tipos, criterios y formatos de mensajes.

El Centro de Alerta contra los Tsunamis de Alaska y la Costa Occidental

Este sistema de alerta empezó a funcionar en 1968. Denominado en un principio Centro de Alerta contra los Tsunamis de Alaska, recientemente pasó a llamarse Centro de Alerta contra los Tsunamis de Alaska y la Costa Occidental (WC/ATWC) para reflejar con más precisión su ámbito de competencia, que abarca los Estados de Washington, Oregón y California, así como las costas del Pacífico de Canadá. Su explotación también corre a cargo del NOAA/NWS de los Estados Unidos. El WC/ATWC emite, en un plazo de 15 minutos a partir de la hora de inicio del seísmo, alertas sobre los tsunamis generados frente a la costa de Alaska o a la costa occidental de América del Norte hasta la frontera de California con México. El Centro advierte igualmente a su zona de responsabilidad de los tsunamis que

Instalaciones del Centro de Alerta contra los Tsunamis de Alaska y la Costa Occidental situado en Palmer, Alaska.

afectan a todo el Pacífico, en coordinación con el PTWC. El Centro utiliza su propia red de sensores sísmicos telemétricos e instrumentos de medición del nivel del mar situados en Alaska, y otros datos sísmicos y mareográficos ampliamente difundidos por el PTWC, otros organismos nacionales y el Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico.

Los centros de alerta contra los Tsunamis del Japón

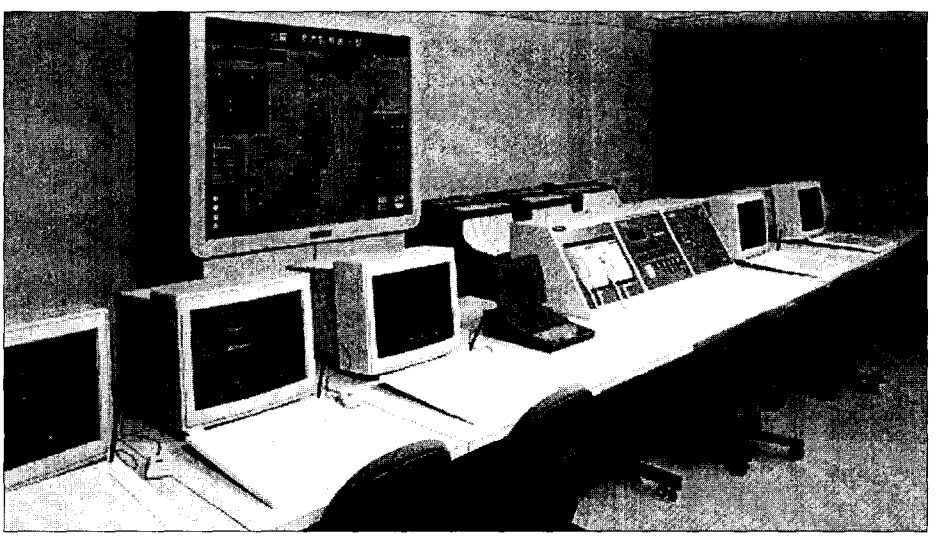
El Servicio de Alerta contra los Tsunamis del Japón fue creado en 1952 y depende del Organismo Meteorológico del Japón (JMA). Actualmente existen en Japón seis centros regionales encargados de prestar servicios de alerta contra los tsunamis, que se encuentran en Sapporo, Sendai, Tokio, Osaka, Fukuoka y Naha (Okinawa). Estos centros difunden alertas contra los tsunamis en sus respectivas zonas de responsabilidad.

Las señales procedentes de las estaciones sismográficas y mareográficas de todo el Japón se vigilan constantemente mediante un sistema automático complejo denominado Sistema de Observación de Seísmos y Tsunamis (ETOS). Poco después de que el ETOS detecte un seísmo, se evalúan automáticamente las horas de llegada y la amplitud máxima de las ondas P, que un operador corrige de manera interactiva, cuando procede. Sobre la base de estas mediciones se determina la zona de origen y la magnitud del seísmo. Si es necesario, en función de los parámetros del seísmo se podrán emitir alertas o avisos sobre tsunamis. Estos mensajes contendrán información sobre la dimensión del tsunami que se espera ("atención tsunami" = tsunami de poca importancia, "se espera tsunami" = tsunamis de hasta 2 m y "se espera gran tsunami" = más de 3 m en las zonas más amenazadas), las zonas que, según las previsiones, resultarán afectadas (la costa del Japón se divide en 18 regiones para la previsión de los tsunamis) y las horas estimadas de llegada. Los mensajes se envían a las organizaciones encargadas de mitigar catástrofes, a los medios de comunicación y a otros organismos.

El JMA utiliza cerca de 180 estaciones sismográficas y unas 80 estaciones mareográficas. Para vigilar los tsunamis, además de los sensores de tensión, se colocan mareógrafos con detectores ultrasónicos encima de la superficie marina en los puertos a fin de medir los tsunamis de gran intensidad y también sobre el muelle del puerto para observar el alcance máximo de las aguas tierra adentro. En los mareógrafos de presión y de tipo ultrasónico, los transmisores de datos se instalan en lugares más elevados a fin de evitar que sean inundados cuando se produzca un fenómeno.

Tras la destrucción provocada en 1993 por el seísmo y tsunami del sudoeste de Hokkaido, el JMA reconstruyó su red sísmica y adoptó métodos para determinar la magnitud de los seísmos sobre la base de las ondas sísmicas P. Este cambio permitió evaluar con más rapidez y precisión los parámetros del seísmo con miras a la previsión de los tsunamis. El JMA se propone difundir una alerta de tsunami en un plazo de tres minutos después de que se inicie un seísmo tsunamigénico.

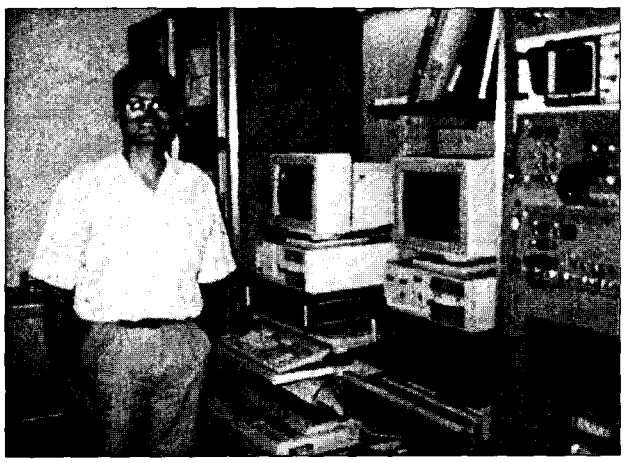
Además, con objeto de reducir el tiempo que necesitan los medios de comunicación para transmitir las alertas de tsunami al público, el JMA y los medios de comunicación han elaborado conjuntamente un sistema que permite sobreimprimir el mensaje de alerta en las pantallas de televisión de los hogares en cuanto lo emite el JMA. Para acortar su tiempo de transmisión, las alertas también se difunden a los municipios mediante el Sistema de Difusión con Destinos Múltiples de Información de Emergencia por Satélite a través del Satélite Meteorológico Geoestacionario (GMS) y este sistema



Sala de control de uno de los seis centros de alerta contra los tsunamis del Japón. Las señales sísmicas se vigilan constantemente y los seísmos se detectan y tratan con un Sistema automático de Observación de Seísmos y Tsunamis.

funciona como complemento de otros sistemas de comunicaciones que utilizan conexiones terrenas.

Igor Kuz'minykh, Enlace Nacional del ITSU de la Federación de Rusia, examina un mapa del tiempo de propagación de un tsunami colgado en una pared que se encuentra detrás de algunos de los equipos de comunicaciones del Centro de Alerta contra los Tsunamis de Petropavlovsk-Kamchatskii.



Dominique Reymond, Director Interino del Centre Polynésien de Prévention des Tsunamis, de pie cerca de TREMORS y otros equipos de vigilancia sísmica del Centro de Papeete, Tahití.

Los centros de alerta contra los Tsunamis de la Federación de Rusia

La Federación de Rusia (ex Unión Soviética) empezó a establecer su sistema de alerta contra los tsunamis tras el terremoto de Kamchatka de 1952, que generó un tsunami en todo el Pacífico. Se crearon tres centros regionales en Petropavlovsk-Kamchatskii, Kurilskie y Sajalinsk que tenían acceso a datos procedentes de distintas estaciones sismográficas y mareográficas. La responsabilidad global de los centros incumbe al Servicio Hidrometeorológico de Rusia, que recibe la asistencia de la Academia Rusa de Ciencias y otras instituciones. Cada centro está plenamente facultado para emitir una alerta en caso de amenaza de tsunami y se informa a las autoridades locales competentes cuando es necesario evacuar a los núcleos de población que podrían resultar afectados. Se utilizan instrumentos especiales para detectar los seísmos cuyas magnitudes son iguales o superiores a 7 a distancias de 150 a 2.000 km de la costa, y para detectar también las olas de tsunamis que éstos podrían provocar. En el proceso de alerta se emplean diagramas del tiempo de propagación de los tsunamis y datos históricos. Las comunicaciones con el resto del Pacífico se efectúan mediante una conexión por cable entre Jabarovsk y Tokio.

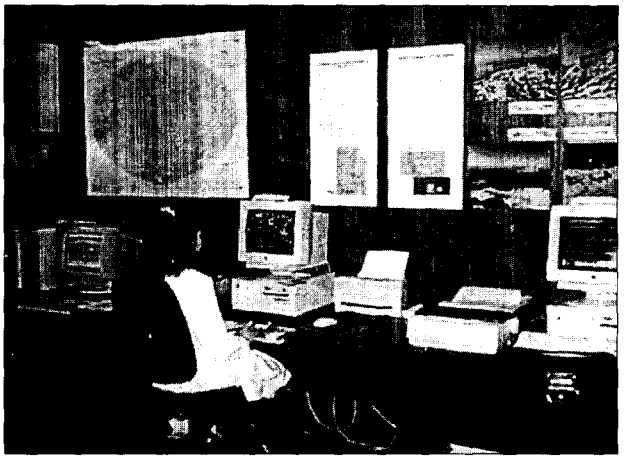
El Centro de Alerta contra los Tsunamis de la Polinesia Francesa (Centre Polynésien de Prévention des Tsunamis – CPPT)

El sistema de la Polinesia Francesa empezó a funcionar en 1965, como consecuencia del tsunami que se generó en Alaska en 1964. El sistema, que se encuentra en Papeete, Tahití, utiliza la información facilitada por ocho estaciones sismográficas de periodo corto, tres estaciones sismográficas de periodo largo y tres mareógrafos explotados por la red "Réseau Sismique Polynésien". Los datos procedentes de cinco de estas estaciones están en comunicación telemétrica con el Centro de Papeete, al igual que los datos suministrados por una estación sismográfica de banda ancha de tres componentes y una estación mareográfica. Asimismo, se recurre a las informaciones proporcionadas por el Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico de Ewa Beach, Hawai. El CPPT emplea un sistema creado por él denominado **TREMORS** (**S**istema de **E**valuación en **T**iempo **R**eal del **P**eligro de los **T**sunamis por el **M**omento **S**ísmico) para detectar y localizar automáticamente un seísmo y calcular a continuación su momento sísmico sobre la base de la magnitud en el manto (Mm) que se funda en las ondas de Rayleigh y Love de periodo largo. El centro difunde alertas contra tsunamis con cinco niveles de peligro basadas principalmente en el momento sísmico del terremoto.

El Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) de Chile

El Sistema de Alarma de Maremotos de Chile, que depende del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), funciona desde el año 1964, y fue fundado a raíz del tsunami que azotó a Chile en mayo de 1960. El Sistema, con sede en Valparaíso, utiliza la información sísmica procedente de 31 estaciones sismográficas de periodo corto que facilita la Red Sísmica Nacional administrada por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, un sistema TREMORS y tres instrumentos de banda ancha de seis componentes (tres acelerógrafos de movimientos fuertes y tres sismógrafos). Asimismo, el sistema recurre a 19 estaciones mareográficas, 7 de las cuales envían sus datos en tiempo real por satélite al SNAM mientras que las demás, equipadas con burbujeadores, remiten la información que se les solicite. El SNAM difunde las alarmas de tsunamis a todas las comunidades costeras a través de los servicios de comunicación de la armada y del sistema de radio de la Oficina Nacional de Emergencias.

La sede del Sistema Nacional de Alarma de Maremotos de Chile (SNAM), dirigido por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), está situada en Valparaíso.



Sala de operaciones del Sistema Nacional de Alarma de Maremotos de Chile (SNAM).

Otros sistemas nacionales de alerta

Australia. En Australia se está estableciendo un sistema de alerta contra los tsunamis en las zonas costeras del Océano Indico y del Pacífico, que administrará la Oficina de Meteorología. Los datos sísmicos serán facilitados por la Australian Geological Survey Organization (AGSO), que está diseñando un prototipo de Sistema de Alerta contra los Tsunamis y los Seísmos. La National Tidal Facility (NTF) se encargará de vigilar las repercusiones de los tsunamis en el nivel del mar y de facilitar servicios de interpretación de los datos.

Colombia. El Observatorio Sismológico del Suroccidente de Colombia (OSSO) está creando un sistema de alerta basado en datos numéricos proporcionados por un sismómetro de banda ancha que se introducen en un sistema de análisis TREMORS. Los resultados se comunicarán a las organizaciones correspondientes a través del INMARSAT. Las magnitudes potenciales se determinarán con ayuda de técnicas de modelos numéricos adquiridas a través del programa TIME.

Nicaragua. El eje central del sistema nacional de alerta contra los tsunamis de Nicaragua está compuesto por 20 sismómetros verticales de periodo corto cuyos datos telemétricos en tiempo real se envían al Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). Por vía telefónica también se puede acceder en tiempo casi real a datos de una estación sismográfica de banda ancha que se halla en Boaco y de una red de acelerógrafos de movimientos fuertes. Asimismo, se está instalando una red de siete estaciones mareográficas numéricas en las costas del Pacífico y del Atlántico y en el lago Managua, cuyos datos se pueden consultar por teléfono. El INETER y el organismo encargado de la defensa civil cooperan en el establecimiento de los enlaces de comunicación y de los procedimientos en caso de alerta contra los tsunamis. También se prevé crear un sistema de sirenas para alertar al público.

Perú. El Sistema Nacional de Alarma del Perú, cuya sede se encuentra en Callao, está a cargo de la Dirección de Hidrografía y Navegación del Perú (DHN). Administra una red de 10 estaciones mareográficas y se envían datos en tiempo real de la estación de Callao a la sede. Asimismo, recientemente Perú ha

adquirido dos sistemas TREMORS a fin de reforzar sus capacidades de alerta. Se avisa al organismo encargado de la protección civil a través de una línea telefónica especial.

República de Corea. Actualmente, la Administración Meteorológica de Corea (KMA) utiliza una red en tiempo real de 8 sismómetros de banda ancha y 12 de periodo corto, y un TREMORS, junto con datos facilitados por algunos de los demás centros de alerta, a fin de vigilar la amenaza de los tsunamis. Se prevé contar con una red de 31 estaciones de banda ancha y periodo corto con un sistema de análisis automatizado. Además, se instalará un sistema de vigilancia del nivel del mar en tiempo real en una isla situada frente a la costa oriental. La difusión de las alertas se realiza a través del sistema público de servicios meteorológicos.

El sistema actual de centros de alerta presenta deficiencias en términos de distribución. El sudeste asiático, el sudoeste del Pacífico y América Central y del Sur carecen de centros regionales de alerta contra los tsunamis, pese a que estas zonas presentan una vulnerabilidad extrema, ya que son colindantes con algunas de las zonas sísmicas más activas y tsunamigénicas, y se han visto afectadas por 14 de los 18 tsunamis locales más destructivos que han azotado la región en los últimos tiempos (véase el cuadro de la página 4). Además, pese a que el PTWC proporciona alertas contra los tsunamis de origen lejano que atraviesan el océano Pacífico, no existen centros similares que alerten contra los tsunamis que afectan a la mayor parte de los mares adyacentes del Pacífico.

Deberían crearse centros regionales de alerta en el sudeste asiático, el sudoeste del Pacífico y América Central y del Sur. En muchas zonas de estas regiones ya se han establecido sistemas rudimentarios. Es posible crear nuevos centros utilizando los recursos disponibles, así como tecnologías y metodologías transferidas de otros centros de alerta. El ITSU puede proporcionar formación al personal operativo a través del ITIC, tarea que también puede encomendarse a los centros de alerta existentes. Se alienta a todos los centros de alerta nacionales a que transmitan de forma oportuna la información esencial sismográfica, mareográfica y relativa a las alertas a los países vecinos que carecen de sistemas de alerta a pesar de ser también víctimas de la amenaza de los tsunamis en una masa de agua común.

No se han establecido centros de alerta contra los tsunamis fuera de la región del Pacífico, pese a que los tsunamis constituyen una amenaza en ambas orillas del Océano Atlántico, en el Este del Océano Indico y en el Mediterráneo, el Caribe y el Mar Negro. Deberían fomentarse los esfuerzos para establecer centros de alerta en estas zonas, y el ITSU debería facilitar información y orientación en base a sus logros y a sus muchos años de experiencia en el Pacífico.

Los centros de alerta han de proseguir sus esfuerzos a fin de reducir el tiempo necesario para emitir las primeras señales de alarma, facilitar evaluaciones lo más detalladas posible y actuar con fiabilidad en todos los aspectos.

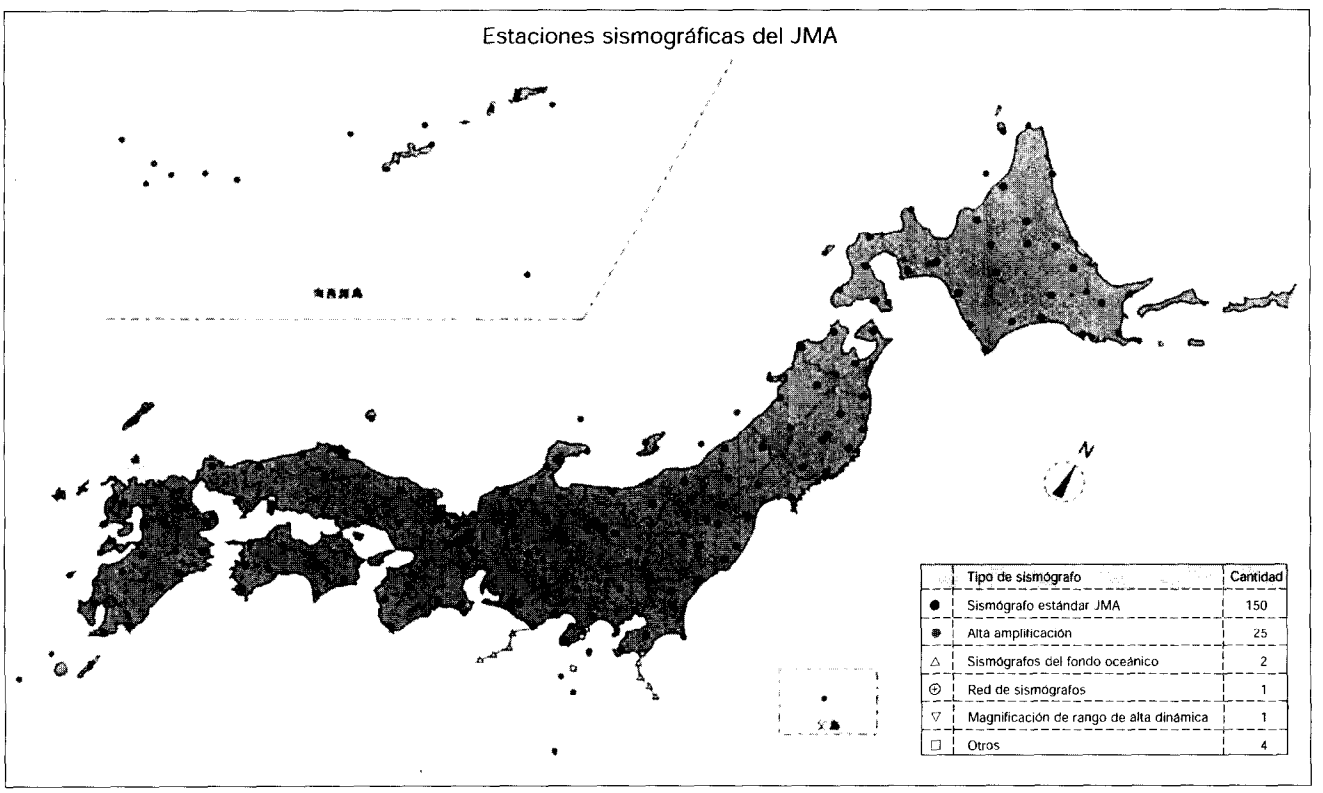
Datos

Los centros de alerta utilizan datos sobre el nivel del mar y los seísmos en tiempo real o casi real, así como datos de carácter histórico sobre los tsunamis y los seísmos, a fin de detectar y localizar con rapidez los seísmos potencialmente tsunamigénicos, confirmar la formación de un tsunami y evaluar sus posibles repercusiones en las zonas costeras de su ámbito de responsabilidad.

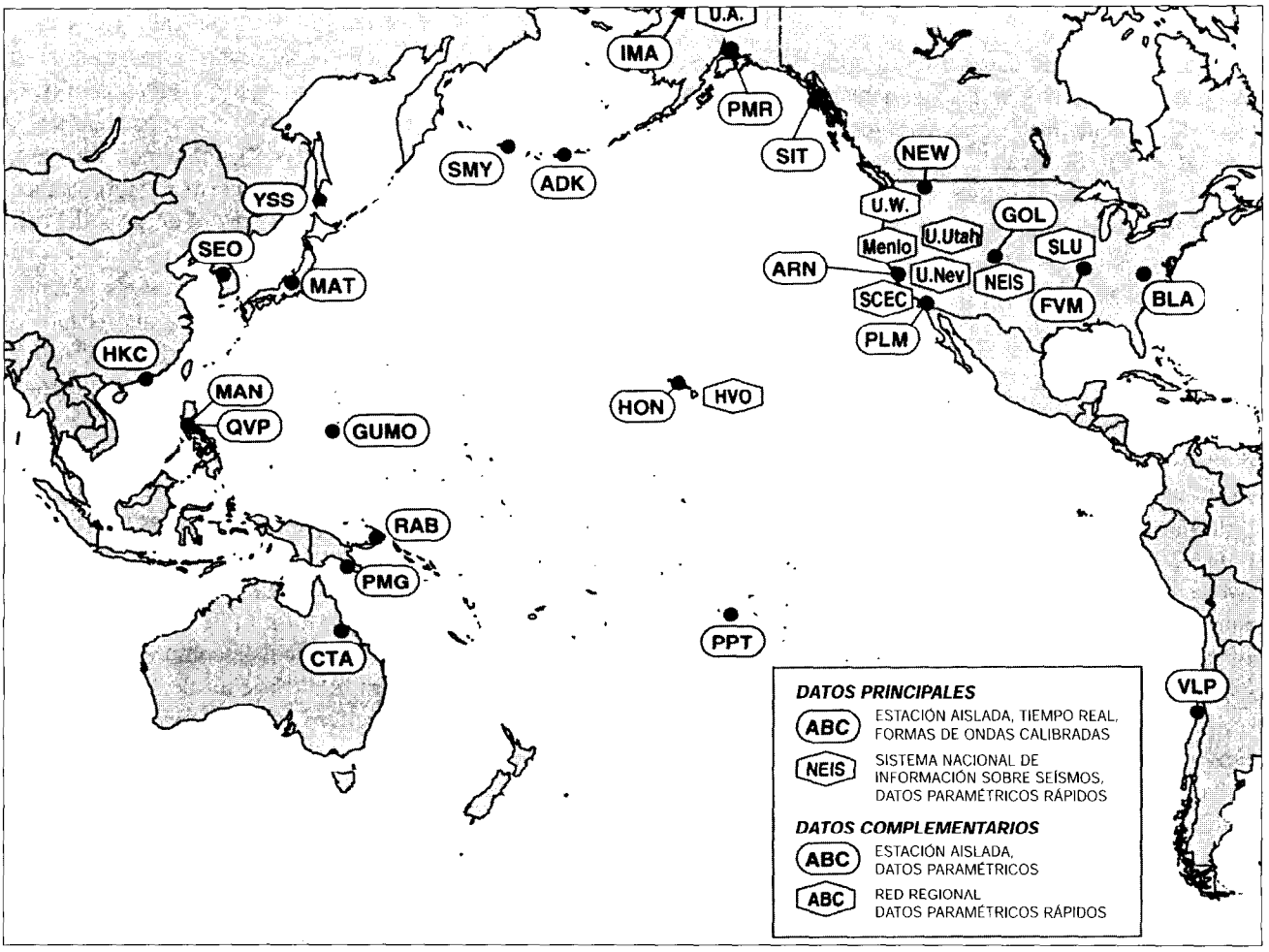
Datos sísmicos

Las señales sísmicas, esto es, las vibraciones de los seísmos que se propagan con rapidez a través de la tierra, son utilizadas por los centros de alerta para detectar la aparición de un seísmo, y a continuación determinar su ubicación e intensidad. En base a esta información, se puede estimar con rapidez la posibilidad de que se haya generado un tsunami y emitir las alertas iniciales o mensajes informativos adecuados. Los sismómetros normalizados de periodo corto (0,5-2 segundos/ciclo) y periodo largo (18-22 segundos/ciclo) facilitan datos para ubicar los seísmos y medir su intensidad. Los datos que aportan los sismómetros más recientes de banda ancha (0,01-100 segundos/ciclo) pueden utilizarse para los dos fines mencionados, así como para calcular el momento sísmico, que constituye un instrumento de medición más apropiado para los casos de seísmos más intensos y potencialmente tsunamigénicos. Los datos sísmicos se envían a los centros en tiempo real o casi real en forma de ondas continuas, ondas pulsantes o datos paramétricos (por ejemplo, la hora de llegada de las ondas P), utilizando una serie de técnicas de comunicación de corto y largo alcance. En ciertos casos, otro observatorio se encarga del procesamiento completo de los datos sísmicos, y sólo se transmiten la ubicación y la magnitud de los seísmos.

Para determinar la ubicación de un seísmo, se precisan datos procedentes de numerosos sensores sísmicos, idealmente distribuidos en una estructura que circunscribe el fenómeno. En lo que concierne a los seísmos de origen cercano, a menudo se utiliza una densa red de estaciones sismográficas, a fin de proceder a una localización rápida y exacta. Asimismo, se pueden obtener localizaciones menos precisas, aunque adecuadas, a partir de una sola estación sismográfica de tres componentes si se utilizan las técnicas de análisis del movimiento de partículas, como en el caso del algoritmo del TREMORS (Sistema de Evaluación en Tiempo Real del Peligro de los Tsunamis por el Momento Sísmico). El TREMORS también tiene la capacidad de calcular de forma automática el momento sísmico a partir de datos de banda ancha cada 50 segundos tras el desencadenamiento de una onda P, lo que lo convierte en un instrumento ideal de análisis



El sistema de alerta contra los tsunamis del Japón está a cargo de la Red de Observación Sísmica del Organismo Meteorológico del Japón, que engloba cerca de 180 estaciones sismográficas repartidas de forma más o menos uniforme por todo el país.

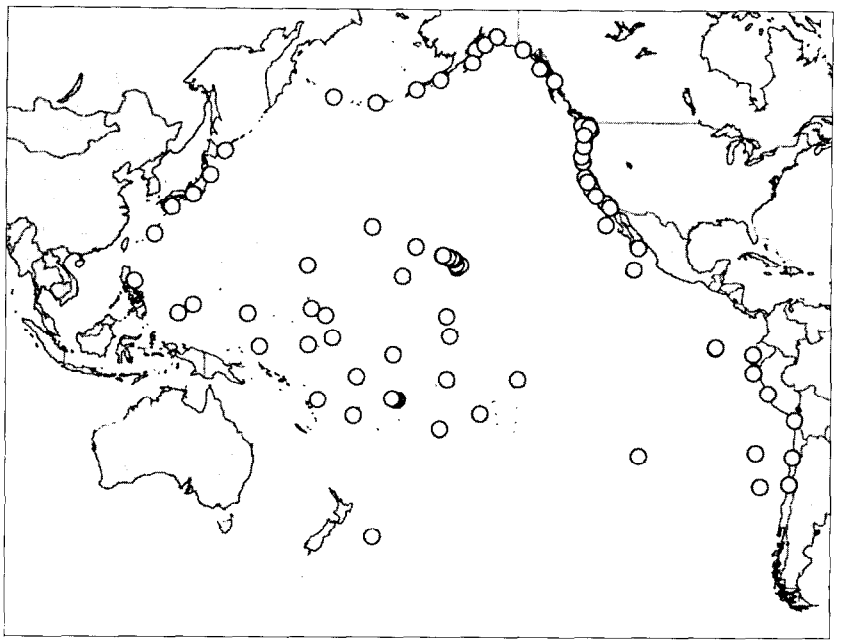


Fuentes principales y complementarias de datos sísmicos que sustentan las actividades del Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico. En algunas ocasiones estas fuentes de datos cambian, y la información más actualizada se encuentra en el "Plan de Comunicaciones del Sistema de Alerta contra los Tsunamis" y sus ediciones posteriores.

de los sistemas de alerta contra los tsunamis a nivel local, regional y transoceánico.

En nuestros días el mundo está constelado de miles de estaciones sismográficas, y muchas de las que utilizan los centros de alerta contra los tsunamis pertenecen a otras organizaciones y sirven principalmente a otros fines. Entre ellas, cabe citar los sismómetros destinados a investigar y/o vigilar las explosiones nucleares subterráneas, los volcanes, el interior de la tierra y los riesgos sísmicos. Habida cuenta de los gastos que supone instalar y mantener estos instrumentos, su utilización con fines múltiples y su financiación compartida constituyen una estrategia atractiva para todas las partes interesadas. Ahora bien, puede ocurrir que los centros de alerta contra los tsunamis también precisen sus propios sensores sísmicos a fin de abarcar una zona más amplia y de poseer un mayor control.

Las tecnologías relacionadas con los sensores sísmicos y las técnicas de procesamiento de datos sísmicos se encuentran en una fase relativamente avanzada. No obstante, es posible que resulten costosas y/o que no respondan de modo apropiado a los requisitos de evaluación rápida y precisa de los seísmos que impone un centro de alerta contra los tsunamis. Es necesario crear estaciones sismográficas y técnicas de análisis más adecuadas para hacer frente a los problemas que experimentan los centros de alerta contra los tsunamis. Se alienta encarecidamente a los Estados Miembros y a sus organizaciones a seguir aportando datos sísmicos en tiempo real o casi real al PTWC, así como a los centros regionales de alerta contra los tsunamis actuales y futuros.



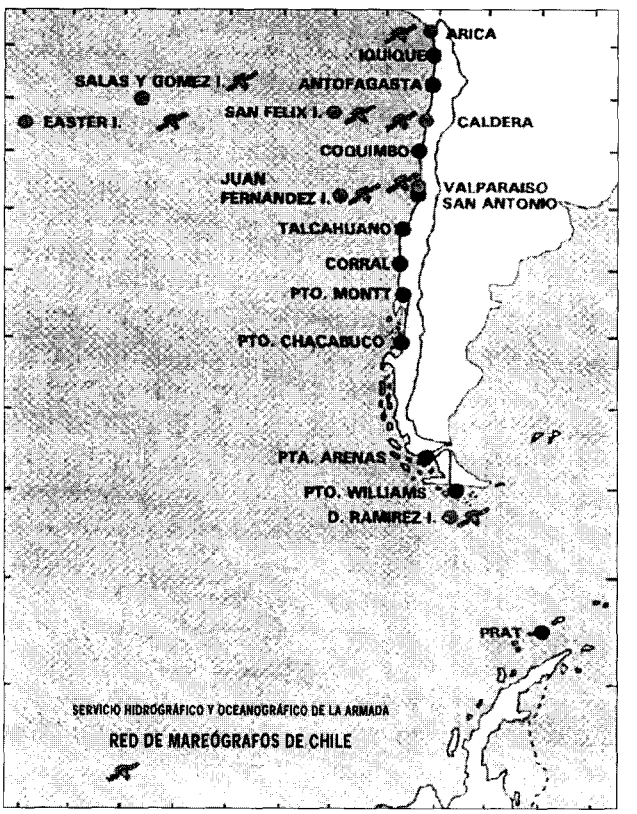
Mareógrafos utilizados por el Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico para confirmar la existencia de los tsunamis que afectan al conjunto del Pacífico y evaluar su intensidad. Los mareógrafos son propiedad de muchas organizaciones, las cuales se encargan de su funcionamiento, y sus datos se transmiten con fines diversos. La configuración se modifica de vez en cuando, y la información más actualizada se encuentra en el "Plan de Comunicaciones del Sistema de Alerta contra los Tsunamis" y en sus ediciones posteriores.

Datos sobre el nivel del mar

Los mareógrafos constituyen un elemento esencial de los sistemas de alerta contra los tsunamis. Cuando están instalados estratégicamente, se utilizan para confirmar con rapidez la existencia o inexistencia de ondas provocadas por un tsunami generado por un seísmo, vigilar su avance, facilitar la estimación de la gravedad del peligro y aportar elementos para declarar su desaparición. Asimismo, es posible que los mareógrafos constituyan el único medio de detectar un tsunami cuando no se dispone de datos sísmicos o el fenómeno no se origina en un seísmo.

La mayor parte de los mareógrafos utilizados con fines de alerta contra los tsunamis se concibieron para medir las mareas. Los mareógrafos se sirven, por lo general, de un cilindro de amortiguación para eliminar las señales de mayor frecuencia de las olas causadas por el viento. Comúnmente, este aparejo consta de un cilindro vertical, largo y hueco, de fondo casi totalmente cerrado a no ser por una pequeña abertura, e instalado en un extremo de un embarcadero, sumergido en el océano. El agua marina que se encuentra en el interior del cilindro sube y baja con el lento alternar de las mareas, pero la pequeña abertura del fondo restringe el flujo, por lo que las ondas de mucha mayor frecuencia causadas por el viento y la marejada tienen poca incidencia en el nivel. Las olas provocadas por los tsunamis tienen frecuencias situadas entre los dos extremos y pueden pasar por el cilindro, aunque a menudo con una amplitud reducida, y con cierto retraso. Las mediciones del nivel del agua en el interior del cilindro se realizan generalmente utilizando técnicas mecánicas o acústicas.

Otro tipo de mareógrafo conocido con el nombre de burbujeador tiene respuesta a una gama de frecuencias más amplia, y utiliza una corriente de gas lenta, aunque constante, que se fuga del extremo sumergido de un tubo largo y estrecho. A medida que los niveles del océano suben y bajan con respecto a la abertura del



Mareógrafos del Sistema Nacional de Alarma de Maremotos de Chile.

tubo, la presión necesaria para mantener el flujo constante de dicho gas aumenta y disminuye en consecuencia. Esta contrapresión se puede medir y convertir en un nivel del agua.

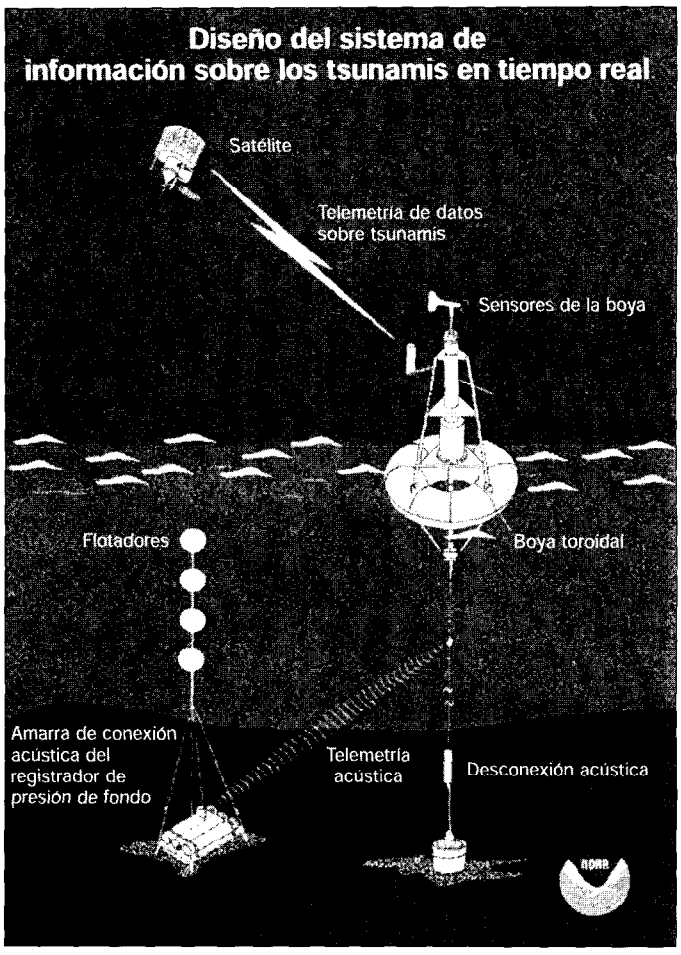
En los últimos años se ha diseñado y utilizado un nuevo tipo de mareógrafo destinado específicamente a registrar los tsunamis, que utiliza como sensor un transductor de presión piezoeléctrico. Este tipo de sensor convierte la presión del agua, que es directamente proporcional al nivel del mar, en voltaje. Puede instalarse en altamar en el fondo del océano y conectarse a una estación en tierra mediante un cable eléctrico, o bien en las grandes profundidades oceánicas y enviar su señal a una boya de la superficie. Entre las ventajas de este tipo de sensor para los tsunamis se hallan la posibilidad de medir una gama más amplia de niveles del mar, de tal forma que incluso se engloban los tsunamis de gran tamaño, y el hecho de que responde a una mayor variedad de frecuencias para grabar la señal de los tsunamis sin distorsiones. Además, es posible instalar estos sensores de manera más estratégica en el medio del océano donde no existen islas en las que ubicar otros tipos de mareógrafos, y donde el tsunami no se ve distorsionado por los efectos de las aguas poco profundas y de las riberas.

En los Estados Unidos se está elaborando un tipo de mareógrafo que mide la presencia inusual del agua y su nivel en tierra a raíz de un tsunami o de otro tipo de riada. Dado que este indicador de inundación se encuentra totalmente en tierra, los gastos de construcción, instalación y mantenimiento deberían ser menores.

En el Japón se vigilan de forma sistemática los niveles del mar mediante sensores ultrasónicos sobre la superficie marina, sensores de la presión del agua en tierra para calcular la penetración de las aguas, y mareógrafos con sensores de tensión. Su Instituto de Investigaciones Portuarias también ha instalado mareógrafos para medir la intensidad de los tsunamis a cerca de 50 km de distancia de la entrada de la Bahía de Tokio.

Los datos de todos los tipos de mareógrafos citados se transmiten de forma analógica o numérica a los centros de alerta o a otras organizaciones, y/o se registran localmente en un papel de registros de diagramas, cinta perforada, medios magnéticos informatizados o en la memoria de una computadora.

Para ser eficaces en materia de alerta, los mareógrafos han de estar ubicados a proximidad de la región donde se originan los tsunamis, para obtener así una confirmación lo más rápida posible de la supuesta formación de un tsunami, y una primera estimación de su intensidad. Asimismo, deberían localizarse entre el lugar de origen y las zonas costeras amenazadas, a fin

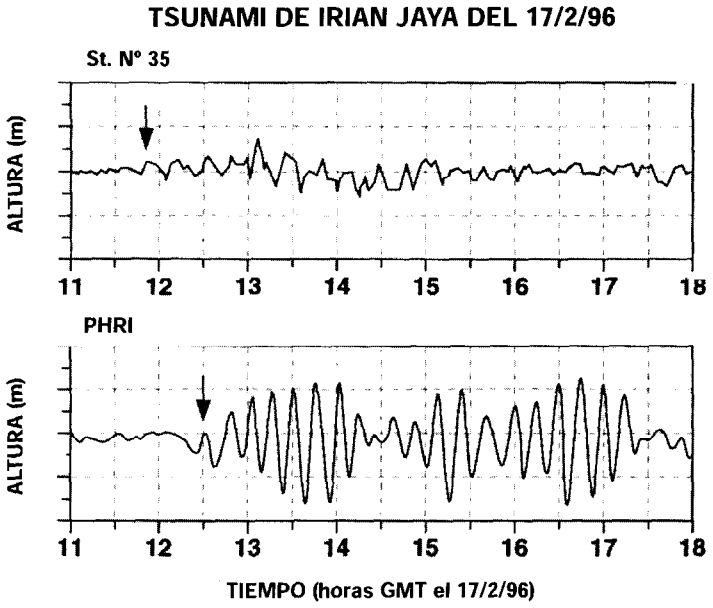


Sistema creado recientemente por los Estados Unidos para registrar los tsunamis en alta mar con un indicador de presión del fondo marino, que transmite la señal a los centros de alerta a través de una boya y un satélite.

de facilitar la vigilancia del tsunami y la predicción de sus efectos. En el caso de los tsunamis locales, son necesarios numerosos mareógrafos a lo largo de las costas vulnerables, con miras a obtener una confirmación veloz de la existencia de olas provocadas por los tsunamis y proceder a su evaluación. Algunas zonas costeras del Pacífico amenazadas por tsunamis locales, por ejemplo en Japón, Estados Unidos y Chile, disponen de numerosos mareógrafos, pero otras costas que sufren amenazas locales cuentan con pocos o ninguno. En el caso de los tsunamis que afectan a todo el Pacífico, se requiere una cobertura menos densa aunque extensa en las regiones donde se originan y en todo el océano Pacífico. Existen mareógrafos en las proximidades de todas las regiones de origen conocidas de los principales tsunamis que afectan a todo el Pacífico, excepto en las zonas sísmicas de las islas Kuriles y de la Península de Kamchatka. En el marco de un proyecto conjunto con la COI y los Estados Unidos, la Federación de Rusia está realizando actividades con el fin de restablecer los mareógrafos en esta región, los cuales transmitirán datos a los centros rusos de alerta contra

los tsunamis, así como al PTWC. Sin embargo, la cobertura en el interior de la cuenca del Pacífico presenta deficiencias múltiples y considerables, especialmente en la zona norte, donde sólo hay contadas islas en las que instalar mareógrafos. Para aumentar la información sobre el interior del océano Pacífico será necesario utilizar sensores tales como indicadores de presión en aguas profundas, que no precisan estar cerca de la tierra.

Como sucede con los sensores sísmicos, los mareógrafos utilizados en relación con los tsunamis a veces pertenecen a otras organizaciones que se encargan de su mantenimiento y, en principio, pueden estar destinados a otras funciones. Además de medir las mareas, estos mareógrafos pueden utilizarse en la investigación relacionada con los cambios a largo plazo del nivel del mar provocados por el calentamiento del planeta y las variaciones climáticas, y con alteraciones



Las señales de los tsunamis calculadas por un mareógrafo subacuático situado a 50 km de la Bahía de Tokio en cerca de 50 m de agua (trazo superior) y otro mareógrafo situado en la orilla (trazo inferior). El tsunami es detectado por el mareógrafo externo alrededor de 40 minutos antes de que alcance la orilla (flechas). El indicador en alta mar fue creado por el Instituto de Investigaciones Portuarias del Japón.

Numerosas zonas del Pacífico amenazadas por tsunamis locales no disponen de mareógrafos en las proximidades para detectar rápidamente o confirmar la presencia de un tsunami, o bien para evaluar su carácter. Es preciso instalar mareógrafos en estas zonas, y enviar sus datos en tiempo real a los centros regionales de alerta contra los tsunamis y/o a otras oficinas competentes. Con este propósito es menester crear y utilizar instrumentos más simples y económicos, tales como los indicadores de subida de las aguas en tierra antes mencionados.

También existen deficiencias significativas en cuanto a los mareógrafos utilizados para detectar y evaluar los tsunamis que pueden afectar a todo el Pacífico. Deberían volver a establecerse mareógrafos en la región de las islas Kuriles y Kamchatka donde se originan estos fenómenos, así como en otras zonas que carecen de instrumentos. Es necesario instalar dispositivos tales como los sensores de presión en el fondo oceánico, que se elaboran en Estados Unidos, en zonas internas del Pacífico donde no puede utilizarse otro tipo de instrumentos. El PTWC precisa nuevos instrumentos y técnicas tales como los indicadores de presión en aguas profundas, ya que éstos miden con mayor precisión las olas provocadas por los tsunamis en cuanto se forman y propagan a través del Pacífico, a fin de predecir con mayor exactitud las repercusiones de los tsunamis en las costas.

Se alienta encarecidamente a los Estados Miembros y a sus organizaciones a seguir aportando datos en tiempo real o casi real sobre el nivel del mar al PTWC, así como a los centros de alerta contra los tsunamis actuales y futuros. Si se produce un importante terremoto en la costa, las autoridades municipales o los observadores de indicadores deberían ponerse en contacto inmediatamente con el centro de alerta nacional para facilitar un resumen de sus observaciones. Incumbe luego a los centros nacionales informar inmediatamente al PTWC.

Asimismo, se recomienda el uso de instrumentos oceánicos con fines diversos que comparten sensores, aparatos electrónicos de procesamiento de datos, métodos de comunicación y, especialmente, mecanismos de apoyo, y que pueden utilizarse para medir la intensidad de los tsunamis.

a corto plazo generadas por fenómenos más efímeros como El Niño y las ondas de tormenta. Ahora bien, los centros de alerta contra los tsunamis también pueden necesitar sus propios mareógrafos para obtener interpretaciones en lugares estratégicos en los que no se dispone de otros datos y para recibir señales cuya calidad y carácter sean más adecuados para medir los tsunamis con fines de alerta.

Datos históricos sobre tsunamis y seísmos

Los centros de alerta han de disponer de un acceso rápido a los datos históricos sobre tsunamis y seísmos previos con objeto de contribuir a determinar si un seísmo procedente de una región concreta puede haber generado un tsunami, y si dicho tsunami puede tener repercusiones en las regiones costeras comprendidas en su ámbito de responsabilidad. Así, por ejemplo, es práctico saber si en una determinada zona de subducción se han producido en el pasado muchos seísmos de magnitud superior a 8 sin que ninguno haya generado un tsunami de importancia. También resulta útil conocer las medidas registradas por un mareógrafo concreto con respecto a los anteriores tsunamis con efectos destructivos o no destructivos procedentes de una región de origen determinada. Cuando existen, esos datos figuran en informes, catálogos, diagramas y unas cuantas bases de datos electrónicas, formatos que no son los ideales de cara a la facilidad y la rapidez de utilización por parte de los centros de alerta. Los proyectos como la Base Experta de Datos sobre Tsunamis, apoyada por el ITSU, pueden contribuir a que los datos resulten más prácticos y de acceso más fácil a los centros de alerta, a los científicos y a los administradores de situaciones de emergencia.

Los datos históricos sobre seísmos y tsunamis no están organizados ni son accesibles de una manera que resulte práctica a los centros de alerta. Se recomiendan los proyectos como la Base Experta de Datos sobre Tsunamis, que facilitan el rápido acceso de los centros de alerta y otros interesados a los datos históricos sobre tsunamis y a los datos sísmicos conexos disponibles en diversos formatos gráficos de gran utilidad.

Los datos de los mareógrafos no se almacenan de forma sistemática; tampoco se difunden después de cada tsunami producido en el Pacífico, en particular en el caso de los que no tienen efectos destructivos, que son los más numerosos. Estos datos son muy útiles para orientar la interpretación que dan los centros de alerta a los indicadores del nivel del mar durante los tsunamis ulteriores, y para la investigación. Hace falta confeccionar un plan eficaz para recopilar ese tipo de datos con posterioridad a cada fenómeno, registrarlos en un formato numérico común y facilitar el acceso a los datos vía Internet o gracias a otro medio electrónico.

Datos procedentes de modelos numéricos

Los centros de alerta empiezan actualmente a servirse de datos procedentes de modelos numéricos para orientar, en función de los parámetros del seísmo y de las lecturas registradas por los mareógrafos, las actividades de predicción de la magnitud de un tsunami surgido en su ámbito de responsabilidad.

Así, por ejemplo, para hacer frente al peligro que representan los tsunamis a escala nacional, el Japón prepara modelos del avance máximo tierra adentro de las olas originadas en seísmos hipotéticos de diversas magnitudes y profundidades situados frente a la costa en más de 1.000 puntos reticulares cercanos. De esa manera podrá crearse una base de datos relativos a la altura prevista de los tsunamis a lo largo de cada zona costera en relación con cualquier seísmo de origen local. La base de datos se utilizará con fines de alerta y de planificación. En caso de que se produzca realmente un tsunami, una vez determinados el hipocentro y la magnitud del seísmo podrán hallarse de inmediato en la base de datos la altura y la hora de llegada previstas, tras lo cual se difundirá una alerta de tsunami en que figuren dichos resultados. El JMA se propone poner en funcionamiento este nuevo método de predicción en la primavera de 1999.

El Centro de Alerta contra los Tsunamis de Alaska y la Costa Occidental ha elaborado igualmente un método de predicción de la altura de las olas basado en modelos numéricos. Se basa en tiempo real en los parámetros del seísmo y las medidas registradas por un mínimo de dos mareógrafos.

La mayor parte de los centros de alerta empiezan apenas a servirse de forma sistemática de datos procedentes de modelos numéricos con objeto de predecir los litorales a los que afectará una zona de origen concreta, la altura de las olas y el alcance máximo de las aguas en la fase de inundación tierra adentro. En vista del mayor grado de velocidad y precisión de las actuales técnicas de preparación de modelos, los centros de alerta han de hallar la manera de generar y emplear estos datos sintéticos a fin de reducir el número de alertas innecesarias y de facilitar orientación con respecto a las repercusiones que se prevén en su zona de responsabilidad.

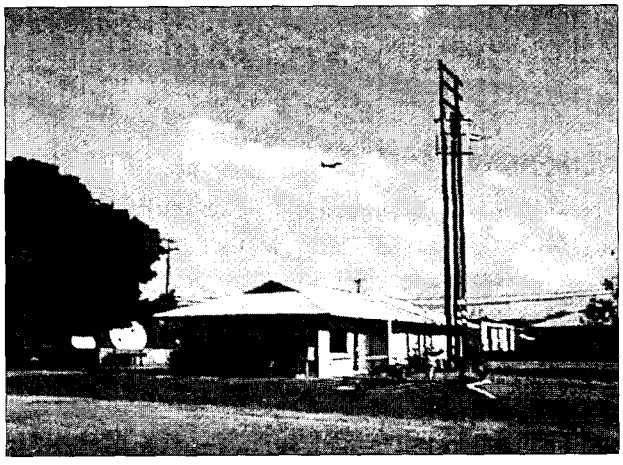
Otros tipos de datos

En determinadas ocasiones los centros de alerta contra los tsunamis tendrán necesidad de otros tipos de datos,

como es el caso, por ejemplo, de las erupciones volcánicas o los desprendimientos de tierras inminentes que se producen junto a una masa de agua. Cuando se dan estos tipos de fenómeno, que por lo general se gestionan cada cual por separado, el centro de alerta suele colaborar estrechamente con otro organismo al que corresponde una responsabilidad más directa en relación con el peligro principal.

Comunicaciones

Los sistemas de alerta contra los tsunamis exigen mecanismos de comunicación singulares y de amplio alcance. Deben enviarse datos sísmicos y relativos al nivel del mar desde lugares apartados que a menudo carecen de electricidad y de teléfono; los mensajes de alerta deben transmitirse con rapidez y con garantías de seguridad a suscriptores que cuentan con distintos mecanismos de acceso. Han de recorrerse distancias que oscilan entre un kilómetro escaso y decenas de miles de kilómetros. Para atender a estas necesidades hace falta disponer de diversos métodos de comunicación.



Las antenas de satélites geoestacionarios (a la izquierda, tapadas en parte por el árbol) y las antenas de radio de muy alta frecuencia (a la derecha, en la parte superior de la torre) forman parte del complejo sistema de comunicación del Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico.

Acceso a los datos en tiempo real

Para que resulten útiles los datos sísmicos y mareográficos de que hacen uso los centros de alerta, debe garantizarse su recepción en tiempo real o prácticamente real. Con este fin se aplican numerosas técnicas de comunicación como la radio de muy alta frecuencia, las microondas, las líneas de tierra especializadas, el acceso por llamada telefónica, las conexiones continuas vía satélite, la transmisión programada vía satélite y las redes de paquetes. En algunos casos puede que haga falta recurrir a más de una técnica para entrar en comunicación con un lugar de acopio de datos. Aunque el circuito de comunicaciones puede suministrarse por medios comerciales, suele hacer falta equipo especializado para convertir los datos a un formato que se pueda transmitir por el circuito. Complica el problema de la comunicación de los datos el hecho de que los lugares de acopio pueden estar emplazados en zonas apartadas que no disponen de electricidad o de acceso a líneas telefónicas. En el caso de los tsunamis de origen cercano puede también que se corte la electricidad y el teléfono a causa del terremoto. En lo que respecta a los mareógrafos, que producen un volumen de datos muy reducido, la solución ha consistido en crear plataformas de acopio de datos que funcionan con energía solar transmitiendo los datos conforme a un programa regular por medio del Satélite Geoestacionario Operacional de Estudio del Medio Ambiente (GOES) de los Estados Unidos o del Satélite Meteorológico Geoestacionario (GMS) del Japón. También están en curso de preparación estaciones sismográficas inteligentes que son capaces de detectar seísmos de envergadura y que sólo necesitan transmitir unos cuantos bytes de datos paramétricos, a diferencia de las estaciones sismográficas normales basadas en un sistema de transmisión continua de datos.

En los centros de alerta debe estar garantizada la recepción en tiempo real o prácticamente real de datos fundamentales, sísmicos o relativos al nivel del mar. Los métodos y canales actuales de envío a los centros de alerta de datos procedentes de instrumentos sismográficos o mareográficos suelen ser complejos y costosos; debido a sus limitaciones no es posible en ocasiones instalar los sensores necesarios, sobre todo en los emplazamientos remotos. Hoy en día se dispone de muy diversos métodos nuevos de comunicación por medio de satélites, redes de fibra óptica y tecnologías de telefonía celular. Estos nuevos métodos, que requieren una revaluación continua de su adecuación a los problemas de comunicación de datos que experimenta el Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico, se han de adoptar cuando proceda. Han de elaborarse además instrumentos menos exigentes en materia de comunicaciones.

Difusión de mensajes

De igual importancia que las comunicaciones orientadas al acceso a los datos en tiempo real son los métodos de comunicación encaminados a hacer llegar con rapidez a los usuarios los mensajes de alerta e información de un centro. Pueden transmitirse de forma segura a oficinas de todo el mundo mensajes cortos mediante circuitos especializados como el Sistema Mundial de Telecomunicación (SMT) o la Red de Telecomunica-

ciones Fijas Aeronáuticas (AFTN). También pueden difundirse mensajes a todo el mundo mediante circuitos comerciales como el télex. El correo electrónico sirve también para transmitir información con rapidez y seguridad a personas y oficinas de todo el mundo, pero este método resulta a veces menos fiable al depender de conexiones sobre las que los centros no ejercen control alguno. También pueden enviarse mensajes de alcance local o nacional sobre tsunamis por medio de circuitos de base textual o vocal creados con fines de defensa nacional u otro tipo de emergencia. Asimismo se pueden enviar mensajes por teléfono o por fax, métodos que resultan menos eficaces al requerir una conexión con cada destinatario por separado.

Los centros de alerta han de transmitir con rapidez y fiabilidad a las autoridades competentes situadas en el ámbito de responsabilidad que les corresponde sus mensajes de alerta contra los tsunamis y demás información conexa. Un sistema ideal de transmisión de mensajes facilitaría la difusión y la recepción rápidas y asequibles de textos y gráficos (como, por ejemplo, de diagramas del tiempo de propagación de un tsunami) en cualquier lugar de la región del Pacífico, transmitiría de forma simultánea un mensaje a diversos destinos, tendría la capacidad de enviar mensajes de alarma para avisar a los destinatarios de la posible necesidad de actuar de inmediato y exigiría a todos los destinatarios principales que transmitieran al centro un mensaje de acuse de recibo. Los métodos y canales actuales de envío de mensajes responden a estas características en diversa medida; ninguno es ideal. Hoy en día se dispone de muy diversos métodos nuevos de comunicación por medio de satélites, redes de fibra óptica y tecnologías de telefonía celular. Estos nuevos métodos, que requieren una revaluación continua de su adecuación a los problemas de comunicación de mensajes que experimenta el Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico, se han de adoptar cuando proceda.

Preparación

Esta categoría de actividades responde a la evaluación de los riesgos y a las alertas. Una buena preparación en caso de alerta de peligro inminente de tsunami exige saber qué zonas podrían inundarse (mediante mapas de inundaciones provocadas por tsunamis) y tener conocimiento del sistema de alerta para determinar cuándo hay que evacuar y cuándo es seguro volver. A falta de estos dos tipos de información, puede que la respuesta, al no ser adecuada, no sirva para mitigar las repercusiones del tsunami. También es fundamental que el público cuente con cierto grado de sensibilización y de entendimiento en materia de tsunamis. Con excepción de los casos en que se dispone de tiempo, medios y procedimientos para ordenar la evacuación con carácter obligatorio, para alejar con rapidez y de forma segura a la población de una zona que corre peligro de inundación y para facilitar su regreso en esas mismas condiciones hace falta que la propia población tenga cierto conocimiento del peligro. Así ocurre en particular en el caso de los tsunamis generados en una zona cercana, pues la alerta procede exclusivamente del temblor causado por el seísmo. Otro tipo de tarea de preparación se basa en la ordenación territorial encaminada a situar fuera de las zonas inundables las instalaciones importantes, como por ejemplo escuelas, comisarías de policía, departamentos de bomberos y hospitales. Otro mecanismo de preparación consiste en llevar a cabo obras de ingeniería orientadas a levantar construcciones que resistan los efectos de los tsunamis, a proteger los edificios existentes y a crear barreras defensivas contra los tsunamis, como por ejemplo diques y rompeolas.

Evacuación

Los planes y procedimientos de evacuación suelen prepararse y llevarse a cabo a escala local, pues se basan en un conocimiento minucioso de la población y de las instalaciones costeras que corren peligro, así como de los recursos locales que pueden destinarse al problema. Los tsunamis de origen cercano, que no dejan tiempo, o muy poco, para emitir una alerta formal, pueden traer aparejados daños causados por terremotos, mientras que con los tsunamis de origen lejano a veces se dispone de varias horas para prepararse antes de que lleguen las primeras olas. Por consiguiente los preparativos y procedimientos de evacuación han de ser distintos en uno y otro caso.

La mayor parte de las comunidades costeras del Pacífico no está preparada para evacuar de inmediato los litorales bajos en caso de seísmo tsunamigénico de origen cercano. Hace falta seguir preparando mapas de posibles inundaciones correspondientes a todos los litorales poblados que corran peligro de tsunami y seguir educando a la población amenazada en relación con los tsunamis de origen cercano, el peligro que representan y las medidas que debe adoptar de inmediato para proteger la vida propia en caso de tsunami.

Evacuación en caso de tsunami de origen cercano

Cuando es inminente la llegada de un tsunami de origen cercano, puede que no se cuente con más aviso que el temblor causado por el terremoto o un comportamiento poco habitual del océano. Las personas que corran peligro deberán reconocer las señales y desplazarse de inmediato y con rapidez hacia el interior, hacia un terreno elevado o hacia una zona que reúna ambas condiciones, pues puede que las olas destructoras hagan su aparición en cuestión de minutos o incluso antes. También existe la posibilidad de que los evacuados se vean obstaculizados por los efectos del terremoto, como por ejemplo desprendimientos de tierras y edificios y puentes venidos abajo que pueden dificultar su retirada. Para que resulte eficaz este tipo de evacuación rápida e improvisada hace falta que el público esté muy bien informado con respecto al peligro de los tsunamis. También es necesario que los funcionarios públicos planifiquen de antemano las zonas de evacuación en caso de tsunami y las rutas de evacuación seguras, y que elaboren y difundan los mapas correspondientes. Para fomentar un grado suficiente de educación pública y para elaborar mapas y procedimientos de evacuación es fundamental entender bien el peligro del tsunami y saber dónde hay más posibilidades de que el tsunami provoque inundaciones.

Muchas regiones del Pacífico no cuentan con procedimientos de evacuación eficaces para casos de tsunamis de origen lejano. En algunos casos la alerta no llega a las comunidades que pueden verse afectadas y, aun cuando la reciben, los administradores de situaciones de emergencia suelen tener un conocimiento imperfecto de la información sobre tsunamis anteriores o sobre tsunamis derivados de modelos o sobre las características del riesgo de tsunami en que debe basarse su decisión en materia de evacuación, o bien tienen un acceso limitado a dicha información. Para preparar los planes de evacuación hace falta disponer para todas las regiones costeras amenazadas, y sobre todo para los centros de población, de industria o de turismo, de mapas de las zonas inundables por tsunamis de origen lejano. Por lo general también son insuficientes los programas didácticos, y es posible que evacuaciones realizadas innecesariamente hayan desgastado la confianza en el sistema. Ha de hacerse frente a todos estos defectos a fin de llevar a cabo evacuaciones eficaces que sirvan para que no se pierdan vidas de forma innecesaria la próxima vez que surja un tsunami de envergadura que atraviese el Pacífico u otro tipo de tsunami de origen lejano.

Material didáctico sobre tsunamis y sobre el Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico, preparado y publicado por los Estados Miembros del GIC/ITSU y la COI.

Evacuación en caso de tsunami de origen lejano

En caso de tsunami de origen lejano, las autoridades cuentan con más tiempo para preparar una evacuación organizada. Una vez recibida de un centro de alerta la notificación en que se anuncia un tsunami y la hora en que se prevé la llegada de la primera ola, los funcionarios del lugar encargados de las situaciones de emergencia deciden si conviene proceder a evacuar. Esta decisión se funda, por una parte, en el conocimiento que aportan los datos históricos de casos anteriores o los procedentes de modelos con respecto a la amenaza que representa la región de origen de los tsunamis para las costas de la zona y, por otra parte, en otro tipo de información remitida por el centro de alerta en lo que respecta a la importancia del tsunami a medida que se aproxima. Se informa al público del peligro inminente y se le indican las modalidades, el trayecto y el momento de evacuación. Fuerzas locales designadas, como la policía, los bomberos o la protección civil contribuyen al cumplimiento de las instrucciones de evacuación. También pueden llevarse a la práctica determinados procedimientos encaminados a salvaguardar bienes, como por ejemplo el envío a alta mar de botes y barcos y la protección de instalaciones industriales situadas al borde del mar. La eficacia de las tareas de preparación se funda en los cálculos relativos a las posibilidades de inundación y a los demás efectos derivados de un tsunami de origen lejano. Se deberán

determinar las zonas y las rutas de evacuación a zonas seguras e instruir a la población en cuanto al peligro de tsunami y a los procedimientos de evacuación para que no decida quedarse en zonas peligrosas, internarse en ellas por curiosidad o regresar antes de que haya pasado completamente el peligro. Han de reducirse al mínimo las evacuaciones innecesarias para que el público no pierda la confianza en el sistema.

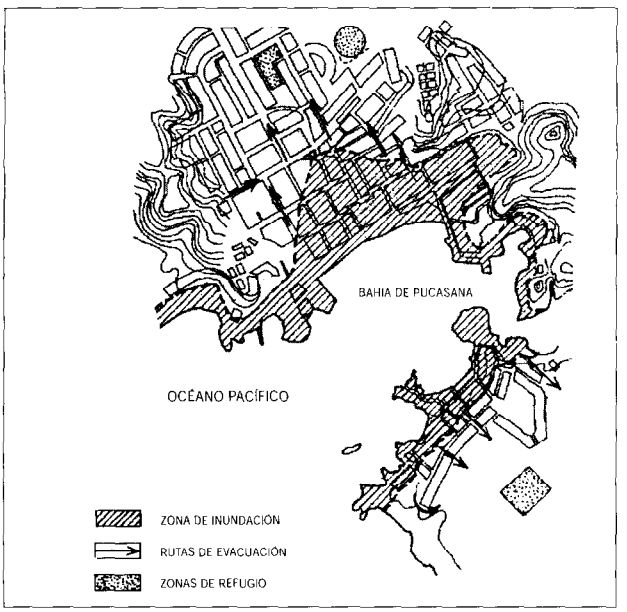
Educación

Para avanzar en materia de mitigación de los riesgos asociados a los tsunamis es esencial fundarse en planes encaminados a que el público en general, las autoridades municipales y los responsables políticos entiendan mejor las características de las olas de los tsunamis, los daños y la destrucción que pueden provocar y las medidas adecuadas que deben adoptarse para reducir los riesgos conexos.

Educación del público

La manera más eficaz de atender a las necesidades del público en general en materia de educación consiste en que cada Estado Miembro y cada localidad tenga presentes la lengua, la cultura, las costumbres del lugar, las prácticas religiosas, las relaciones que existen con la autoridad y los casos anteriores de tsunami.

El ITSU ha preparado y distribuido varios tipos de material didáctico encaminado a prestar asistencia a las actividades locales y a orientarlas. En un folleto en colores titulado Tsunami: The Great Waves figura información de carácter general sobre el fenómeno de los tsunamis y el peligro que representa, los sistemas de alerta contra los tsunamis, la investigación relativa al fenómeno y la manera de actuar en caso de tsunami. En un libro de historietas ilustradas titulado Tsunami Warning se recoge información semejante que va dirigida a los niños. Lo acompaña un cuaderno de ejercicios suplementario para uso de profesores y alumnos donde figura información fundamental más pormenorizada. Aunque el folleto y el libro de historietas ilustradas están escritos en inglés, actualmente se los está pasando a un formato que facilite la traducción a otros idiomas y la publicación de las traducciones. Chile acaba de publicar un juego de cuatro manuales en español provistos de guías del profesor, dedicados a los seísmos y los tsunamis y dirigidos a los alumnos de la enseñanza primaria y secundaria. En el Canadá se tradujeron posteriormente estos libros al inglés. Ya ha sido publicado y distribuido cada juego con el apoyo de la COI. Además, el ITIC se ocupa periódicamente de tareas de educación del público como responder a las preguntas que formulan los estudiantes y los particulares interesados, facilitar información a los medios de comunicación, a productores de televisión y documentales y a escritores, organizar conferencias dirigidas al público y prestar asistencia a otras organizaciones que cuentan con programas encaminados a educar al público con respecto a los tsunamis. El ITIC prepara asimismo una página de Internet donde figurará una amplia gama de información en materia de tsunamis de interés para el público en general y para los encargados de mitigar los efectos del fenómeno. Algunos Estados Miembros también ponen en práctica sus propios programas de educación pública sobre tsunamis.



Mapa de inundación y evacuación elaborado para la ciudad costanera de Pucusana (Perú).

Educación dirigida a encargados del funcionamiento de sistemas de alerta, administradores de situaciones de emergencia y responsables políticos

También se ha de atender a las necesidades en materia de educación de los encargados del funcionamiento de sistemas de alerta, los administradores de situaciones de emergencia y los responsables políticos. Puesto que los tsunamis, de origen tanto cercano como lejano, se dan con tan poca frecuencia en un litoral determinado, lo normal es que las personas que desempeñan estas importantes funciones tengan del fenómeno una experiencia personal previa escasa o nula en la cual fundar sus decisiones relativas a los preparativos o las medidas que han de adoptarse cuando surge un tsunami. Estas personas suelen depender casi exclusivamente de programas de formación o de la facilidad de acceso a información sobre tsunamis en general, sobre el peligro concreto que corre su ámbito de responsabilidad, sobre los sistemas de alerta y sobre las medidas de mitigación.

El ITSU ha creado diversos programas encaminados a atender a estas necesidades. El programa de expertos visitantes, que lleva a cabo anualmente el ITSU con el apoyo de la COI y con la asistencia del Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico y de otras organizaciones, sirve para formar a científicos e ingenieros de todo el Pacífico en torno al peligro de los tsunamis, a los sistemas de alerta y a las tareas de mitigación. Algunos Estados Miembros organizan asimismo programas de formación en materia de riesgos naturales, que dan cabida a los tsunamis. El ITIC publica Tsunami Newsletter, boletín que recoge información sobre los casos de tsunami y las actividades de mitigación recientes y que se distribuye a escala internacional a unas mil personas u oficinas a quienes incumbe algún tipo de responsabilidad en materia de tsunamis. El ITIC también responde a las frecuentes solicitudes de información procedentes de administradores de situaciones de emergencia y responsables políticos. La página de Internet del ITIC dedicada a los tsunamis facilitará próximamente a escala mundial otro tipo de acceso a información pertinente sobre tsunamis. La Base Experta de Datos sobre Tsunamis constituye igualmente un excepcional mecanismo de acceso rápido a datos históricos sobre los tsunamis anteriores registrados en todo el Pacífico.

Gran parte de la población amenazada y muchos de los administradores de situaciones de emergencia y de los responsables políticos disponen de una educación insuficiente con respecto a los tsunamis, el peligro que representan y las estrategias de mitigación. Habida cuenta de las deficiencias generales de los programas didácticos y de la enorme importancia que éstos encierran de cara a las tareas de mitigación, hay que seguir prestándoles especial atención. Los programas didácticos han de ir dirigidos a los residentes de la costa, a los visitantes (turistas), al profesorado, a los representantes de los medios de comunicación, a los encargados del funcionamiento de sistemas de alerta, a los administradores de situaciones de emergencia y a los responsables políticos. Estos programas deberán comprender conferencias, dinámica de grupo, seminarios celebrados en régimen de residencia, seminarios itinerantes, páginas de Internet, tableros de anuncios electrónicos, medios sonoros y visuales, dibujos, fotos que se expondrán en lugares públicos y se difundirán por televisión, anuncios radiofónicos y televisivos, folletos y prospectos. Habrá de prepararse material que sea fácil de traducir o de modificar para amoldarlo al país pertinente. También se deberá proporcionar información en materia de tsunamis a otras organizaciones dedicadas a educar al público en torno a los riesgos naturales, y promover esa información.

Ordenación territorial

Con la expansión de la población a escala mundial, el desarrollo de las zonas costeras amenazadas adquiere un ritmo cada vez más acelerado. Aunque quizá no sea posible atajar este desarrollo, algunas comunidades han optado por prohibir en las zonas inundables la construcción de instalaciones como escuelas y residencias de ancianos que ponen en situación de riesgo a sectores de la población especialmente vulnerables. También se ha prohibido la construcción de otras instalaciones básicas como comisarías de policía y departamentos de bomberos u hospitales. Además, se ha obligado a las instalaciones turísticas, como por ejemplo los hoteles situados al borde del mar, a establecer procedimientos de evacuación en caso de tsunami con objeto de garantizar la seguridad de sus clientes.

Prácticamente no se ha hecho uso de la ordenación territorial en cuanto instrumento de mitigación de los efectos de los tsunamis. Debe alentarse a la administración local a que adopte las medidas que estén a su alcance para impedir determinados tipos de desarrollo en zonas inundables por tsunamis, sobre todo en lo que respecta a las instalaciones en las que se congrega la población o en las que se encuentran en peligro los niños, los ancianos o los minusválidos. En las zonas expuestas a inundaciones no deben levantarse instalaciones esenciales como comisarías de policía, departamentos de bomberos y hospitales, que harán falta una vez haya pasado el tsunami. Las instalaciones industriales que pueden agravar un desastre debido a un tsunami a raíz de fugas o de derrames de material inflamable o sustancias peligrosas deberán reforzarse o situarse lejos de las zonas inundables. Las instalaciones turísticas suelen concentrar al borde del mar un gran número de personas que ignoran todo de los tsunamis. Deberá obligarse a estas instalaciones a que dispongan de procedimientos especiales encaminados a informar y evacuar a los clientes en caso de tsunami.

Ingeniería

Ciertas obras de ingeniería pueden servir para mitigar los efectos de los tsunamis. Pueden fortalecerse los edificios situados en zonas de tsunami para que soporten la fuerza con que se prevé que choquen las olas y las corrientes desatadas. Pueden sentarse cimientos que resistan la erosión y la socavación de las corrientes. En ocasiones podrá construirse abierta la planta baja de los edificios situados al borde del océano para que la atraviese el agua del mar; de esa manera se

contribuye a reducir el flujo de socavación alrededor del perímetro de los cimientos. Asimismo se pueden construir las habitaciones de los hoteles sólo por encima de la primera planta a fin de que corran menos peligro los clientes que no tengan conocimientos sobre tsunamis. En las plantas donde son escasas las posibilidades de inundación podrán situarse partes fundamentales de la infraestructura del edificio como los generadores de emergencia, los centros de distribución de electricidad y los motores de los ascensores. Se podrán asegurar atándolos al suelo los objetos pesados, como por ejemplo tanques de combustible, que pueden producir al flotar el efecto de un rodillo. Se podrán establecer o modificar sistemas de transporte con objeto de facilitar la evacuación rápida en masa para desalojar las zonas de inundación. En los casos de especial peligro en que se disponga de los recursos adecuados podrán contenerse los tsunamis mediante determinadas obras de defensa como malecones, diques, rompeolas y esclusas fluviales. En el Japón se han llevado a cabo tareas de tal envergadura, sobre todo a lo largo de la costa de Sanriku. Estas actividades se deben en buena parte al conocimiento de las posibles zonas inundables y a los daños provocados por tsunamis anteriores.

En la mayor parte del Pacífico se han llevado a cabo pocas obras de ingeniería en previsión de la aparición de tsunamis. Algunas de las medidas que se pueden tomar son relativamente simples, poco costosas y se pueden aplicar a edificios existentes o nuevos. Se insta a las administraciones a que incorporen a sus normas de construcción la ingeniería relacionada con el fenómeno de los tsunamis. También ha de informarse a los propietarios de bienes inmuebles y de empresas acerca de las medidas que pueden adoptar con carácter voluntario para proteger sus inversiones. Cuando sean necesarias y viables, habrán de llevarse a cabo obras de defensa con objeto de contener los tsunamis.

Investigación

Aunque no forme parte directamente de las actividades de mitigación, la investigación relacionada con los tsunamis es fundamental para mejorar tales actividades. En efecto, cuando demuestra la existencia de los paleotsunamis, amplía una base de datos históricos o cuantifica los efectos de un tsunami reciente, la investigación permite obtener una evaluación más precisa del peligro, y mejorar la elaboración de modelos numéricos de los tsunamis. A través de la investigación se elaboran técnicas para que los sistemas de alerta puedan evaluar de forma más rápida y exacta las posibilidades tsunamigénicas de los seísmos, a partir de datos sísmicos, y se preparan mejores instrumentos y técnicas de medición del nivel del agua, para predecir los efectos de los tsunamis en tiempo real. La investigación también puede aportar medios más eficaces para concebir campañas de información sobre los tsunamis destinadas al público y al personal de emergencia, a fin de que puedan tomar las medidas correctas cuando surja la necesidad. La investigación puede ser necesaria para establecer procedimientos de evacuación eficaces, especialmente teniendo en cuenta los riesgos adicionales que plantean los tsunamis generados localmente por un seísmo de gran magnitud. Puede asimismo orientar la planificación de la ordenación territorial en las zonas expuestas a inundaciones y ayudar a concebir en esas zonas construcciones e instalaciones.

Estructura

No existe un programa de investigación oficial que funcione bajo la égida del ITSU, ni tampoco un mecanismo formal de coordinación de la investigación entre los Estados Miembros del ITSU. La mayor parte de la investigación sobre los tsunamis se lleva a cabo en el marco de los programas de investigación de cada uno de los Estados Miembros. Sin embargo, este tipo de investigación con frecuencia requiere un importante grado de colaboración e intercambio de datos en el plano internacional. La reunión más importante relativa a la investigación científica sobre los tsunamis es el Simposio bianual sobre tsunamis, organizado por la Comisión sobre Tsunamis de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, pero además se realizan muchas otras reuniones sobre geofísica, oceanografía y mitigación de riesgos en general, que incluyen a los tsunamis en sus programas. Asimismo, se celebran a menudo seminarios para abordar problemas concretos de los tsunamis, o el problema de los tsunamis en zonas costeras específicas. Se publican artículos de investigación en diversos periódicos sobre geofísica y riesgos naturales, así como en el Science of Tsunami Hazards, publicación de la Tsunami Society. Los científicos especialistas en tsunamis en todo el mundo se comunican entre sí a través del Tsunami Bulletin

Board, un servicio de distribución por correo electrónico establecido inicialmente por los Estados Unidos y que actualmente administra el Centro Internacional de Información sobre los Tsunamis (ITIC) para el ITSU. El ITIC, con el apoyo de la COI, publica para el ITSU, en el Tsunami Newsletter (bianual), información resumida sobre los últimos tsunamis, las próximas reuniones, los informes de reuniones y las últimas publicaciones. En el Centro se está preparando asimismo un sitio Web sobre los tsunamis, que presentará información sobre las necesidades de investigación y los resultados de determinados proyectos de investigación.

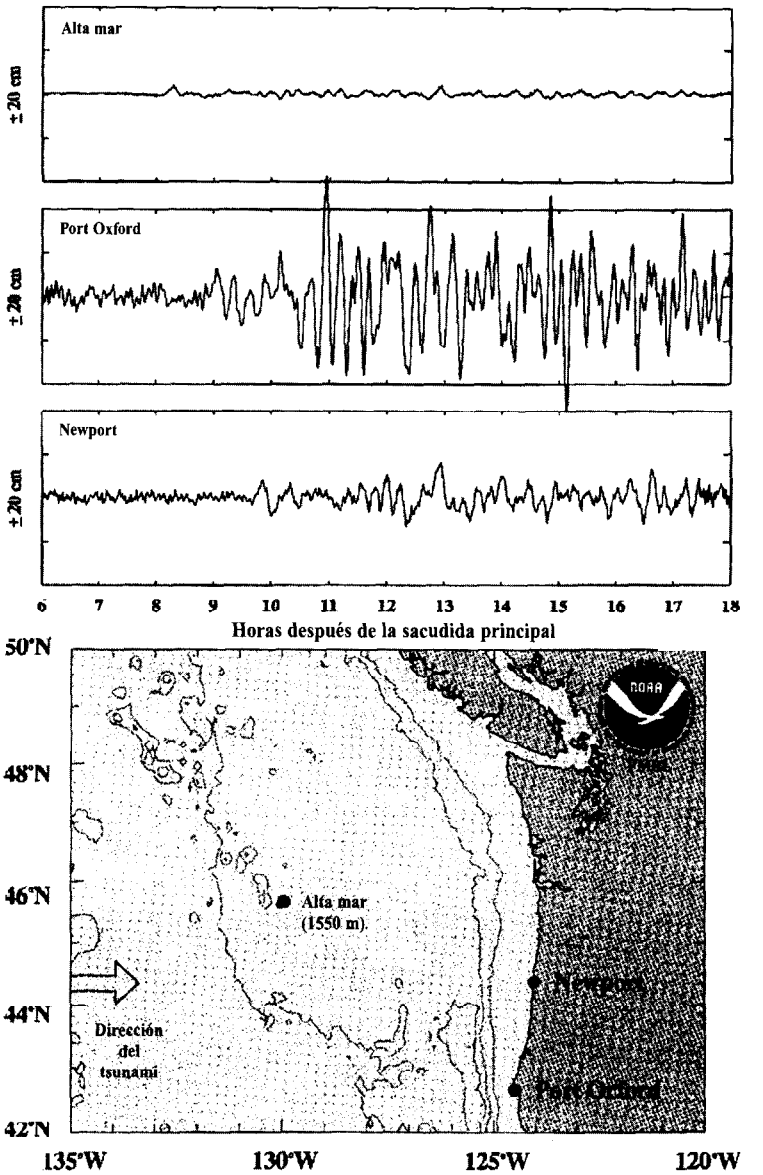
Ambitos de investigación

Las técnicas actuales para la predicción de los tsunamis en tiempo real son aún bastante limitadas. Si bien la posibilidad de un tsunami existe cada vez que se produce un seísmo poco profundo de suficiente envergadura y conforme a un mecanismo apropiado, a orillas o debajo del océano, la única manera de determinar rápidamente y con certeza si el seísmo está acompañado por un tsunami es detectar la presencia de olas, utilizando una red de mareógrafos, o recibir observaciones fiables de testigos oculares. Aun así, no es posible determinar con precisión la extensión, amplitud o historia temporal de la deformación del fondo del mar que genera un tsunami, a partir de datos sismológicos o mareográficos. Además, aunque se puede predecir cuándo la energía inicial del tsunami llegará a los lugares costeros, no es posible todavía prever con mucha certeza la altura y el número de las olas, la duración de las condiciones de riesgo o la fuerza que puede esperarse de esas olas, ni siquiera con una lectura de los mareógrafos situados entre el lugar de origen y esos lugares.

Se siguen elaborando y mejorando modelos numéricos para abordar el problema de los tsunamis. El método tradicional de diferencias finitas es útil para elaborar modelos de tsunamis en alta mar, pero en general no bastan para reproducir fielmente la geometría y batimetría costera con la precisión necesaria. Sin embargo, los modelos de elementos finitos, con sus retículas triangulares irregulares, pueden aportar la resolución necesaria. Estos tipos de modelo deben usarse para calcular el alcance máximo de las aguas en la fase de inundación tierra adentro, los límites de la inundación y las corrientes horizontales para los episodios de origen conocido e hipotético. Para determinar el nivel total del agua y su variación con el tiempo, a lo largo de la duración del tsunami, se deberá considerar la interacción del tsunami con las mareas. La información derivada de modelos de las corrientes horizontales puede contribuir a calcular las fuerzas que se ejercen sobre las construcciones, así como las condiciones de riesgo en los puertos. Conviene asimismo

Predicción de tsunamis

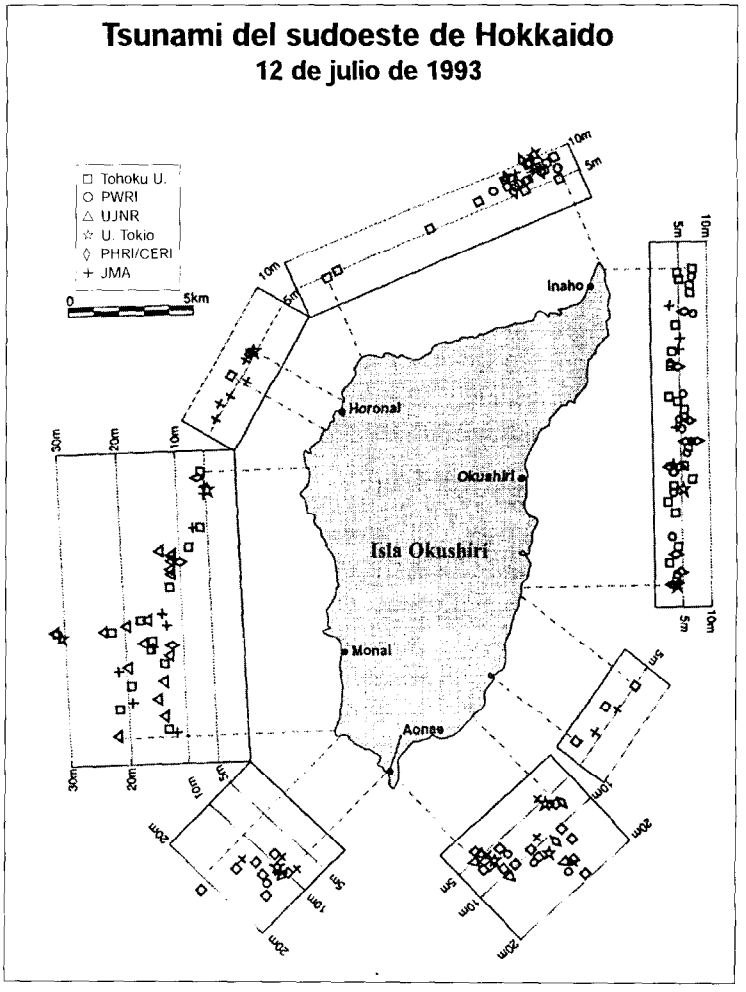
Ejemplo: Tsunami de las Islas Kuriles del 4 de octubre de 1994



Los registradores de presión de fondo en alta mar suministran una medición más directa de un tsunami que los mareógrafos instalados en la costa, y estas señales son más útiles para predecir los efectos de un tsunami en el litoral. Este ejemplo muestra el reciente tsunami de Shikotan, registrado en alta mar y cerca de la costa, e indica que puede haber grandes diferencias entre las señales de un mismo tsunami, registradas en mareógrafos muy poco espaciados emplazados en las costas.

elaborar técnicas para aplicar modelos en tiempo real durante los tsunamis, que ayuden a los centros de alerta y administradores de situaciones de emergencia a predecir los efectos.

Es menester elaborar por anticipado modelos de las señales de los tsunamis en los instrumentos fundamentales utilizados para medir el nivel del agua, a fin de que los centros de alerta puedan hacer evaluaciones más rápidas y exactas de la gravedad del tsunami. Por ejemplo, existen cerca de veinte mareógráfos situados muy estratégicamente en el interior y a lo largo de las costas de la cuenca del Pacífico, y hay sólo unas pocas zonas que pueden generar fenómenos que afecten a todo el Pacífico. Se necesitan mareogramas teóricos que permitan combinar en forma adecuada los epicentros y mareógrafos, como referencia para que los centros de alerta puedan evaluar los tsunamis potencialmente perjudiciales a medida que se propagan en la cuenca del Pacífico.



Valores del alcance máximo de las aguas en la fase de inundación tierra adentro correspondientes al tsunami que azotó la isla de Okushiri, Japón, la noche del 12 de julio de 1993.

En los últimos años, algunos tsunamis poco usuales (por ejemplo, en 1992 en Nicaragua, en 1994 en Indonesia y en febrero de 1996 en Perú) han añadido una nueva dimensión a la investigación sobre los tsunamis, ya que las amplitudes máximas de estos tsunamis fueron excesivas en relación con la magnitud de los seísmos que los generaron. Los sismólogos saben que la escala de magnitud de terremotos basada en las ondas superficiales de un periodo de veinte segundos alcanza el punto de saturación más allá de un valor aproximado de 8, y no representa con precisión la magnitud de los seísmos de mayor envergadura. Esto puede ser una de las razones de la desproporción. Con todo, incluso el momento sísmico, un parámetro más representativo del tamaño del seísmo basado en ondas sísmicas de una duración mucho más larga y que no plantea el problema de la saturación, al parecer no puede explicar tampoco la gran amplitud de algunos tsunamis. Se señala que estos seísmos pertenecen a un tipo especial denominado "seísmos de tsunamis" ("tsunami earthquake") o "seísmos lentos". Su proceso de ruptura puede tomar de uno a varios minutos, a diferencia de un seísmo ordinario o de impulso que lleva de unos pocos segundos a algunas decenas de segundos, y su profundidad de falla puede ser muy próxima al fondo del mar. Durante esta ruptura lenta es bastante posible que se acumule un mayor porcentaje de energía sísmica que se incorpora al tsunami, en comparación con la energía sísmica que se transfiere al tsunami durante un seísmo de impulso, que es apenas del 10%. En la actualidad, no existe una explicación totalmente satisfactoria de por qué se producen estos tsunamis de una amplitud tan desproporcionada, y es un ámbito que los especialistas deberán seguir investigando.

Otro aspecto al que la investigación deberá prestar atención es la influencia de la amplificación de la resonancia para explicar por qué la amplitud de los tsunamis es tan importante a lo largo de las costas de las bahías y golfos, mientras que es mucho menor en otros emplazamientos cercanos.

En muchas zonas del Pacífico los datos históricos sobre tsunamis son muy limitados o incluso inexistentes. La investigación destinada a encontrar y analizar pruebas de la existencia de paleotsunamis puede ayudar a ampliar los registros sobre los tsunamis en algunas regiones costeras más atrás en el tiempo, y permitir una mejor comprensión de los riesgos de este fenómeno en esas zonas y zonas próximas, así como en toda la región del Pacífico.

Aplicaciones recientes de la investigación

Ultimamente ha habido muchos ejemplos de la contribución de las actividades de investigación a la reducción de los efectos de los tsunamis. Se enuncian a continuación sólo algunos:

Cartografía de las inundaciones provocadas por tsunamis: En la actualidad existe la tecnología para producir mapas de inundaciones como base de la preparación para casos de emergencia. En el marco del proyecto de Intercambio de Modelos de Inundaciones provocadas por Tsunamis (TIME), apoyado por el ITSU, se ha transferido un modelo numérico de inundaciones elaborado por el Profesor Shuto, del Japón, y se han proporcionado cursos de capacitación sobre su utilización a muchos Estados Miembros. Especialistas de los Estados Unidos han mejorado la técnica de cartografía para los fenómenos locales, incorporando otros efectos como temblores, licuefacción y deslizamientos de tierras producidos por los terremotos. Estas tecnologías aportan nuevos instrumentos para localizar las zonas costeras amenazadas y el nivel de riesgo que puede afectarlas en el caso de un tsunami de origen cercano o lejano.

Datos sobre el avance de las aguas en tierra provocado por tsunamis: La precisión de los modelos antes mencionados se basa en la observación de tsunamis y su comparación con simulaciones numéricas. Desde 1992, ha habido ocho tsunamis destructores que han sido estudiados por especialistas de todo el mundo. Los datos acopiados con estas observaciones han suministrado una abundante y nueva información sobre la dinámica de los tsunamis, en especial sobre la fase de inundación tierra adentro. Estos datos se están utilizando para validar y mejorar los modelos numéricos.

Datos sobre los tsunamis en alta mar: Cuando los tsunamis interactúan con las costas y los puertos, la batimetría y la topografía locales transforman y modifican sus amplitudes y periodos. Por consiguiente, una señal de tsunami registrada dentro de un puerto por un mareógrafo aporta información poco útil para predecir los efectos del tsunami en otros lugares. Para obtener una predicción exacta, son necesarias mediciones más directas del tsunami en alta mar. A esos efectos, se está instalando frente a las costas de los Estados Unidos una red de mareógrafos de presión del fondo oceánico en alta mar elaborados recientemente, que suministra información en tiempo real.

Tecnología de localización y medición de la magnitud de seísmos: Francia ha establecido un sistema sísmico en banda ancha de tres componentes en una estación única a los fines de la alerta contra tsunamis, denominado TREMORS (Sistema de Evaluación en Tiempo Real del Peligro de los Tsunamis por el Momento Sísmico). Este sistema proporciona una estimación rápida y automática de la localización de un seísmo y a continuación calcula su momento sísmico, que es el mejor factor de estimación del potencial tsunamigénico. Los buenos resultados obtenidos por TREMORS en Tahití indican que otros países pueden utilizar esta tecnología, y se han instalado últimamente sistemas en Chile, Indonesia, Brunei, Perú, Corea y el PTWC, así como en Portugal y otros lugares de Europa.

Es necesario proseguir la investigación sobre los tsunamis para apoyar y mejorar todos los aspectos del proceso de mitigación de sus consecuencias. Se alienta a los Estados Miembros a que presten su apoyo a todos los ámbitos de investigación que permitan mejorar la comprensión del fenómeno de los tsunamis, facilitar la evaluación de los riesgos que entraña, contribuir a que los centros de alerta intervengan de forma más rápida, precisa y fiable, mejorar la eficacia de los programas educativos y aportar a los administradores de situaciones de emergencia y responsables políticos mejores instrumentos de preparación e intervención. Las tecnologías elaboradas recientemente que contribuyen a las actividades de mitigación de los efectos del tsunami se pondrán en práctica tan pronto como sea posible.

CONCLUSIONES

Si bien en los últimos años se ha avanzado mucho en el mejoramiento del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico, aún queda mucho por hacer para mitigar eficazmente el riesgo que plantean los tsunamis de origen cercano y lejano en toda la cuenca del Pacífico. Entre los aspectos de la labor que son especialmente importantes para mejorar el Sistema y que deberían recibir la máxima prioridad en las actividades del ITSU en los próximos años pueden mencionarse las siguientes:

- Mapas de inundaciones causadas por tsunamis – Utilización de un modelo numérico y de datos históricos para levantar mapas de posibles inundaciones como base de evaluación de los riesgos, así como para preparar mapas y planos de evacuación, y para promover otras actividades fundamentales de mitigación en el plano local, incluidas la educación del público, la planificación de la ordenación territorial y las obras de ingeniería.
- Datos históricos – Conversión de los datos históricos en un formato de base de datos común y elaboración de instrumentos que permitan poner esos datos rápidamente a disposición de los particulares y oficinas que los necesitan en los ámbitos de la investigación y la mitigación.
- Enseñanza en materia de tsunamis – Continuación de la elaboración de materiales y programas pedagógicos que permitan mejorar la sensibilización y educación acerca de los tsunamis en beneficio del público, los encargados de los centros de alerta, los administradores de situaciones de emergencia y los responsables políticos.
- Centros de alerta – Establecimiento de nuevos centros regionales de alerta contra la amenaza de tsunamis locales en zonas no abarcadas, y elaboración de tecnologías y metodologías para mejorar la velocidad, precisión y fiabilidad de todos los centros de alerta contra los tsunamis.
- Instrumentos de medición del nivel del agua – Mejoramiento de la distribución estratégica de los instrumentos de medición del nivel del agua y la calidad de las señales que registran, con fines de alerta y de investigación.
- Actividades operacionales – Las autoridades, los observatorios y los centros de alerta locales deben enviar las observaciones sobre los tsunamis inmediatamente a sus centros nacionales de alerta, que a su vez remitirán esa información de inmediato al PTWC.
- Nuevos tsunamis - Acopio y archivo de todos los datos mareográficos, así como de las mediciones del alcance máximo de las inundaciones después de cada seísmo y/o tsunami importante. La ausencia de una señal de tsunami en un registro es igualmente importante, por lo que esa información también debe conservarse.
- Comunicaciones – Información actualizada sobre los nuevos sistemas de comunicación que pueden ser más eficaces para los centros de alerta y otros fines, y adopción de estos sistemas en el TWSP según proceda.
- Investigación – Estímulo y apoyo a la investigación sobre tsunamis y todos los temas relacionados con los tsunamis que puedan contribuir a mejorar las actividades de mitigación de sus efectos.

Para ser eficaces, los componentes fundamentales del plan de mitigación de los efectos de los tsunamis (evaluación de riesgos, alerta, preparación e investigación) deben ser altamente interactivos y estar bien coordinados. El ITSU, como órgano de coordinación de los especialistas, administradores de situaciones de emergencia, planificadores en casos de emergencia y responsables de los centros de alerta, y en el que están representados todos los países afectados, es idóneo para aplicar con éxito este plan.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento al autor, Sr. G. C. Dohler, y a todas las demás personas que contribuyeron a la primera edición de este documento. El texto revisado de la segunda edición fue redactado por partes por diversos autores, incluido un grupo especial designado en la 16ª reunión del ITSU, y compuesto por el ex Director interino del ITIC, Sr. D. Sigrist, y los representantes de Francia y México, así como un grupo de redacción designado en la 15ª reunión del ITSU, y compuesto por el Presidente del ITSU, Sr. H. Gorziglia, el ex Director del ITIC, Sr. C. McCreery, el experto australiano en tsunamis, Sr. T. Murty y el representante de la Comisión de la IUGG sobre Tsunamis, Sr. E. Bernard. El Enlace Nacional en el Japón, Sr. Y. Sawada, aportó muchas observaciones acertadas e información adicional. Agradecemos también los comentarios recibidos de muchos otros Estados Miembros, a través de sus Enlaces y especialistas nacionales. El proyecto final fue examinado en la reunión de la Mesa del ITSU de enero de 1999 por el Presidente del ITSU, Sr. H. Gorziglia, el Vicepresidente del ITSU, Sr. F. Schindele, el Enlace Nacional de la República de Corea, Sr. S. Kim, el Director del PTWC, Sr. C. McCreery, el Director del ITIC, Sr. Blackford y el Secretario Técnico de la COI, Sr. I. Oliounine.

LISTA DE ACRÓNIMOS

AFTN	Red de Telecomunicaciones Fijas Aeronáuticas
AGSO	Australian Geological Survey Organization (Australia)
COI	Comisión Oceanográfica Intergubernamental
DHN	Dirección de Hidrografía y Navegación del Perú (Perú)
ETDB	Base Experta de Datos sobre Tsunamis
ETOS	Earthquake and Tsunami Observation System (Sistema de Observación de Seísmos y Tsunamis)
GIC/ITSU	(o ITSU) Grupo Internacional de Coordinación del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico
GMS	Satélite Meteorológico Geoestacionario (Japón)
GOES	Satélite Geoestacionario Operacional de Estudio del Medio Ambiente (Estados Unidos)
HTDB	Base de Datos Históricos sobre Tsunamis
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (Nicaragua)
ITIC	Centro Internacional de Información sobre los Tsunamis
ITSU	(o GIC/ITSU) Grupo Internacional de Coordinación del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico
IUGG	Unión Internacional de Geodesia y Geofísica
JMA	Organismo Meteorológico del Japón (Japón)
KMA	Administración Meteorológica de Corea (República de Corea)
NGDC	National Geophysical Data Center (Estados Unidos)
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (Estados Unidos)
NTF	National Tidal Facility (Australia)
NWS	Servicio Meteorológico Nacional de los EE.UU.
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OSSO	Observatorio Sismológico del Suroccidente (Colombia)
PTWC	Centro de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico
SHOA	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (Chile)
SMT	Sistema Mundial de Telecomunicación
SNAM	Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (Chile)
TIME	Proyecto de Intercambio de Modelos de Inundaciones provocadas por Tsunamis
TREMORS	Sistema de Evaluación en Tiempo Real del Peligro de los Tsunamis por el Momento Sísmico
TWSP	Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
WC/ATWC	Centro de Alerta contra los Tsunamis de Alaska y la Costa Occidental (Estados Unidos)
WDC-A	Centro Mundial de Datos - A