

## REDES DE VIGILANCIA SISMICA Y VIGILANCIA DE TSUNAMIS

### *Seismic and tsunami monitoring networks*

Sara Figueras Vila (\*)

#### **RESUMEN**

*El impacto de los fenómenos naturales sobre la población mundial es cada vez más importante debido al crecimiento de la población. Además ésta se concentra en zonas costeras por lo que aumenta el riesgo ante los fenómenos naturales de origen marino como los tsunamis. En el círculo de fuego de Pacífico existen actualmente sistemas internacionales, nacionales y regionales de alarma de tsunamis. En este capítulo se explica la evolución y el funcionamiento de los sistemas de alerta de tsunami, y las medidas de protección a tener en cuenta para reducir sus efectos sobre la población.*

#### **ABSTRACT**

*The impact of the natural phenomena on the world-wide population is every more important due to the growth of the population; in addition this one is concentrated in coastal zones, so the tsunami risk increases. In the Pacific ring of fire they operate international, national and regional tsunami alert systems. In this chapter the evolution and the operation of these tsunami alert systems are explained and a tsunami protection measures in order to mitigate their effects on the population are proposed.*

**Palabras clave:** *Redes sísmicas. Sistemas de alarma/alerta de tsunamis. Medidas de protección.*

**Keywords:** *Seismic networks. Tsunami warning systems. Mitigation measures.*

## INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se ha visto como uno de los fenómenos que pueden desencadenar un tsunami es la ocurrencia de un terremoto, de determinadas características, con epicentro submarino. Así pues, la infraestructura necesaria para una red de vigilancia de tsunamis tendrá que apoyarse en una red de vigilancia sísmica además de medios informáticos y técnicos.

Cuando las ondas sísmicas son detectadas y registradas en varias estaciones sismológicas, es posible determinar el lugar de origen del sismo, el momento en que se produjo y su magnitud. El objetivo de un sistema de vigilancia de tsunamis será determinar si el sismo puede haber generado un tsunami y proporcionar a la población información y alarmas en forma oportuna y efectiva con el fin de minimizar los efectos del tsunami.

En este capítulo se realiza una descripción del estado actual de las redes de vigilancia sísmica, se presenta el sistema de alarma de tsunami del Pacífico, las medidas de protección contra tsunamis, como actuar en caso de tsunami y para finalizar se explicarán las acciones que se han realizado recientemente para la puesta en marcha del sistema de alerta contra tsunamis en el Océano Índico y primeras actuaciones para un sistema de alerta de tsunamis en el Caribe y el Mediterráneo.

## REDES SÍSMICAS

Los grandes avances en el campo de la sismología a partir de finales del siglo XX tienden al desarrollo de instrumentos cada vez más perfeccionados y a la colaboración entre centros de observación y tratamiento de señales extendidos por todo el mundo. Actualmente, existen varias instituciones que se dedican a determinar los parámetros de los sismos a nivel mundial, con lo cual se pueden caracterizar las zonas sísmicamente más activas o aquellas de baja sismicidad.

Las coordenadas espaciales y temporales así como la magnitud de un terremoto se determinan a partir de los datos enviados por los diferentes observatorios mundiales, centros internacionales, nacionales o regionales que editan periódicamente boletines sísmicos. Se incide especialmente en la calidad y la homogeneidad de los instrumentos. Actualmente se cuenta con una red de varios miles de estaciones sísmicas digitales distribuidas sobre el planeta. Por tanto, es posible determinar rápidamente el hipocentro de todos los sismos de magnitud superior a 4, sea cual sea su región de origen. Entre los centros sismológicos más conocidos citamos el Internacional Seismological Center (ISC) instalado en Newbury (Gran Bretaña), el National Earthquake Information Center (NEIC) del Geological Survey (Estados Unidos), el Centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM) instalado en París, el Labo-

(\*) Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). Parc de Montjuïc s/n. 08038 Barcelona. E-mail: Sfigueras@icc.es

ratoire de Détection et de Geophysique (LDG) del Centre d'Etudes Atomiques (CEA) en la región parisina, el Reseau Nacional de Surveillance Sismique (RENASS) en Estrasburgo, la red IRIS para el tratamiento rápido de centenares de registros digitales creada por los Estados Unidos y otras instaladas en Alemania, Italia y Japón.

### Redes sísmicas en España

En España existe la red sísmica nacional gestionada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) (<http://www.geo.ign.es>), distribuida en todo el territorio español, que cuenta actualmente con 78 estaciones, 35 de ellas conectadas en tiempo real (con líneas telefónicas dedicadas), 33 conectadas vía satélite y 10 conectadas vía telefónica (4 de ellas mediante interrogación), con el centro de Recepción de Datos Sísmicos ubicado en Madrid, donde se realizan automáticamente las localizaciones hipocentrales de los terremotos y se envía la información a los organismos de protección civil, y a diversos centros sismológicos españoles y extranjeros.

En las regiones de España con mayor actividad sísmica: sur de la Península y Pirineos existen también redes sísmicas regionales, que están compuestas por varias estaciones sísmicas instaladas a una distancia entre ellas mucho más próxima que las redes nacionales, siendo su finalidad la vigilancia de una región de riesgo sísmico considerable. Destacamos la red Sísmica de Andalucía gestionada por el Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos (IAGPDS) con sede en Granada, que desde el año 2000 ha comenzado la remodelación de su red sísmica con la incorporación de equipos de banda ancha. Esta red constará de un total de 15-16 estaciones. La red sísmica de Catalunya, gestionada por el Servei Geològic de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) (<http://www.icc.es/sismes>), también en fase de re-

modelación constará de 20 estaciones; actualmente está compuesta por 9 estaciones permanentes de banda ancha con recepción continua de datos en tiempo real y un sistema automático de envío de alertas a través de mensajes SMS. Recientemente se ha instalado un sismómetro submarino permanente (OBS) a 50 km de la costa de Tarragona, cerca de la plataforma petrolífera Casablanca (figura 1). Este sismómetro se integrará en la Red Sísmica de Catalunya y va a suponer una mejora en el conocimiento de la sismicidad de la zona. El sismómetro dispone además de un sensor de presión que se utilizará, entre otras aplicaciones, para detectar el paso de ondas marinas generadas por terremotos submarinos.

Existen también redes sísmicas temporales que se utilizan para intervenciones específicas, puntuales y de tiempo limitado. Por ejemplo se usan para conocer la sismicidad de una región donde se quiere construir una presa o una central nuclear, también se despliegan después de un sismo importante, cerca del epicentro para registrar el enjambre de pequeños terremotos que siguen al principal (réplicas) y que permiten obtener información de la falla que ha originado el sismo principal.

### REDES DE VIGILANCIA DE TSUNAMIS Y SISTEMAS DE ALERTA

Actualmente, muchas ciudades alrededor del Pacífico, sobretodo en Japón y en Hawaii, disponen de sistemas de alarma y planes de evacuación en caso de un tsunami peligroso. Diversos institutos sismológicos de diferentes partes del mundo se dedican a la previsión de tsunamis, y la evolución de estos es monitorizada por satélites. La predicción de tsunamis sigue siendo hoy en día poco precisa. Aunque se puede calcular el epicentro de un gran terremoto submarino y el tiempo que puede tardar

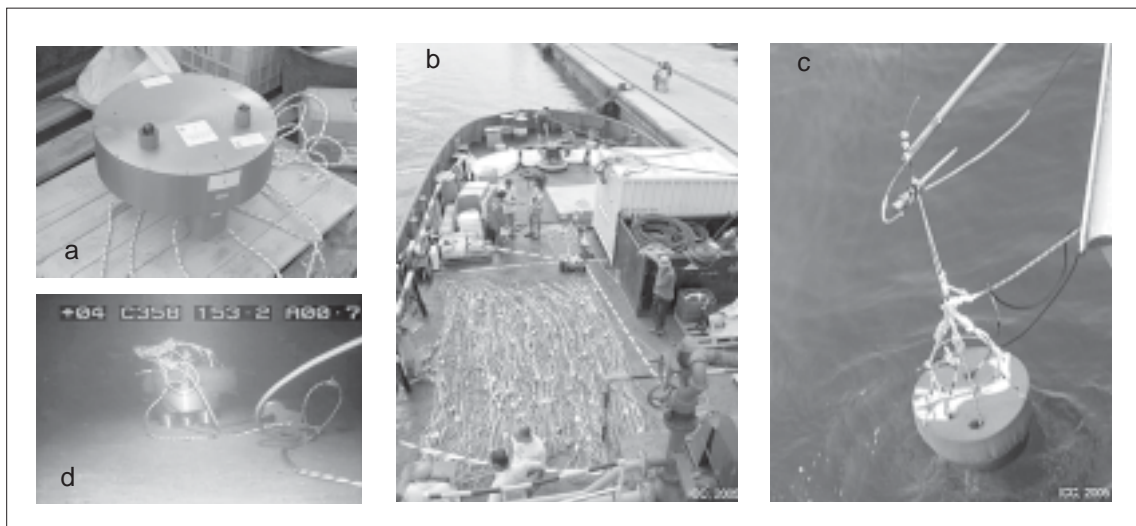


Fig.1: a) Imagen del sismómetro submarino (OBS), antes de su instalación; b) cubierta de popa del barco *Bolulu Abrego* antes durante la preparación del material, en el puerto comercial de Sant Carles de la Ràpita; c) momento de la inmersión del OBS; d) imagen del OBS depositado en el fondo marino, enviada por un robot submarino.

en llegar un tsunami, es casi imposible saber en el momento si ha habido grandes movimientos del suelo marino, que son los que producen tsunamis. Como resultado de todo esto es muy común que se produzcan falsas alarmas.

### **Evolución de los sistemas de alerta de tsunamis**

El primer sistema, bastante rudimentario, para alertar de la llegada de un tsunami fue puesto a prueba en Hawai en la década de 1920. En abril de 1946 ocurrió en Alaska un sismo que originó un tsunami, que afectó las costas de Hawai causando grandes pérdidas humanas y materiales. Los Estados Unidos crearon un sistema local de alerta de tsunamis para la isla Hawai, que tiene por objetivo poner sobre aviso a la población de estas islas frente a los tsunamis producidos en cualquier punto del Pacífico

A partir del año 1950 se establecieron sistemas regionales de alerta y aviso contra los tsunamis. Entre los sistemas nacionales más sofisticados están los de Japón, la ex Unión Soviética y los Estados Unidos de América. En Europa, únicamente Francia participa como estado miembro en el sistema internacional de alerta del Pacífico.

Los grandes sismos que generaron un tsunami en mayo de 1960 (Chile) y en marzo de 1964 (Alaska), centraron la atención en la necesidad de crear un Centro Internacional de Alerta de tsunamis. Con la experiencia del sistema de alerta de Hawai, los Estados Unidos aceptaron en 1965 transformarlo en el Sistema Internacional de Alerta de tsunamis del Pacífico (SAT).

### **El sistema internacional de alerta de Tsunamis del Pacífico (SAT).**

El SAT es un programa internacional, dirigido por la NOAA (Nacional Oceanic and Atmospheric Administration) de los EEUU. Su servicio de prevención y protección incluye una cadena de estaciones sismológicas que determinan rápidamente el epicentro y de otros centros equipados con mareógrafos para seguir el desarrollo de la oleada y establecer la velocidad de propagación del tsunami que en el Pacífico llega a ser de 800 Km/h. Para poder deducir la posible trayectoria y velocidad de las ondas, se debe tener en consideración el relieve submarino, y para calcular la altura de las mismas se debe conocer la configuración de la costa. El sistema se completa con un eficaz servicio de comunicaciones y de difusión operadas por la mayor parte de las naciones alrededor del Océano Pacífico.

El objetivo operacional del Sistema de Alarma de Tsunami (SAT) es pues detectar y ubicar los terremotos ocurridos en la Región del Pacífico, determinar si ellos han generado tsunami, y proporcionar información de tsunami y alarmas en forma oportuna y efectiva a la población del Pacífico para minimizar su peligrosidad, especialmente sobre la vida y el bienestar de los seres humanos. Para lograr este objetivo, el SAT controla de forma continua la acti-

vidad sísmica y el nivel de la superficie del océano en la Cuenca del Pacífico (fig 2).



*Fig. 2. Estaciones sismológicas y de marea del sistema de Alarma de Tsunami del Pacífico.*

Administrativamente, las naciones participantes están organizadas bajo la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) como el Grupo Internacional de Coordinación para el Sistema de Alarma de Tsunami en el Pacífico (GIC/ITSU). Además, la comisión COI mantiene, desde el año 1965, un centro internacional de información responsable de aconsejar técnicamente sobre el equipo necesario y proveer asistencia técnica, así como de coordinar el desarrollo de un sistema de observación y almacenamiento de los datos obtenidos sobre los tsunamis observados. El Centro Internacional de Información de Tsunamis (ITIC) fue establecido a petición de la COI y tiene entre sus roles el ayudar a los estados miembros del GIC/ITSU a mitigar los efectos de los tsunamis a través del Pacífico.

### *El sistema DART (Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)*

En la figura 3 se presenta el dispositivo de detección de tsunamis del sistema DART que forma parte del sistema norteamericano de evaluación y detección de tsunamis de la NOAA. El sistema consta de un dispositivo de detección, que se coloca a 5000 metros de profundidad pendiente de un sistema de flotación de esferas de cristal, el dispositivo envía señales a una boya que contiene además distintos sensores y antenas que permiten enviar la información al satélite GOES. Este transmite los datos a los distintos centros de alerta y a la NOAA. La NOAA tiene 6 dispositivos desplegados en el Pacífico Oriental.

En la figura 4 se puede observar el dispositivo en detalle que consta de un BPR (Bottom Pressure Recorder) que detecta variaciones de la columna de agua que está por encima midiendo cambios en la frecuencia de vibración de un haz de cristal de cuarzo. Normalmente, éste vibra a frecuencia constante, al paso de una onda del tsunami detecta variaciones de presión entre el paso de la cresta y el valle cuando, mediante un algoritmo de detección, se registran variaciones de presión superiores a 3 cm en 15

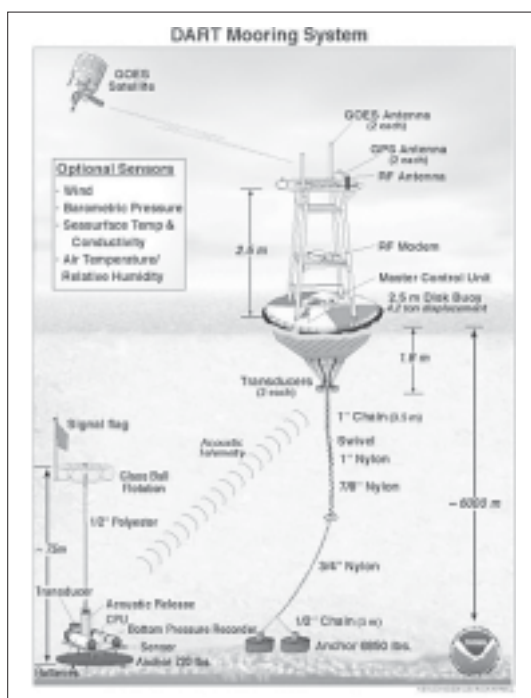


Fig. 3. Componentes del sistema DART.



Fig. 4. Dispositivo de detección de Tsunamis. 1: BPR; 2: Módem acústico; 3: Emisor acústico; 4: CPU; 5: Baterías.

segundos se activa un protocolo de aviso emitiendo la señal a la boya de superficie. El dispositivo tiene además un ancla que evita que se desplace por el fondo marino, un módem acústico que transforma la señal del sensor en una onda acústica, un emisor acústico que emite la señal del BPR, una CPU de titanio que contiene todas las piezas eléctricas que regulan el manómetro y el módem y una batería que alimenta los dispositivos electrónicos de la CPU, el transductor y el sensor.

#### Procedimientos operacionales del SAT

El Centro de Alarma de Tsunami del Pacífico (PTWC) es el centro operativo para el Sistema de Alarma de Tsunami del Pacífico. El PTWC recolecta y evalúa los datos proporcionados por los países participantes y disemina los boletines informativos apropiados a todos los participantes respecto a la ocurrencia de un sismo importante, y la generación

posible o confirmada de un tsunami.

El funcionamiento del Sistema comienza con la detección, en cualquier observatorio participante, de un sismo de tamaño suficiente como para activar la alarma adjunta al sismógrafo de esa estación. El personal de la estación interpreta inmediatamente sus sismogramas y envía sus lecturas al PTWC. Al recibir de un informe proveniente de uno de los observatorios sismológicos participantes, o como consecuencia de la activación de su propia alarma sísmica, el PTWC envía mensajes solicitando datos a otros observatorios del Sistema.

Cuando el PTWC haya recibido datos suficientes para ubicar el sismo y calcular su magnitud, se toma una decisión respecto a acciones posteriores. Si el sismo es lo suficientemente grande como para causar un tsunami y está localizado en un área donde es posible su generación, el PTWC solicitará que las estaciones mareográficas ubicadas cerca del epicentro, revisen sus registros en busca de evidencias del tsunami.

Se transmiten boletines de alarma/alerta de tsunami a las agencias de difusión en caso de sismos de magnitudes superiores a 7,5 (mayores a 7,0 en la región de las islas Aleutianas), alertando acerca de la posibilidad de que haya sido generado un tsunami y proporcionando datos que pueden ser comunicados al público, de tal manera que puedan tomar precauciones preliminares.

Se evalúan los informes recibidos de las estaciones mareográficas; si ellos muestran que se ha generado un tsunami que puede afectar a la población en parte o en la totalidad del Pacífico, la emisión del boletín de alarma/alerta de tsunami se extiende a la totalidad del Pacífico. Entonces, las agencias de difusión implementan planes previamente establecidos para la evacuación de la gente de los lugares peligrosos. Si el informe de la estación mareográfica indica que se ha generado un pequeño tsunami o ninguno, el PTWC disemina una cancelación de su alarma/alerta de tsunami previa (Loca y Recabarren, 1994).

#### Sistemas nacionales o regionales de alarma de tsunami

En algunas áreas de la Cuenca del Pacífico, existen sistemas nacionales o regionales de alarma de tsunami para proporcionar información y alarmas de tsunami efectivas y oportunas a las poblaciones afectadas. Para aquellas zonas costeras más próximas al área origen, es obvia la necesidad de un proceso rápido de los datos y de las comunicaciones. Debido al tiempo que se gasta en recolectar los datos sísmicos y de marea, las alarmas proporcionadas por el PTWC no pueden proteger todas las áreas en el Pacífico contra los tsunamis generados en aguas adyacentes. Para proporcionar algún grado de protección, dentro de la primera hora después de la generación de tsunamis en el área local, se han establecido en algunos países sistemas de alarma de tsunami nacionales y regionales. Los sistemas regionales proporcionan la alerta más rápida posible a

la población, dentro de la vecindad inmediata al epicentro del sismo, al diseminar alarmas inmediatas basadas en la información del sismo, sin esperar la confirmación del tsunami (Campos, 1992).

Para funcionar de manera efectiva, estos centros regionales, generalmente, tienen datos de varias estaciones sísmicas y de mareas que envían sus datos por enlaces de microondas a una oficina central. Los sismos locales son normalmente localizados en 15 minutos o menos, y se difunde una alarma basada solamente en la evidencia sísmológica a la población del área. Ya que la alarma es proporcionada sólo en base a datos sísmicos, se puede anticipar que ocasionalmente se darán alarmas cuando no se ha generado un tsunami. Como la alarma ha sido entregada sólo a áreas restringidas y la confirmación de la existencia o no existencia de un tsunami es obtenida rápidamente, se logra un nivel más alto de protección.

### MEDIDAS DE PROTECCIÓN CONTRA TSUNAMIS

Es imposible proteger completamente cualquier costa del impacto de los tsunamis. Algunos países han construido rompeolas, diques y varias otras estructuras para tratar de debilitar la fuerza de los tsunamis y para reducir su altura. En Japón, los ingenieros han construido enormes terraplenes para proteger los puertos y rompeolas para angostar las bocas de las bahías en un esfuerzo para desviar o reducir la energía de las poderosas olas (fig. 5).



Fig. 5. Tipo de rompeola diseñado en Tsu-Shi (Japón) como defensa contra tsunamis.

Pero ninguna estructura defensiva ha sido capaz de proteger las costas bajas. En efecto, las barreras pueden aumentar la destrucción si son sobrepasadas por el tsunami, lanzando trozos de cemento como proyectiles.

En algunos casos, los árboles pueden ofrecer algo de protección ante un tsunami. Las arboledas solas o como complemento a estructuras de protección costera, pueden disipar la energía del tsunami y reducir su altura. En el tsunami que afectó las costas del Océano Índico se ha observado que las costas en las que se conservaban manglares y bancos de corales, éstos actuaron como disipadores de parte de la energía del tsunami y, por tanto, los efectos fueron menos catastróficos.

La preparación en caso de emergencia consiste en las actividades efectuadas por una comunidad con el objetivo de maximizar su eficiencia inmediatamente antes y durante el período de respuesta a la emergencia. En la mayor parte de los tsunamis, la gran mayoría de las víctimas emanan de no saber qué hacer o a dónde ir si se sabe de la llegada de un tsunami.

En la figura 6, se muestran distintas señales que se utilizan para indicar zonas peligrosas en caso de tsunami y para marcar rutas de evacuación. Se presenta también un plano detallado de la Isla de Westport (Washington) donde se indican las zonas peligrosas en caso de tsunami y las rutas de evacuación hacia puntos elevados.

Los tsunamis de origen local son los más peligrosos, la primera ola puede llegar entre 10 a 30 minutos de haberse producido el sismo. Estos datos son básicos para planificar la evacuación, porque es el tiempo que se tiene para evacuar a la población de la zona inundable.



Fig. 6. Mapa de peligrosidad de tsunamis en la isla de Westport junto con señales indicativas de zona de peligro de tsunami y ruta de evacuación.

## ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMA DE ALERTA DE TSUNAMIS.

El 30 de junio de 2005, nace oficialmente el Sistema de Alerta contra Tsunamis y Atenuación de sus Efectos en el Océano Índico (IOTWS) que el Grupo Intergubernamental de Coordinación (CIG) se encargará de administrarlo. La 23ª reunión de la Asamblea de la Comisión Oceanográfica Internacional (COI) de la UNESCO adoptó también resoluciones para crear organismos similares en el Caribe y regiones adyacentes así como en el Atlántico Noroccidental y en el Mediterráneo y sus mares adyacentes.

El sistema de alerta contra tsunamis y atenuación de sus efectos en el Océano Índico consistirá en una red coordinada de sistemas nacionales cuyos bienes e instalaciones pertenecerán y estarán gestionados por los Estados Miembros que alberguen esos sistemas o se responsabilicen de ellos. El sistema, cuyos trabajos ya han comenzado, podría ser plenamente operativo en julio de 2006. Estará compuesto por redes sismográficas perfeccionadas, redes de mareógrafos que transmiten datos en tiempo real y captores de presión en aguas profundas, así como de centros nacionales de alerta conectados con sistemas nacionales de gestión de catástrofes.

Actualmente se está implementando un sistema de alerta de tsunamis en el sur-oeste del Mar Egeo. Se trata del Tsunami Warning System (TWS, Grecia) que consta de 5 estaciones sísmicas ubicadas en el sur-este de Peloponnisos, en el oeste y centro de Creta y en la Isla de Santorini; el sistema de medición de mareas consta de dos estaciones y consta de dos sensores neumáticos de medición del nivel del agua conectados via módem a líneas telefónicas de la estación sismográfica hacia la unidad de adquisición central en Atenas (Zchau y Küppers, 2003).

LA COI ha decidido establecer también un grupo de trabajo que se encargará de elaborar un marco para poner en marcha un Sistema Mundial de Alerta Rápida contra los tsunamis y otras catástrofes relacionadas con los Océanos.

## CONCLUSIÓN

En este capítulo se ha visto como el hecho de disponer de sistemas de aviso/alerta de tsunamis y planes de emergencia y actuación bien definidos y coordinados, permite saber cuando se ha originado un tsunami y estimar la hora de llegada a la costa en un tiempo prudencial.

En el mar Mediterráneo se registran un diez por cien del total de los tsunamis que se producen a nivel mundial. Ha sufrido históricamente tsunamis de gran violencia, por lo que el riesgo de tsunamis es real.

Actualmente, la zona del Mediterráneo más sensible a los efectos de un tsunami se sitúa en el espacio que forman el mar Balear, el de Alborán, la Hoya Argelina, el mar de Liguria, el Tirreno y el canal de Sicilia. En las costas adyacentes existen ciudades densamente pobladas susceptibles de ser inundadas parcialmente en caso de tsunami. Por tanto, existe una necesidad urgente de instalar sensores de alerta rápida que permitan conocer con anticipación suficiente la aparición de tsunamis para activar los planes de emergencia.

## BIBLIOGRAFÍA

Campos, L. (1992). El riesgo de tsunamis en España. Análisis y valoración geográfica. Monografías 9. IGN/MOPT. Madrid, pp 204.

Lorca, E. y Recabarren, M.:(1994). Terremotos y Tsunamis o Maremotos. Material de consulta de la Educación Chilena. pp127.

Zchau J. y Küppers A.,(2003).(Editores) Early warning system for natural disaster reduction. Germany.

Webs:

<http://portal.unesco.org/>

<http://www.erh.noaa.gov/> ■