Capítulo 6

Apoyo a la toma de decisiones sobre tsunamis

Una vez que se detecte un terremoto y se analicen su magnitud y ubicación, los centros de alerta de tsunamis aplican una serie de criterios y utilizan modelos numéricos (si los hay) para determinar si cabe emitir una alerta inicial de tsunami. Los centros de alerta requieren información adicional para mejorar el pronóstico después de la alerta inicial. Este capítulo presenta los programas de apoyo a la toma de decisiones sobre la emisión de alertas empleados por el personal de turno de un sistema de alerta de tsunamis:

- **Criterios** para emitir alertas con base científica y en eventos históricos.
- Software de **conciencia situacional** que ayuda al personal de turno a detectar eventos en tiempo real.
- **Modelos numéricos** que simulan la altura de las olas de tsunami con base en estudios científicos, eventos históricos y observaciones terrestres.
- **Evaluación del impacto** de los eventos con base en modelos de inundación,

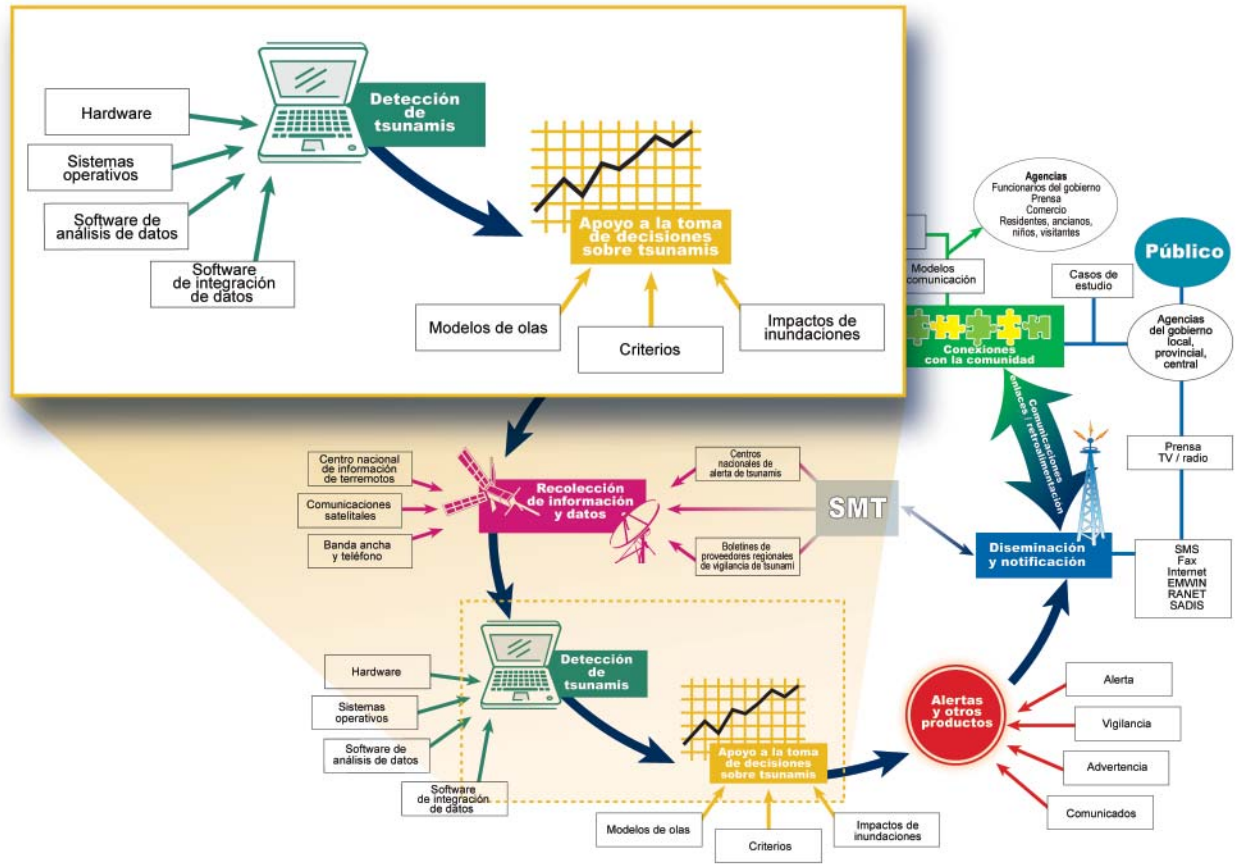


Figura 6-1. Rol del apoyo a la toma de decisiones en un sistema integral de alerta de tsunamis.

- **Entrenamiento** del personal de turno.
- **Investigación y desarrollo** para mejorar las operaciones y productos del centro.

La infraestructura necesaria para los programas de apoyo a la toma de decisiones sobre la emisión de alertas, que incluye el hardware, los sistemas operativos, los sistemas de comunicaciones y los programas de mantenimiento, se describen en el capítulo 5: Detección de tsunamis. Este capítulo se dirige a aquellas personas que necesitan comprender los tipos de programas que apoyan las decisiones operativas y la evolución de dichos programas.

¿Cómo encaja en un sistema integral el apoyo a la toma de decisiones sobre la emisión de alertas de tsunamis?

Como se explica en el capítulo 5, las funciones que desempeñan a diario los Centros Nacionales de Alerta de Tsunamis (*National Tsunami Warning Centre*, NTWC) y los Proveedores Regionales de Vigilancia de Tsunami (*Regional Tsunami Watch Provider*, RTWP) son análogas a las de un observatorio sismológico. Los centros de alerta de tsunamis deben contar con la capacidad de realizar dos determinaciones principales con toda la rapidez posible: localizar cualquier terremoto que se considere moderado o más fuerte y evaluar su magnitud. Una vez que el centro cuente con estos datos, puede pasar a evaluar la posible amenaza de tsunami en su área de responsabilidad.

La rápida detección y caracterización de los sismos generadores de tsunamis mediante software constituye el primer indicio en el sistema integral de alerta del potencial de que se genere un tsunami. Posteriormente, las alertas iniciales emitidas con base en los datos sísmicos se perfeccionan con la información sobre los cambios inducidos por tsunamis en el nivel del mar detectados mediante mareómetros y boyas. Se utiliza software para analizar los datos de nivel del mar y generar un pronóstico de la altura de las olas de tsunami y de las inundaciones que éstas podrían causar en ciertas áreas específicas de la costa. El perfeccionamiento de las alertas iniciales mediante modelos numéricos eficaces puede aumentar en gran medida la credibilidad de las alertas y reducir las falsas alarmas.

¿Qué contiene este capítulo?

En las secciones de este capítulo se tratan los temas siguientes:

- **Criterios de umbral para la emisión de boletines** empleados por algunos NTWC y RTWP.
- Descripción del **software de conciencia situacional del personal de turno** utilizado en el Centro de Alerta de Tsunamis de la Costa Oeste/Alaska (WC/ATWC).
- **Modelos numéricos de la altura de olas de tsunami.**
- **Modelos numéricos de inundación** para evaluar los impactos locales.
- **Requisitos de entrenamiento del personal de turno**.
- **Investigación y desarrollo** para apoyar las operaciones y mejorar los productos.

¿Cuáles son los puntos más importantes a recordar sobre los requisitos de apoyo a las decisiones de emisión de alertas de tsunamis en los NTWC y RTWP?

- La detección rápida de sismos tsunamigénicos mediante software provee el primer indicio de tsunami.
- Es esencial contar con software de conciencia situacional que permita mantener al personal de turno al tanto de la situación y responder lo más rápidamente posible ante un evento sísmico.
- El software se utiliza para analizar los datos de nivel del mar y generar pronósticos de la altura de las olas de tsunami y de la posible inundación que podrían causar en áreas específicas de la costa.
- Los programas de entrenamiento e investigación aplicada ayudan a los centros a mejorar su desempeño.

Criterios de umbral de emisión de boletines

Los boletines iniciales de tsunami se emiten con base en los datos sísmicos. Tres parámetros clave permiten determinar si un terremoto tiene el potencial de generar un tsunami a partir de los datos de ondas sísmicas:

- **ubicación:** si el terremoto ocurrió debajo o muy cerca del mar;
- **profundidad**: si el terremoto ocurrió lo suficientemente cerca de la superficie terrestre como para causar un desplazamiento significativo de esa superficie;
- **magnitud**: la intensidad del terremoto.

Los boletines se emiten en cuanto se analice el potencial del terremoto de generar un tsunami. Los mensajes iniciales se basan en la magnitud y la ubicación del sismo; por lo general, el tipo de mensaje depende de criterios o umbrales predeterminados.

Una vez emitido un boletín inicial, el centro de alerta de tsunamis debe vigilar los registros de mareográficos y tsunamimétricos (como los del sistema DART™ para confirmar la existencia de un evento y su grado de severidad. El NTWC debe emitir una cancelación, una extensión o un boletín final en coordinación con otros NTWC y RTWP.

Los antecedentes de tsunamis, los resultados de modelado antes del evento y las amplitudes de los tsunamis observados se toman en cuenta para determinar el grado de peligro en el área de responsabilidad. Por lo tanto, un centro puede abstenerse de emitir una alerta o emitirla sólo para algunas áreas específicas si los antecedentes de tsunamis y los resultados del modelo (si existen) indican que no hay peligro o que el peligro se limita a determinadas áreas.

Umbrales de emisión de boletines

Los umbrales de emisión de boletines varían de acuerdo con las circunstancias locales. No obstante, en la medida de lo posible los centros de alerta de tsunamis deben atenerse a los valores generalmente aceptados y recomendados por el Sistema de Alerta de Tsunamis en el Océano Índico de la Comisión del Océano Índico (COI/IOTWS – II, enero de 2006), utilizados por la mayoría de los NTWC y RTWP, si no todos. Estas recomendaciones se muestran en la tabla 6-1 y las definiciones utilizadas en la tabla son las siguientes:

- **Magnitud del terremoto**: La magnitud de momento Mw (tabla 3-3) es más precisa que la magnitud Richter para sismos de mayor intensidad. Es recomendable utilizar la magnitud de momento Mwp (que se basa en las primeras ondas sísmicas P en llegar) en los boletines iniciales y realizar estimaciones subsecuentes de Mw con métodos que tomen en cuenta la llegada de las ondas sísmicas secundarias.
- **Tsunami local**: Un tsunami que presenta peligro de muerte o puede generar destrucción dentro de un radio de 100 km del epicentro.
- **Tsunami regional**: Un tsunami que presenta peligro de muerte o puede generar destrucción dentro de un radio de 1,000 km del epicentro.
- **Tsunami transoceánico**: Un tsunami que presenta peligro de muerte o puede generar destrucción en todas las costas del océano.

Tabla 6-1. Umbrales de emisión de boletines con base en la intensidad de un terremoto.

Profundidad del sismo	Ubicación del sismo	Magnitud Mw o Mwp del sismo	Descripción del potencial de tsunami	Tipo de boletín
< 100 km	Debajo o muy cerca del mar	≥ 7.9	Potencial de tsunami transoceánico destructivo	Vigilancia/alerta de tsunami
		7.6 a 7.8	Potencial de tsunami regional destructivo	Vigilancia/alerta de tsunami
		7.0 a 7.5	Potencial de tsunami local destructivo	Vigilancia/alerta de tsunami
		6.5 a 7.0 o tierra adentro	Potencial muy pequeño de tsunami local destructivo	Boletín informativo de tsunami
	Tierra adentro	≥ 6.5	Ningún potencial de tsunami	Boletín informativo de tsunami
≥ 100 km		≥ 6.5	Ningún potencial de tsunami	Boletín informativo de tsunami

Cuando ocurre un evento que puede desencadenar un tsunami capaz de amenazar toda una cuenca oceánica, debe emitirse el estado de alerta de tsunami para el área correspondiente a un tiempo de propagación de 3 horas desde el epicentro y el estado de advertencia de tsunami para el área correspondiente a un tiempo de propagación de 3 a 6 horas. Para los eventos menores cuya amenaza se considera local, las alertas se limitarán a cierta distancia del punto de origen, sin emitir un boletín de advertencia, ya que no se espera que el tsunami represente un peligro para otros lugares.

Enfoque de la Agencia Meteorológica de Japón

El diagrama de la figura 6-2, que fue tomado del sitio web de la JMA, ilustra el proceso básico de toma de decisiones en relación con las alertas de tsunami empleado en la mayoría de los NTWC y RTWP, que incluye criterios basados en la magnitud inicial del terremoto.

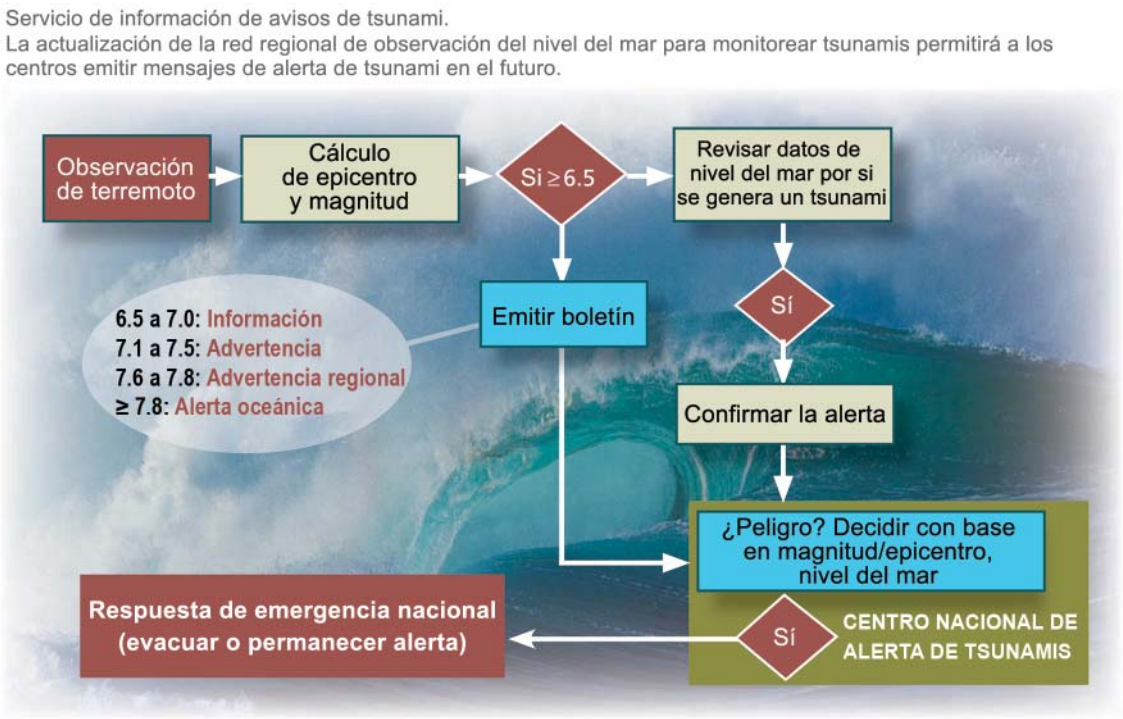


Figura 6-2. Procedimientos básicos de respuesta de un centro de alerta.
Fuente: JMA, http://www.jma.go.jp/en/tsunami/

Enfoque del NDWC de Tailandia

En Tailandia, donde se sigue el *Concepto de operaciones* (borrador de la v. 3.3, marzo de 2006) del Centro Nacional de Alerta de Desastres (*National Disaster Warning Center*, NDWC) de Tailandia, preparado por el Centro de Desastres del Pacífico, se siguen procedimientos operativos estándar ligeramente diferentes a la hora de tomar la decisión de emitir una alerta de tsunami. Una vez que el NDWC reciba de los proveedores internacionales o domésticos de información sobre peligros una notificación de actividad sísmica o de un terremoto de magnitud Richter mayor a 7.0, el funcionario de turno o supervisor consulta con el personal experto del centro de comando, que luego verifica la información, ejecuta simulaciones numéricas para estimar la hora de llegada de las olas de tsunami y genera y analiza los escenarios para evaluar el potencial de riesgo. Se recolecta, compara y analiza la información de varias fuentes geofísicas para verificar los datos sísmicos, asegurar la redundancia y comprender el máximo nivel de riesgo (figura 6-3).

Una vez confirmada la ocurrencia de un terremoto de magnitud 7.0 o mayor, el NDWC informa inmediatamente a todas las agencias pertinentes. También informa a los encargados de comunicaciones del centro de comando para que permanezcan "en estado de alerta" y estén preparados para activar las torres de alarma. Los NDWC se comunican de inmediato con el personal de Isla Similan para que vigilen de cerca los cambios en el nivel del mar, una indicación de que se aproxima un tsunami. Dentro de 20 minutos de haber recibido la notificación, el NDWC compila, analiza y evalúa el probable impacto de acuerdo con los criterios de alerta de peligro indicados en la figura 6-3.

		Distancia (km)					
		0-24	25-48	49-112	113-200	201-400	401-720
Magnitud (Richter)	3.0-3.9	Advertencia	Advertencia	Advertencia	——	——	——
	4.0-4.9	Alerta de bajo riesgo	Advertencia	Advertencia	Advertencia	Advertencia	——
	5.0-5.9	Desastre	Alerta de alto riesgo	Advertencia	Advertencia	Advertencia	Advertencia
	6.0-6.9	Desastre	Desastre	Alerta de alto riesgo	Alerta de bajo riesgo	Advertencia	Advertencia
	7.0-7.9	Desastre	Desastre	Desastre	Desastre	Alerta de alto riesgo	Alerta de bajo riesgo
	8.0-8.9	Desastre	Desastre	Desastre	Desastre	Desastre	Alerta de alto riesgo
	> 8.9	Desastre	Desastre	Desastre	Desastre	Desastre	Desastre

Figura 6-3. Tabla de "niveles de riesgo" y distancia de radio efectivo de los sismos en áreas costeras de Tailandia.
Fuente: NDWC

Además, el NDWC ha definido criterios para evaluar la posibilidad de generación de un tsunami según la profundidad del sismo o hipocentro (que se utiliza para perfeccionar aún más el nivel de riesgo), como se muestra en la figura 6-4.

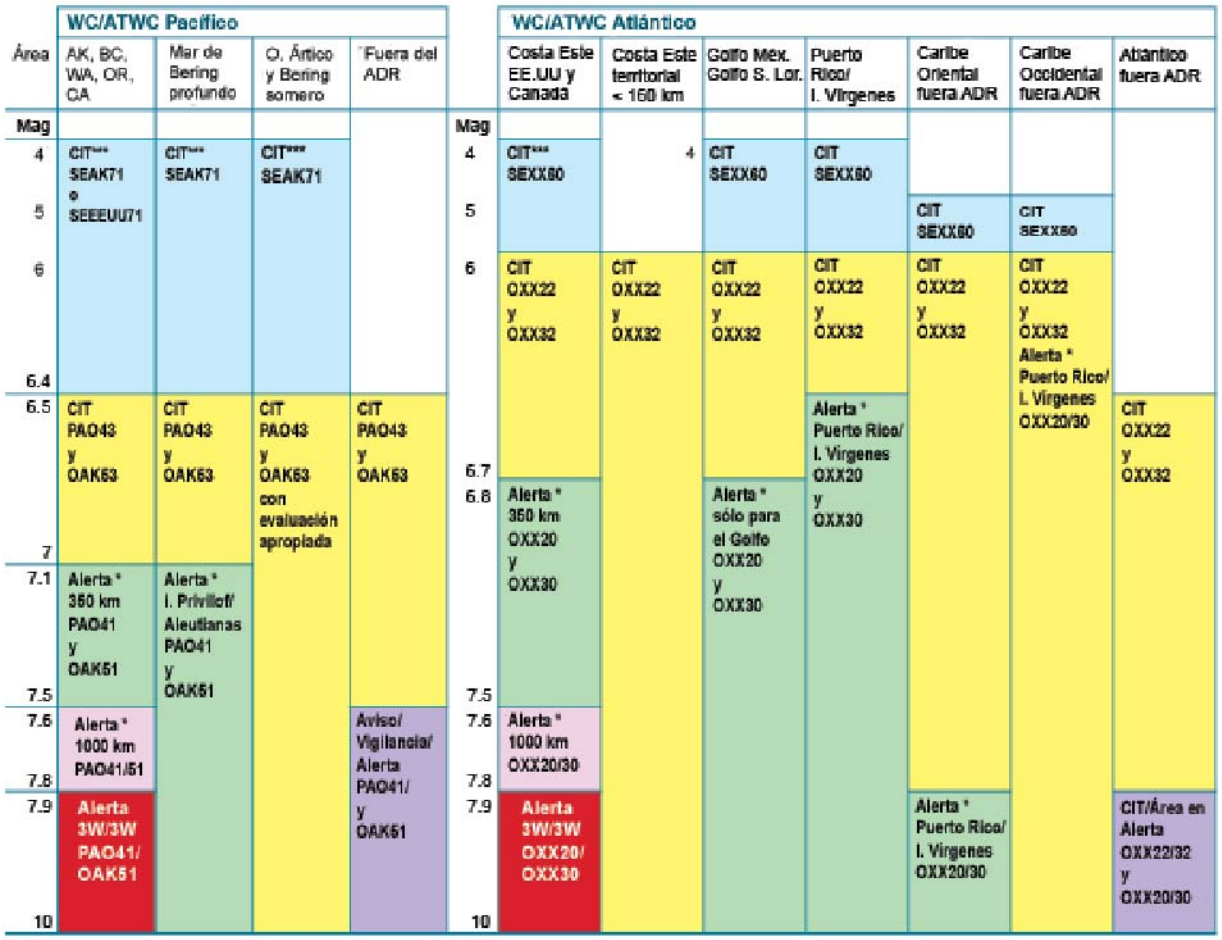
Enfoque utilizado en centros con múltiples criterios

Los umbrales de la tabla 6-1 no siempre se pueden seguir debido a circunstancias locales. La figura 6-5 muestra los umbrales que utiliza el WC/ATWC para las costas este y oeste de Estados Unidos y el mar Caribe. Estas diferencias son sustanciales pero necesarias para cumplir con las circunstancias particulares de cada una de las áreas a las que atiende este RTWP. Tales diferencias implican una gran carga para el personal de turno,

ya que debe considerar todos los criterios durante cualquier evento. Si ocurren múltiples eventos simultáneamente, se complica el uso de los umbrales para emitir un boletín de tsunami.

Magnitud	Profundidad del hipocentro	
	Menos de 100 km	Más de 100 km
5.0-6.4	**Advertencia** Posibilidad baja de generación de tsunami	**Advertencia** Posibilidad baja de generación de tsunami
6.5-6.9	**Alerta/Vigilancia** Posibilidad de generación de tsunami	**Advertencia** Posibilidad baja de generación de tsunami
7.0-7.7	**Alerta/Vigilancia** Posibilidad de generación de tsunami	**Alerta/Vigilancia** Posibilidad de generación de tsunami
> 7.8	**Alarma** Muy alta posibilidad de generación de tsunami	**Alerta/Vigilancia** Posibilidad de generación de tsunami

Figura 6-4. Probabilidad de generación de un tsunami según la posición del hipocentro.
Fuente: NDWC



Notas: CIT Comunicado informativo de tsunami

Figura 6-5. Umbrales de emisión de boletines del WC/ATWC.

Puntos importantes que recordar acerca de los umbrales de emisión de boletines basados únicamente en información de movimientos sísmicos

- Los boletines se emiten en cuanto se analice el potencial de que un terremoto genere un tsunami.
- Los antecedentes de tsunamis, los resultados de modelado antes del evento y las amplitudes de los tsunamis observados se toman en cuenta para determinar el grado de peligro en el área de responsabilidad.
- Para evitar confusiones, especialmente entre los turistas, todos los centros de alerta de tsunamis deben utilizar el formato de productos o mensajes establecido por acuerdos internacionales.
- Los centros de alerta de tsunamis deben atenerse a los valores generalmente aceptados y recomendados por el Sistema de Alerta de Tsunamis en el Océano Índico de la Comisión del Océano Índico (COI/IOTWS).
- Un RTWP puede requerir criterios distintos para diferentes partes de su área de responsabilidad.

Apoyo a la conciencia situacional del personal de turno

Los paquetes informáticos EarlyBird y EarthVu desarrollados por el WC/ATWC constituyen excelentes ejemplos de herramientas operativas que ayudan al personal de turno a mantener su conciencia situacional, es decir, su capacidad de detectar los eventos sísmicos en tiempo real.

EarlyBird

El programa EarlyBird del WC/ATWC se utiliza para el procesamiento de los datos sísmicos en tiempo real y su postprocesamiento. Este programa es una combinación de los módulos Earthworm estándar del USGS, los módulos Earthworm desarrollados por el WC/ATWC y software autónomo de procesamiento de datos sísmicos.

EarlyBird localiza y calcula automáticamente la magnitud Mb, Ml, Ms, Mw y Mwp de los terremotos locales, regionales y mundiales (tabla 3-3). Las interfaces gráficas que se han creado para los módulos Earthworm permiten agregar datos y modificar en forma directa los parámetros calculados automáticamente durante el procesamiento inicial de un sismo o después del evento. Los datos se pueden vigilar y modificar en tiempo real directamente a través de los módulos Earthworm. Los datos registrados en disco por el sistema se pueden analizar inmediatamente con los programas de análisis independientes. Los parámetros sísmicos calculados automáticamente se interconectan con el software de generación de mensajes de tsunamis y el sistema de información geográfica EarthVu.

Los datos sísmicos llegan al WC/ATWC a través de cuatro rutas básicas: datos digitales de banda ancha sobre circuitos arrendados; datos digitales de banda ancha transmitidos por CrestNet; datos digitales de banda ancha transmitidos por internet y datos digitales transmitidos a través de un sistema de estación terrestre de terminal satelital de apertura muy pequeña (*Very Small Aperture Terminal*, VSAT). Los datos se exportan a otros centros por medio de CrestNet o internet.

La adquisición de datos y la exportación de datos e hipocentros a otros centros por cada una de dichas rutas requiere un equipo informático dedicado. Las conexiones entre los módulos de importación/exportación y los sistemas de procesamiento se muestran en la figura 6-6. Los conmutadores, los routers, los PC y las rutas de datos se configuran para eliminar todo punto de fallo individual.

El sistema de procesamiento de datos sísmicos EarlyBird es una red de ocho PC que ejecutan el sistema operativo Windows XP. Cinco de dichos equipos importan y exportan los datos mediante módulos Earthworm estándar. Dos otros ejecutan las funciones de procesador principal y respaldo de los datos sísmicos y vigilan continuamente la actividad en aproximadamente 250 canales sísmicos. El equipo restante es un espejo del sistema EarlyBird principal que se utiliza para fines de desarrollo y entrenamiento.

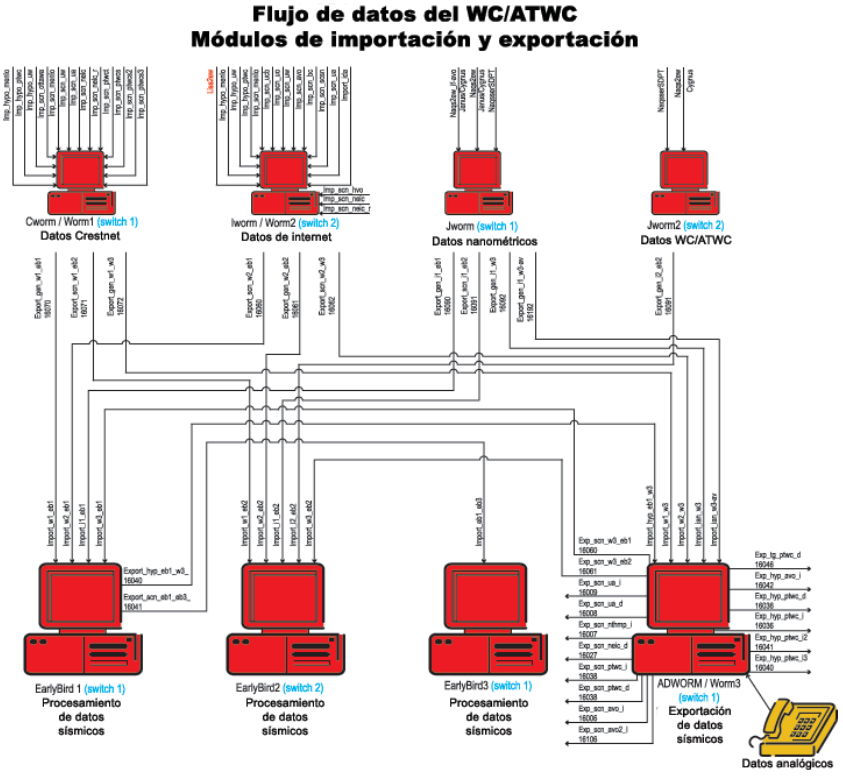


Figura 6-6. Conexiones entre módulos de importación/exportación y sistemas de procesamiento del WC/ATWC.

El flujo de procesamiento de datos de EarlyBird 1 se muestra en la figura 6-7. Los anillos (*ring*) de Earthworm constituyen ubicaciones de memoria compartida. Los iconos de monitores corresponden a los módulos que permiten la interacción y revisión por parte del usuario. El módulo Pick_wcatwc analiza la señal para determinar el inicio de un terremoto. Una vez recogida (*pick*), la señal se analiza para determinar los parámetros de magnitud Mb, Ml y Mwp. Si se exceden ciertos parámetros de ubicación y magnitud, se disparan las alarmas. Cuando ocurre un movimiento sísmico de gran magnitud (M>5), se procesan las ondas de período largo y los datos de banda ancha para perfeccionar la magnitud estimada. Cada uno de los módulos se describe a continuación con mayor detalle.

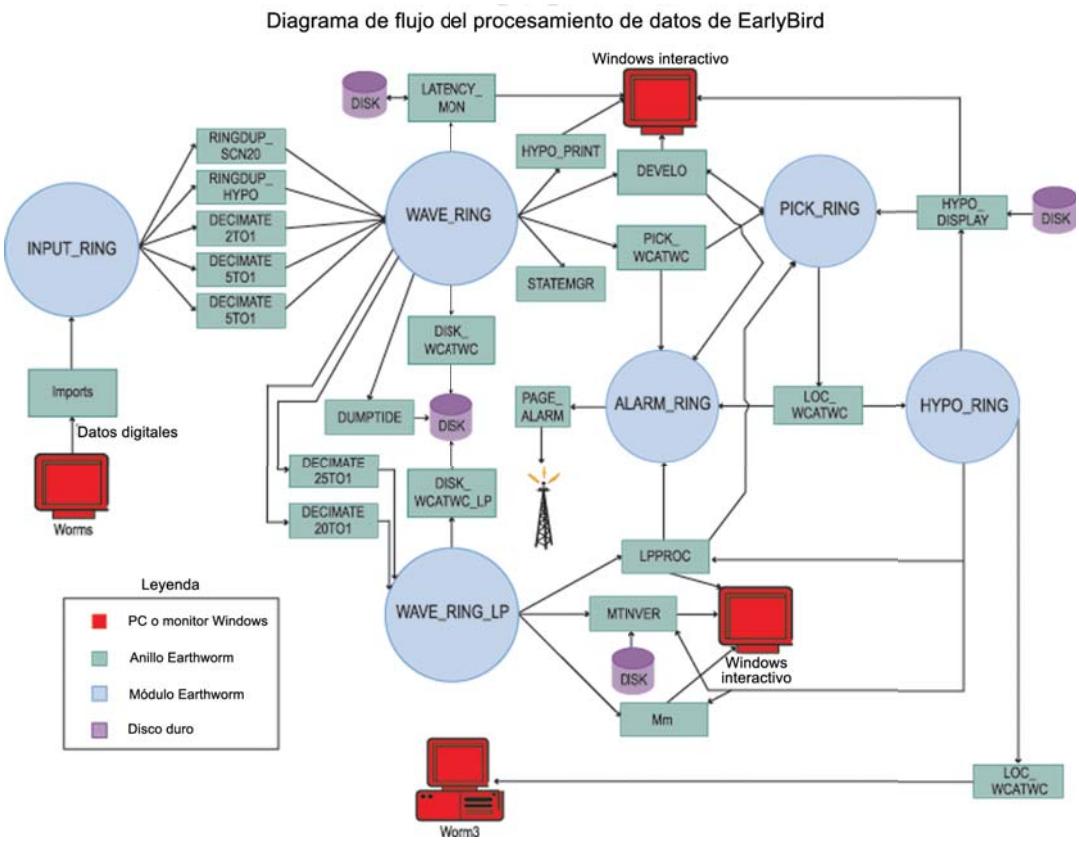


Figura 6-7. Diagrama de flujo del procesamiento de datos del programa EarlyBird del WC/ATWC.

EarlyBird utiliza los siguientes módulos Earthworm estándar:

- adsend: digitaliza datos analógicos
- copystatus: copia errores/pulsos de un anillo (*ring*) a otro
- decimate: filtra y reduce la tasa de muestras de datos para exportación y procesamiento
- export_generic/scn: envía datos de hipocentros y trazados a otros centros
- import_generic: reúne datos de hipocentros y trazados de otros centros

- import_ida: incorpora en Earthworm los datos recibidos de la red del proyecto de implementación internacional de acelerómetros (*International Deployment of Accelerometers*, IDA) del Consorcio Incorporado de Instituciones de Investigación Sísmica (*Incorporated Research Institutions for Seismology,* IRIS)
- liss2ew: incorpora en Earthworm los datos recibidos de la red del *Albuquerque Seismological Laboratory* (Laboratorio Sismológico de Albuquerque), o ASL
- ringdup_scn/generic: copia mensajes de un anillo a otro
- statmgr: vigila los módulos asociados a un anillo
- startstop: inicia y reinicia todos los módulos cuando es necesario

Varios módulos Earthworm fueron desarrollados localmente:

- atplayer: simula eventos en tiempo real con datos históricos
- develo: presenta datos de ondas sísmicas de período corto en tiempo real en formato develocorder
- disk_wcatwc: registra datos de trazados en disco
- dumptide: registra ciertos canales en disco (datos de mareógrafos)
- hypo_display: visualiza parámetros de hipocentros calculados y ajusta datos de ondas P
- hypo_print: registra hipocentros en disco y en EarthVu
- latency_mon: rastrea datos perdidos y latentes en todos los canales
- loc_wcatwc: módulo de asociación/localización
- lpproc: presenta datos de ondas sísmicas de período largo en tiempo real y procesa datos para el cálculo de Ms
- mm: procesa datos de ondas superficiales para el cálculo de Mm (Mw)
- mtinver: procesa datos del tensor momento
- page_alarm: envía mensajes de alarma a través de varias interfaces
- pick_wcatwc: algoritmo para identificar y determinar la magnitud de las ondas-P

Cuatro programas independientes integran el sistema EarlyBird, aunque no están basados en Earthworm:

- ANALYZE: este programa lee, analiza y visualiza datos sísmicos grabados previamente en disco y archiva datos en CD-ROM.
- LOCATE: permite al personal de turno detectar en forma interactiva la ubicación de un terremoto, iniciar el procesamiento de período largo en 1pproc o ejecutar el programa ANALYZE para determinar Ms y Mw y visualizar la ubicación de datos de ondas P en la pantalla de un equipo informático.
- MESSAGE2: este programa genera alertas de tsunami y otros mensajes.
- SUMMARY: este programa genera un resumen del sismo y los procedimientos para su monitorización.

Los programas independientes se diseñaron para funcionar de forma autónoma; esto significa que no es preciso ejecutar ninguno de ellos para que los demás funcionen. Los programas comparten los datos a través de archivos en disco y a veces a través de semáforos. El sistema Earthworm es modular, de modo que si un módulo falla, los demás no se ven afectados. El módulo Earthworm statmgr monitoriza los módulos y puede reiniciarlos si resulta necesario; el módulo startstop inicia y detiene los módulos Earthworm y muestra el estado de cada uno de ellos.

Todos los programas, incluidos los componentes de EarlyBird basados en Earthworm, se ejecutan en un equipo informático dotado de un adaptador de gráficos que puede distribuir la señal a doce monitores. Los programas ANALYZE, LOCATE y SUMMARY presentan una ventana que abarca un monitor. La visualización gráfica de los módulos lpproc, develo, hypo_display, mm, mtinver y latency_mon de Earthworm también utiliza un monitor. MESSAGE2 abre un cuadro de diálogo cuando se activa en LOCATE. El sistema EarthVu utiliza los cuatro monitores restantes. El sistema EarlyBird se puede ejecutar en un equipo con un solo monitor, pero los datos no serán tan claros como en un sistema con doce monitores.

EarthVu

EarthVu es un programa de visualización geográfica desarrollado por el WC/ATWC. Sus principales funciones son:

- mostrar epicentros en mapas de diferentes escalas;
- superponer información pertinente, como tsunamis y terremotos históricos, volcanes, curvas de nivel, caminos, conductos, áreas de advertencia o alerta de tsunami, etc.;
- brindar una plataforma gráfica para ejecutar los modelos de tsunamis;
- mostrar los resultados obtenidos previamente con los modelos para fines de calibración durante las alertas de tsunami;
- calcular y mostrar tiempos de viaje de tsunamis;
- conectar a bases de datos de tsunamis y terremotos;
- crear mapas que se puedan enlazar a los mensajes sobre tsunamis emitidos por el centro.

EarthVu se ejecuta en paralelo con el sistema de procesamiento sísmico EarlyBird y normalmente utiliza cuatro monitores. EarthVu **recibe en forma automática** y **calcula en forma interactiva** la posición de los terremotos. Conforme se adquieren las posiciones, los mapas van apareciendo en los monitores.

EarthVu se puede ejecutar en uno de cuatro modos:

1) Visualización de mapas a gran escala y superposición de datos

Comentario

EarthVu tiene cuatro modos y se ejecuta en paralelo con EarlyBird.

2) Interfaz para mapas de tiempo de propagación de tsunamis

3) Visualización de mapas a pequeña escala

4) Visualización de mapas regionales que muestran los eventos de los últimos 7 días

Sobreposiciones

EarthVu permite visualizar la siguiente información en capas superpuestas:

- ciudades principales
- tsunamis: todos los tsunamis conocidos de la cuenca del Pacífico, datos del Centro Nacional de Datos Geofísicos (*National Geophysical Data Center*, NGDC) de NOAA
- terremotos: todos los sismos de magnitud mayor de 5 ocurridos desde 1900, del Centro Nacional de Información de Terremotos (*National Earthquake Information Center*, NEIC) del USGS
- volcanes: del programa global de vulcanismo (*Global Volcanism Program*)
- sismómetros: datos de sismómetros procesados en el WC/ATWC
- mareógrafos: sitios de mareógrafos registrados en el WC/ATWC
- áreas de alerta/vigilancia: la situación actual de alerta/advertencia de tsunamis
- coordenadas de lat/lon: meridianos y paralelos a intervalos específicos
- ciudades: del mapa mundial digital del Departamento de Defensa (DoD) de EE.UU.
- isolíneas: del mapa mundial digital del DoD de EE.UU.
- nombres geográficos: del mapa mundial digital del DoD de EE.UU.
- aeropuertos, caminos, conductos, líneas de alta tensión, senderos, líneas de ferrocarril del mapa mundial digital del DoD de EE.UU.

EarthVu ofrece otras opciones interactivas, como visualización detallada de datos de tsunamis, volcanes, mareógrafos o sismómetros con un clic del ratón; trazado de mapas con datos de elevación (isohipsas) y batimetría (isobatas) codificados con colores; activación de la opción de voz (anuncia el nombre de la localidad); conexión a bases de datos históricos; expansión de áreas seleccionadas con el programa de mapas a pequeña escala.

Los datos históricos sobre tsunamis y terremotos se obtienen con el programa HISTORY, que se invoca desde EarthVu. HISTORY recupera la información de la base de datos por fecha, ubicación o magnitud. La información se puede obtener en formato resumido o con gran detalle, y se puede enviar a la pantalla o imprimir. La base de datos de terremotos proviene del NEIC/USGS e incluye todos los más de 70.000 terremotos de magnitud mayor que 5 que han ocurrido desde 1900. La base de datos de tsunamis proviene principalmente de los estudios realizados por NGDC/NOAA (Lander *et al.*, 1993; Lander, 1996) y contiene más de 1000 tsunamis ocurridos en la

cuenca del Pacífico desde el año 47 aC. La misma información que recibe el programa HISTORY se utiliza también en EarthVu y los demás programas cuando se visualizan los datos de tsunamis y terremotos en los mapas.

Tiempo de propagación y modelos de tsunami

Los cálculos de tiempo de propagación y de los modelos de tsunamis se pueden ejecutar y visualizar mediante la interfaz de EarthVu. Los tiempos de propagación se presentan en un mapa de EarthVu, que sirve de interfaz gráfica, en el cual se especifican las áreas del modelo y se visualizan los resultados. EarthVu también muestra los resultados precalculados con modelos y permite ajustarlos a escala de acuerdo con los tsunamis registrados durante una alerta. La opción Model/Results (modelo/resultados) permite pronosticar la amplitud de un tsunami en lugares distantes. Estos pronósticos se basan en modelos de tsunamis precalculados y ajustados a escala con los datos de nivel del mar observados. Hay más de 300 modelos de tsunami precalculados. El WC/ATWC ha recopilado las amplitudes máximas de tsunamis (cero a pico, en metros) para 99 lugares a lo largo de las costas de Alaska, Columbia Británica, Washington, Oregon, California, Hawai y todas las boyas DART. Los modelos se ejecutan con incrementos de resolución de ~1,5 m (5 pies) sobre el océano abierto y de 30 cm (1 pie) sobre la plataforma continental y donde sea necesario para describir la configuración local del litoral. Los modelos utilizan ecuaciones no lineales para aguas someras con efectos de fricción sobre las mallas finas. No se toma en cuenta la inundación. Kowalik y Whitmore describieron la técnica básica (1991, *Science of Tsunami Hazards*); Whitmore y Sokolowski describieron la metodología utilizada por los modelos durante alertas de tsunami ya establecidos (1996, *Science of Tsunami Hazards*).

Puntos importantes que recordar acerca del uso de los programas EarthVu y EarlyBird del WC/ATWC

- EarthVu se ejecuta en paralelo con el sistema de procesamiento sísmico EarlyBird y normalmente utiliza cuatro monitores.
- EarlyBird calcula automáticamente la ubicación y magnitud Mb, Ml, Ms, Mw y Mwp de los terremotos locales, regionales y mundiales.
- EarthVu se puede ejecutar en uno de cuatro modos disponibles y permite la superposición de múltiples datos de información geográfica para uso del personal de turno.
- Los cálculos de tiempo de propagación y los modelos de tsunamis se pueden realizar y visualizar a través de la interfaz de EarthVu.
- EarthVu presenta los resultados de modelos precalculados y permite ajustarlos a escala con base en los tsunamis registrados (por mareógrafos y boyas DART) durante una alerta.

Modelos numéricos de inundación y altura de las olas de tsunami

El enfoque actual en los centros de alerta de tsunamis establecidos consiste en desarrollar un sistema operativo de pronóstico de tsunamis rápido y preciso que permita obtener una interpretación óptima de los datos sísmicos y de nivel del mar disponibles y cuantificar el impacto potencial de un tsunami en las comunidades costeras. Es esencial contar con un sistema de este tipo a la hora de tomar las decisiones en los centros de alerta de tsunamis, ya que es preciso evaluar rápidamente la amenaza para las comunidades costeras. Hay mucho en juego: si bien no emitir una alerta podría causar un sinnúmero de muertes, las evacuaciones innecesarias son peligrosas, costosas y minan la confianza en el sistema de alerta. La tecnología de pronóstico de tsunamis que están desarrollando NOAA y JMA se basa en un enfoque comprobado que se utiliza en la mayoría de los sistemas de pronóstico de amenazas, es decir, la integración de las mediciones en tiempo real y la tecnología de modelado.

Las interpretaciones basadas en modelos de tsunamis, como las que produce el modelo *Method of Splitting Tsunami* (método de derivación de tsunamis) o MOST, desarrollado por el Laboratorio Ambiental Marino del Pacífico (*Pacific Marine Environmental Laboratory*, PMEL) de NOAA, se llevan a cabo en dos etapas. En la primera etapa se utiliza una base de datos de simulaciones numéricas del océano abierto para invertir formalmente la corriente de datos en tiempo real de los tsunámetros (boyas DART) y producir una solución lineal de mejor ajuste para aguas profundas; este paso se finaliza a los pocos minutos de haber adquirido los datos. En la segunda etapa, se utilizan los valores de aguas profundas junto a la costa para iniciar la ejecución en tiempo real de modelos de inundación no lineales y generar pronósticos de inundaciones para comunidades específicas; este paso se completa en menos de diez minutos.

Modelo MOST

La evolución de las olas de tsunami generadas por un terremoto se desarrolla en tres etapas: generación, propagación y penetración máxima (*runup*). El modelo numérico MOST (Memorando Técnico de NOAA ERL PMEL-112, 1997) calcula las tres etapas y produce una simulación completa del tsunami.

Generación

La etapa de generación de un tsunami incluye la formación del disturbio inicial de la superficie del océano provocado por la deformación del piso oceánico. Este disturbio inicial en la superficie del agua engendra una onda de gravedad de gran amplitud que se propaga desde el punto de origen del terremoto. El modelado de la etapa inicial de

generación de un tsunami está relacionado con los estudios de los mecanismos de origen de los terremotos.

Comentario

El modelo MOST utiliza una base de datos de simulaciones precalculadas de tsunamis en alta mar.

El proceso de generación de un tsunami se basa en un modelo de planos de falla del origen de los terremotos (Gusiacov, 1978; Okada, 1985) que supone una capa líquida incompresible sobre un semiespacio elástico subyacente para caracterizar el océano y la corteza terrestre. La implementación de este modelo de planos de falla elásticos (Titov, 1997) utiliza una fórmula de deformación estática del piso oceánico para calcular las condiciones iniciales necesarias para los cálculos subsiguientes de las etapas de propagación y penetración máxima.

Propagación

Los tsunamis pueden propagarse a través de grandes distancias antes de embestir una costa a cientos o miles de kilómetros del punto de origen del terremoto. Para modelar con precisión la propagación de un tsunami sobre grandes distancias, deben tomarse en cuenta la curvatura de la Tierra y otros factores importantes, como el efecto de Coriolis y la dispersión.

La dispersión cambia la forma de la ola debido al efecto de leves diferencias en la velocidad de propagación de las olas de distintas frecuencias. Este efecto puede tomarse en cuenta incluso sin usar de forma explícita los términos de dispersión de las ecuaciones que gobiernan el modelo; Shuto (1991) sugirió que este proceso se puede simular explotando la dispersión numérica inherente en los algoritmos de diferencias finitas. Este método tiene en cuenta los efectos de dispersión, pero permite usar ecuaciones lineales o no lineales no dispersivas para simular la propagación de las olas. El modelo de propagación MOST emplea un esquema numérico de dispersión y las ecuaciones no lineales de olas en aguas someras con coordenadas esféricas y los términos de Coriolis (Murty, 1984):

$$h_t + \frac{(uh)_\lambda + (vh\cos\phi)_\phi}{R\cos\phi} = 0$$

$$u_t + \frac{uu_\lambda}{R\cos\phi} + \frac{vu_\phi}{R} + \frac{gh_\lambda}{R\cos\phi} = \frac{gd_\lambda}{R\cos\phi} + fv$$

$$v_t + \frac{uv_\lambda}{R\cos\phi} + \frac{vv_\phi}{R} + \frac{gh_\phi}{R} = \frac{gd_\phi}{R} - fu$$

Donde λ es la longitud, ϕ es la latitud, $h = h(\lambda,\phi,t) + d(\lambda,\phi,t)$ es la amplitud, $d(\lambda,\phi,t)$ es la profundidad de las aguas en calma, $u(\lambda,\phi,t)$, $v(\lambda,\phi,t)$ son los promedios de las velocidades en aguas profundas con dirección de longitud y latitud, respectivamente,

g es la aceleración de la gravedad, f es el parámetro de Coriolis ($f = 2\omega\sin\phi$) y R es el radio de la Tierra. En el modelo MOST, estas ecuaciones se resuelven numéricamente utilizando un método de derivación similar al que describe Titov (1997).

Penetración máxima (runup)

La penetración máxima o *runup* de un tsunami es probablemente el aspecto menos desarrollado de todos los modelos de simulación de tsunamis, debido principalmente a la escasez de dos tipos de datos importantes: buenas mediciones de campo para comprobar los modelos y datos batimétricos y topográficos de alta resolución. La falta de datos de campo y experimentos de alta calidad sobre penetración máxima es el primer obstáculo serio que se debe solucionar para mejorar la simulación de los procesos de inundación. En tiempos recientes, este problema se ha aliviado ligeramente mediante una serie de experimentos de penetración máxima a gran escala realizados por el Centro de Investigación en Ingeniería Costera (*Coastal Engineering Research Council*, CERC) del Cuerpo de Ingeniería del Ejército de Estados Unidos (Briggs *et al*., 1995) y algunos estudios postsunami que han producido datos de campo de alta calidad (Yeh *et al*., 1993; Synolakis *et al*., 1995; Imamura *et al*., 1995; Yeh *et al*., 1995; Borrero *et al*., 1997).

El segundo obstáculo serio es la falta de datos topográficos y batimétricos de alta resolución en áreas críticas cerca de la costa; en la mayoría de los casos, es esencial contar con datos topográficos y batimétricos con una resolución horizontal de 10 a 50 metros. Tales datos de alta resolución no son fáciles de obtener. En sitios donde hay datos batimétricos y topográficos adecuados disponibles, la precisión de los cálculos del modelo de inundaciones es suficiente como para generar una herramienta útil que permite mitigar el peligro y una guía para elaborar productos tales como mapas de inundación.

Modelo de tsunamis generados por asteroides

En 2006, Robert Weiss, Kai Wünnemann y Heinrich Bahlburg crearon un modelo de tsunamis generados por asteroides (*Geophysical Journal International*). Este modelo numérico estima la generación, propagación y penetración máxima de los tsunamis causados por impactos en el océano.

Los impactos de asteroides a hipervelocidades en ambientes marinos producen olas de tsunami cuyas características son independientes de la profundidad del agua y del diámetro del proyectil, aunque las características de las olas inducidas sí se ven afectadas por dichos parámetros. Los autores presentaron un modelo que comprende el bien conocido modelo de impacto y un modelo de propagación no lineal de las ondas para estudiar la generación y el subsiguiente despliegue del patrón de ondas inicial provocado por el impacto de un asteroide o cometa en el océano. La simulación numérica de los impactos oceánicos requiere algunos cambios y extensiones del código del modelo de impacto original. La manipulación de diferentes materiales (agua y roca sólida) es particularmente importante debido al proceso de craterización.

Para simular la propagación de las olas de tsunami generadas por el impacto utilizaron un modelo de propagación de olas reciente basado en la teoría no lineal de aguas someras con condiciones de frontera derivadas del modelo de impacto. La penetración máxima de la ola de tsunami en la línea costera se trata como un caso especial de reflexión y se obtiene con el bien establecido código MOST. Además de describir el modelo, los autores ilustran la capacidad del esquema de modelado mediante la simulación del impacto de un asteroide de 800 metros de diámetro a 10,2 kilómetros por segundo en una zona del océano con una profundidad de 5.000 metros y la subsiguiente propagación de las olas de tsunami inducidas sobre una batimetría artificial y su penetración máxima en la costa.

Otros modelos de inundación

Además del componente de inundación del modelo MOST, se están desarrollando varios otros modelos de inundación. Por ejemplo, el modelo FLO-2D® creado por FLO-2D Software, Inc., permite crear mapas detallados de las inundaciones causadas por el aumento de nivel del mar provocado por tormentas oceánicas o tsunamis y es particularmente eficaz en zonas urbanas, donde los edificios, las obstrucciones, las calles y las canalizaciones pueden afectar el avance de la ola de inundación. El nivel de detalle que produce el modelo FLO-2D® excede el de los otros modelos hidrodinámicos y los resultados incluyen predicciones de la profundidad de flujo, velocidad, hidrogramas de descarga, presión estática y dinámica, energía específica y área de inundación. El modelo FLO-2D de aumento del nivel del mar por marea de tormenta requiere ciertos datos de entrada específicos, como la altura de la ola o el aumento de la profundidad del agua en función del tiempo (parejas de datos hora/altura) para los elementos de una malla o cuadrícula costera.

Puntos importantes que recordar acerca de los modelos de tsunamis

- Los NTWC y RTWP deben tratar de implementar un sistema operativo de pronóstico de tsunamis rápido y preciso capaz de producir una interpretación óptima de los datos sísmicos y del nivel del mar disponibles y de cuantificar el potencial de impacto de un tsunami sobre las comunidades costeras.
- La evolución de las olas de tsunami generadas por terremotos se desarrolla en tres etapas discretas: generación, propagación y penetración máxima. El modelo numérico MOST calcula las tres etapas y puede producir una simulación completa del tsunami.
- La penetración máxima del tsunami en tierra firme es probablemente el aspecto menos desarrollado de todos los modelos de simulación de tsunamis, debido principalmente a la escasez de dos tipos importantes de datos: mediciones de campo de alta calidad para comprobar los modelos y datos batimétricos y topográficos de alta resolución.

- Existen modelos para tsunamis generados por asteroides y para tsunamis generados por terremotos.
- Existen varios modelos de inundación, como el modelo de inundación MOST.

Entrenamiento del personal de turno

El personal científico que trabaja en un centro de alerta de tusnamis debe poseer el criterio profesional necesario para reunir la información apropiada, evaluarla y determinar si es exacta y completa para luego implementar la respuesta correcta de manera oportuna con el fin de proteger vidas y propiedades. Estas personas deben ser capaces de utilizar todos los datos geofísicos, oceanográficos y geográficos obtenidos mediante diversos métodos de comunicación para hacer las observaciones, los cálculos y las interpretaciones que permiten localizar un terremoto, determinar su magnitud, evaluar su potencial de generación de tsunamis, evaluar los datos de tsunami adecuados para calcular el grado potencial de amenaza, y emitir y actualizar boletines de advertencia y de alerta de tsunami o cualquier otro mensaje informativo necesario.

La habilidad de tomar las decisiones apropiadas se basa en los conocimientos teóricos y aplicados del personal experto en geofísica, vulcanología, sedimentología, tectónica regional, geografía y oceanografía, tanto de la región de origen como de las posibles áreas de impacto. Estos conocimientos especializados no se adquieren todos con el estudio de una única disciplina académica: **para que el personal experto en geofísica u oceanografía adquiera un nivel profesional óptimo, se precisa un largo período de formación en el trabajo**.

El personal del centro debe estar integrado por expertos en geofísica y oceanografía y el centro debe ofrecer un riguroso programa de entrenamiento in situ que brinde capacitación periódica sobre los procedimientos integrales para obtener y procesar los datos y emitir boletines de prueba. Una manera eficaz de hacerlo consiste en utilizar datos de eventos históricos. Para facilitar este tipo de entrenamiento, algunos NTWC y RTWP han desarrollado programas de simulación, como el sistema EarlyBird del WC/ATWC. En poco tiempo, estas simulaciones pueden brindar la experiencia necesaria al personal de turno.

Comentario

Un centro de alerta de tsunamis debe contar con personal profesional en geofísica y oceanografía.

Además de brindar experiencia al personal de turno, el entrenamiento periódico sobre las operaciones del sistema integral también somete a prueba las vías de comunicación que el centro utiliza para recolectar y diseminar los boletines. Éste es un aspecto de suma importancia, ya que los canales de comunicación son un elemento fundamental durante los eventos reales, aunque estos sean poco frecuentes.

Puntos importantes que recordar acerca del entrenamiento del personal de turno

- El personal científico que trabaja en el centro debe poseer excelente criterio profesional.
- Para que el personal experto en geofísica u oceanografía adquiera un nivel profesional óptimo, se precisa un largo período de formación en el trabajo.
- El entrenamiento periódico sobre las operaciones del sistema integral brinda experiencia al personal de turno y somete a prueba las vías de comunicación que el centro utiliza para recolectar y diseminar boletines.

Investigación y desarrollo

Las actividades de investigación aplicada y desarrollo de programas de los RTWP y NTWC se pueden dividir en tres amplias categorías:

- Ciencias. Investigación sísmica y oceanográfica aplicada que conduce a mejores modelos de parámetros tales como ubicación de hipocentros, características sísmicas que generan tsunamis, amplitud y velocidad de las olas de tsunami, mapas de inundación, etc. La tecnología emergente de simulación de escenarios cae en esta categoría.
- Procesamiento. Desarrollo de métodos informáticos que aumentan la velocidad de procesamiento de datos sísmicos y del nivel del mar, con la diseminación de productos a tecnologías recientes, y programas para aumentar la conciencia situacional del personal de turno.
- Ciencias sociales. Desarrollo de programas de educación, mensajes de alerta y otros tipos de comunicación que generen las reacciones deseadas por los constituyentes.

Comentario

A menudo, un programa de desarrollo e investigación local en un centro de alerta de tsunamis permite manejar mejor los problemas locales.

Los RTWP y NTWC individuales pueden funcionar de forma aceptable sin un programa riguroso de investigación y desarrollo. El centro puede aprovechar las mejoras y nuevas técnicas desarrolladas en otros centros y en instituciones de investigación académicas y gubernamentales. Sin embargo, es común que los centros manejen mejor sus propios problemas locales particulares; además, un programa de desarrollo e investigación local crea una atmósfera de progreso en el centro de alerta de tsunamis. Una combinación de personal experto en oceanografía, sismología, programación, redes y comunicaciones es fundamental, ya que permite contar con el talento necesario para enfocar la investigación y el desarrollo en las tres categorías citadas.

Además de un personal multidisciplinario, es recomendable que los centros de alerta de tsunamis establezcan y mantengan vínculos fuertes con instituciones académicas y otros grupos de investigación profesional, como el Centro Asiático de Preparación para Desastres (*Asian Disaster Preparedness Center*, ADPC) y el Centro de Desastres del Pacífico (*Pacific Disaster Center*, PDC). A menudo, estas relaciones producen avances en los procedimientos y ayudan al centro a mantenerse al corriente de las tecnologías y técnicas más modernas. Pueden establecerse vínculos de colaboración entre instituciones cercanas o ubicadas en las mismas instalaciones físicas, a través de ex-alumnos que ahora trabajan en el centro o por medio de contactos establecidos en reuniones o talleres.

Productos experimentales

Es posible que los cuatro productos internacionales básicos (alerta, vigilancia advertencia y comunicado) no satisfagan todas las necesidades de un RTWP o NTWC. Por ejemplo, pueden darse casos en que el RTWP necesite desarrollar o modificar un producto especializado para satisfacer las necesidades de uno o más NTWC. Es posible también que un NTWC necesite desarrollar o modificar un producto especializado para satisfacer ciertas condiciones especiales o los requisitos de uno o más de sus clientes. De forma análoga, es posible que los RTWP y NTWC contemplen la posibilidad de ofrecer un servicio nuevo o cambiar un servicio existente. En todos estos casos, el centro de alerta debe establecer y seguir un proceso a priori que se haya considerado detenidamente y estudiado con los clientes del centro mucho antes de que comience el proceso de cambio. Al adoptar este enfoque, el centro evitará muchas de las dificultades asociadas con los cambios.

Un producto o servicio nuevo o modificado comienza como un concepto que se formula en una propuesta. Una vez articulada la propuesta, pero antes de comenzar el desarrollo, el centro de alerta de tsunamis debe asegurarse de que al poner en práctica el servicio o producto nuevo o modificado actuará de manera imparcial con respecto a las partes interesadas y que ejecutará la propuesta de manera imparcial y transparente. La figura 6-8 describe el proceso a seguir durante el desarrollo y la implementación de un producto o servicio nuevo o mejorado. En este proceso, los productos y servicios pueden ser de alcance nacional o local. A la hora de considerar la posibilidad de ofrecer un servicio o producto nuevo, o de modificar un servicio o producto existente, es importante seguir los seis principios guía que se explican más adelante.

El desarrollo y la modificación de un producto o servicio se rige por seis principios guía:

1. **Relación con la misión**: El producto o servicio debe estar relacionado con la misión del centro.
2. **Vidas y propiedad en primer lugar**: La protección de vidas y propiedad debe ser la consideración primordial a la hora de asignar recursos y desarrollar y diseminar productos y servicios.

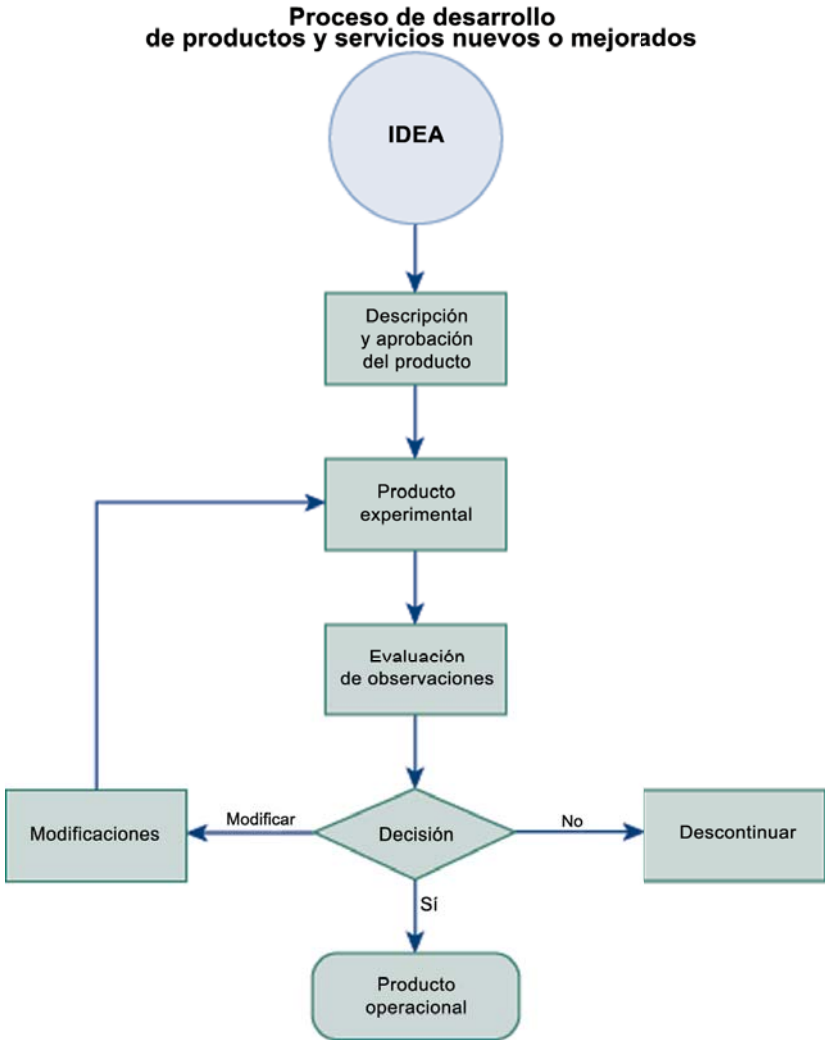


Figura 6-8. Pasos para implementar un producto experimental [instrucción 10-102 del Servicio Nacional de Meteorología (*National Weather Service,* NWS) de EE.UU., 18 de mayo de 2006].

3. **Sin sorpresas**: Se debe informar a todos los usuarios, incluidos los del sector privado, con suficiente anticipación para que tengan la oportunidad de aportar a las decisiones referentes al desarrollo y la diseminación de los productos y servicios.
4. **Los datos pertenecen a los interesados**: La diseminación abierta y no restringida de la información obtenida con fondos públicos es buena política, y en muchos casos es una práctica obligatoria por ley.
5. **Equidad**: El trato con todos los grupos debe ser equitativo y no mostrar favoritismo hacia ningún sector en particular, especialmente los socios comerciales y académicos. No se debe proporcionar un servicio a un segmento de la comunidad de usuarios que no se pueda brindar a todos los demás usuarios.
6. **Mantener y explicar los productos regulares**: Al recibir solicitudes de servicios diseñados para satisfacer necesidades específicas, se debe asegurar que los usuarios entiendan plenamente los productos que el centro provee en forma regular.

Programa de mejora de los productos

El objetivo de los estudios de modelado numérico de tsunamis es el desarrollo de modelos que permitan generar pronósticos más confiables y rápidos de la propagación de los tsunamis a través del océano y su impacto en las comunidades costeras. Los productos de pronóstico del software de modelado numérico diseñados específicamente para apoyar las operaciones de pronóstico de un centro de alerta de tsunamis son invaluables, como también lo son los modelos de inundación diseñados para dar asistencia a las comunidades costeras con el propósito de calcular el riesgo y mitigar el potencial de peligro de tsunamis.

Pronósticos numéricos de olas de tsunami

El objetivo principal de los modelos de pronóstico es estimar la hora de llegada de la ola, su altura y el área de inundación inmediatamente después un evento generador de tsunami. Los modelos de pronóstico de tsunami se ejecutan en tiempo real mientras el tsunami se propaga por el océano. Por lo tanto, estos modelos están diseñados para funcionar bajo muy estrictas limitaciones de tiempo.

Dadas las limitaciones de tiempo en este tipo de estudio, el proceso de cálculo de las tres etapas del modelo de tsunami (generación de la ola, propagación e inundación) suele verse agilizada si se elabora una base de datos de escenarios precalculados que contiene información sobre la propagación en mar abierta de tsunamis engendrados en diversos puntos de origen. Cuando ocurre un evento de tsunami, se selecciona un origen de la base de datos precalculada. En las etapas iniciales del tsunami, esta elección se basa únicamente en la información sísmica disponible sobre el terremoto ocurrido. Conforme la ola se propaga a través del océano y alcanza los mareógrafos y las boyas del sistema DART, estos sistemas transmiten la información de nivel del mar a los centros de alerta de tsunamis, donde se procesa y se genera una nueva estimación más exacta del origen del tsunami. El resultado es un pronóstico cada vez más preciso del tsunami que se puede usar para emitir mensajes de advertencia o de alerta, o bien para recomendar evacuaciones.

Cuando ocurre un evento similar a un escenarios precalculado, se utiliza la información de propagación que está disponible para calcular la última etapa del estudio: la inundación que puede producir la ola.

Modelado de inundación

Los estudios de modelado de inundación intentan reproducir la generación de un tsunami en aguas profundas o someras, la propagación de la ola a la zona de impacto y la inundación resultante a lo largo del área objeto del estudio. En este tipo de estudio se utilizan cuadrículas topográficas y batimétricas de alta resolución para reproducir correctamente la dinámica de las olas y calcular la inundación. Los conjuntos de datos topográficos y batimétricos de alta resolución necesarios para generar los mapas de inundación requieren mantenimiento y actualización conforme se compilen datos más exactos y se produzcan cambios en las costas.

Los estudios de inundación se pueden realizar con un enfoque probabilístico que toma en cuenta múltiples escenarios de tsunami y evalúa la vulnerabilidad de la costa ante la amenaza de un tsunami. Estos estudios también se pueden centrar en el efecto del "peor escenario posible" para evaluar cómo un evento particular de alto impacto afectará las áreas objeto del estudio.

Los resultados de un estudio de este tipo deben incluir información sobre la altura máxima de las olas y la velocidad máxima de la corriente en función de la localidad, así como la línea máxima de inundación y series temporales de altura de la ola en diferentes lugares con una indicación de la hora de llegada de la ola. Los funcionarios a cargo de planificación urbana y de coordinar las operaciones de emergencia pueden utilizar esta información para establecer rutas de evacuación y determinar ubicación de infraestructuras esenciales. Además, las personas a cargo de coordinar las operaciones de emergencia y otros funcionarios oficiales requieren herramientas operativas que generen pronósticos de tsunamis exactos como guía a la hora de tomar decisiones cuando están en juego vidas y propiedades. Cuanto más precisas y oportunas sean las alertas, más eficaces serán las medidas que se pueden tomar en una emergencia y más vidas y propiedades se podrán salvar.

La combinación de las técnicas de medición y simulación puede producir pronósticos confiables de tsunamis. Para pronosticar la inundación a partir de las primeras olas de tsunami se utilizan parámetros sísmicos estimados y mediciones de tsunamis para buscar en una base de datos de pronósticos de generación y propagación precalculados con el fin de elegir una combinación apropiada (lineal) de escenarios que se ajuste a los datos observados. Esto produce estimaciones de las características de las olas de tsunami en aguas profundas que luego se pueden utilizar como condiciones iniciales con un algoritmo de modelado de inundación para un sitio específico (no lineal). También se ha desarrollado una metodología estadística para pronosticar la altura máxima de las olas de tsunami posteriores, que pueden amenazar las operaciones de rescate y recuperación. Los resultados están disponibles a través de una interfaz fácil de usar que ayuda a los funcionarios a cargo de situaciones de emergencia a evaluar el peligro y a tomar las decisiones adecuadas.

El modelo MOST ejecutó los cálculos de los escenarios de generación y propagación para la base de datos de pronóstico. El modelo no lineal de alta resolución generará los pronósticos de inundación. Esta metodología es el fundamento de las herramientas de pronóstico de alerta y mitigación de tsunami de próxima generación que se están desarrollando en estrecha colaboración entre los centros de alerta de tsunamis y las instituciones académicas. Estas nuevas herramientas producirán pronósticos de las amplitudes de tsunamis en sitios y eventos específicos con el objetivo de asistir a los funcionarios a cargo de situaciones de emergencia durante los procedimientos de alerta y mitigación de tsunamis.

Puntos importantes que recordar acerca de los programas de investigación y desarrollo de los NTWC y RTWP

- Las actividades de investigación aplicada y desarrollo de programas de los RTWP y NTWC caen en tres amplias categorías: ciencias, procesamiento y ciencias sociales.
- Un programa de desarrollo e investigación local crea una atmósfera de progreso dentro del centro de alerta de tsunamis.
- La colaboración entre instituciones ayuda al centro a mantenerse al tanto de las últimas técnicas y tecnología más modernas.
- Los productos nuevos deben pasar por un riguroso programa de pruebas antes de comenzar a utilizarse como producto operativo.