

ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN GENERADA POR ONDAS DE TSUNAMI CONSIDERANDO LA ALTURA Y VELOCIDAD DE LA LÁMINA DE AGUA INUNDANTE PARA EL MUNICIPIO DE TUMACO

EVALUATION OF TSUNAMI HAZARD IN TUMACO TOWN, DUE TO THE INTERACTION OF HEIGHT AND VELOCITY OF TSUNAMI WAVES DURING THE INUNDATION EVENTS

Yuley Mildrey Cardona Orozco¹, Francisco Mauricio Toro², Jaime Ignacio Vélez³
y Luis Jesús Otero Díaz⁴

¹ Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.
Universidad Nacional de Colombia.
Carrera 80 No 64 -223 Bl M2 of 301 - Facultad de Minas. Medellín, Antioquia, Colombia.
ymcardon@unalmed.edu.co

^{2,3} Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.
Universidad Nacional de Colombia.
Carrera 80 No 64 -223 Bl M2 of 301 - Facultad de Minas. Medellín, Antioquia, Colombia.
²fmtoro@unalmed.edu.co, ³jivelezu@unalmed.edu.co

⁴ Grupo de Modelado Integral de Zona Costera con Énfasis en Riesgos Ambientales Marinos y Procesos,
Centro Control Contaminación del Pacífico (DIMAR-CCCP),
Vía El Morro, Capitanía de Puerto de Tumaco, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia.
lotero@dimar.mil.co

Cardona, Y., F. Toro, J. Vélez y L. Otero. 2007. Estimación de la amenaza por inundación generada por ondas de tsunami considerando la altura y velocidad de la lámina de agua inundante para el municipio de Tumaco. Boletín Científico CCCP, (14): 19-30.

Recibido en mayo de 2006; aceptado en diciembre de 2007

RESUMEN

Este documento presenta la evaluación de la amenaza de origen natural, generada por el arribo de ondas de tsunami al borde costero del casco urbano del municipio de Tumaco, localizado en el departamento de Nariño, producidas por eventos sísmicos cercanos a la costa generados en la zona de subducción entre las placas de Nazca y Suramericana, y la falla de Panamá. La amenaza se determinó a partir de la consideración conjunta de la altura y velocidad de la lámina de agua inundante, siguiendo una metodología desarrollada por la Universidad Nacional de Colombia en 2003, la cual cualifica la zona inundada no sólo con atributo de seco-mojado, sino también con el potencial daño ocasionado sobre la zona durante el tránsito de la inundación. Tener un conocimiento detallado del elemento que resulta amenazante para una población, se convierte en su principal instrumento de defensa, ya que de esta forma se dispone de información valiosa para la adecuada gestión del territorio por parte de las entidades competentes con jurisdicción en la zona, además de funcionar como una herramienta para los entes operativos encargados de la prevención y atención de desastres.

PALABRAS CLAVE: tsunami, amenaza, Tumaco, inundación, velocidad, onda larga.

ABSTRACT

We present here the assessment of hazards of natural origin, generated by arrival of tsunami waves to the coastline of the city of Tumaco, located in the state of Nariño, produced by nearby seismic events located in the subduction zone between the Nazca and South American plates and the Panamá fault. Hazards were determined by jointly considering the height and velocity of potentially flooding waves, following a methodology developed by Universidad Nacional de Colombia in 2003, which qualifies the inundation zone not only with the attributes of dry-wet, but also with the potential damage during flooding. Having a detailed knowledge of hazards constitutes by itself the main defense, because in this way there is information on the appropriate use of the land to help decision makers and also it can be used as a tool for disaster mitigation agencies.

KEY WORDS: tsunami, hazard, Tumaco, flooding, velocity, long wave.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la inundación producida por ondas de tsunami de origen cercano a la costa nariñense, con especial dedicación en el municipio de Tumaco (Colombia), ha sido estimada para diferentes escenarios, desde tsunamis de origen lejano (Caicedo *et ál.*, 1996), hasta de origen cercano (Ortiz y Quiceno, 2001; Cardona, 2005). De estas investigaciones se dispone de campos de inundación para el casco urbano de Tumaco y de los tiempos de arribo de la onda al mismo. El interés en esta oportunidad se centró en la estimación de la amenaza producida por ondas de tsunami generadas por sismos cercanos a la costa, considerando para ello no sólo la extensión de la inundación, como tradicionalmente había sido evaluada, sino también la interacción durante la inundación de la altura de lámina de agua inundante y la velocidad de tránsito de la misma en la zona costera.

Así entonces, se dispondrá de mapas de inundación con atributos no sólo de seco-mojado, sino también del daño potencial a la zona costera; el cual tiene un rango de valoración entre molestias hasta pérdidas de vida. El daño potencial se deriva de la evaluación conjunta de la velocidad y altura de la onda inundante.

La determinación de la amenaza, a partir de esta metodología, se convierte en un valor agregado para regiones costeras donde no se dispone de zonas de resguardo, debido a las condiciones topográficas de las mismas, tal es el caso del municipio de Tumaco donde la altura promedio sobre el nivel del mar es de tan sólo 2m (CCCP, 2003). Así entonces, al seleccionar las zonas seguras para resguardo de la población durante eventos de tsunami, éstas pueden estar integradas por las zonas que no sufren inundación y aquellas donde la inundación potencialmente sólo representará molestias.

Para la simulación de la onda de tsunami se utilizó el modelo numérico desarrollado en el marco del Proyecto 'Tsunami Inundation Modeling for Exchange' (TIME) de la UNESCO, que contó con la participación de la Universidad de Tohoku (Japón), la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) y el Grupo de Coordinación Internacional para el Sistema de Prevención de Tsunami en el Pacífico (ICG/ITSU). La evaluación de la amenaza siguió la metodología desarrollada por la Universidad

Nacional de Colombia para la cualificación de los potenciales daños, considerando altura y velocidad del flujo (Universidad Nacional de Colombia, 2003)

Mediante la utilización del modelo numérico se buscó visualizar un número de escenarios de amenaza posibles, donde las condiciones de generación de las ondas de tsunami y arribo de las mismas se soportaran en las condiciones físicas de la zona.

A partir de los mapas de amenaza por inundación generados por un tsunami de origen cercano, los planificadores del territorio y autoridades competentes disponen de una evaluación general de esta amenaza en su jurisdicción. Se espera que la valoración de la amenaza por inundación, considerando las variables altura y velocidad de la lámina de agua inundante, brinde elementos adicionales a las autoridades encargadas de la mitigación de la amenaza en esta población del Pacífico colombiano vulnerable a este fenómeno natural, donde las condiciones de densidad poblacional y socio-económicas lo convierten en un reto para las autoridades locales y nacionales (Universidad del Cauca, 2003)

Se debe tener presente que los resultados obtenidos son producto de modelaciones numéricas para casos específicos, que tienen involucradas hipótesis y condiciones iniciales particulares. Su modificación en un caso real se evidenciará también en la manifestación en la costa.

ÁREA DE ESTUDIO

El área sobre la cual se determinó la amenaza por inundación es el casco urbano de Tumaco, el segundo municipio más habitado del Pacífico colombiano, el cual ha sufrido las mayores pérdidas durante el arribo de ondas de tsunami en el último siglo. Tumaco está formado por tres islas (El Morro, Tumaco y La Viciosa) y un pequeño sector continental, sobre esta porción de terreno se asientan más de cienmil habitantes, el detalle se observa en la Figura 1. La región se enmarca en las coordenadas -78.82, 1.77, para el extremo inferior izquierdo, y -78.72, 1.84, para el extremo superior derecho.

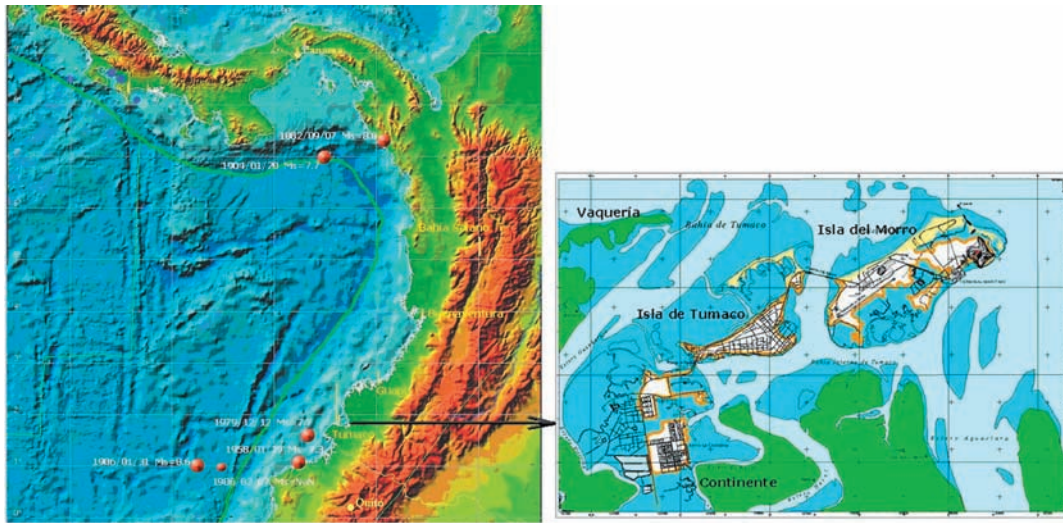


Figura 1. Localización general sobre el Pacífico colombiano y detalle en el sector de las islas que constituye el casco urbano del municipio de Tumaco (mapa generado por la sección de Cartografía del CCCP)

METODOLOGÍA

La metodología seguida incluyó cinco pasos: a) Definición del sismo generador del tsunami; b) Definición de la deformación del lecho marino y de la superficie libre del mar; c) Tránsito de las ondas de tsunami; d) Estimación de la magnitud de la inundación (altura y velocidad) y, e) Utilización de los resultados para la generación de mapas de amenaza.

Selección del sismo

La localización espacial, la magnitud del sismo generador de las ondas de tsunami y el estado de la marea, son consideradas las variables principales para la obtención de los mapas de amenaza de inundación por tsunami. De las dos primeras depende la dimensión del tren de ondas que arribará a la costa, para su estimación se utilizaron las relaciones dadas por Wells y Coppersmith (1994); la última variable establece las condiciones iniciales de inundación, ya que la onda de marea se superpone a las ondas de tsunami, provocando la inundación en la zona costera.

En el Pacífico colombiano existe una alta y regular sismicidad que obedece a diversos sistemas tectónicos que confluyen en él. La selección del sismo generador de ondas de tsunami incluyó consideraciones referentes a la evolución tectónica de la plataforma oceánica cercana a la costa colombiana (Meschede y Barckhausen, 2000), las

zonas sismo-tectónicamente homogéneas propuestas por Gutscher *et ál.* (1999) y la evidencia histórica en la zona que incluye sismos de magnitud mayor y los mecanismos de falla a éstos asociados (Englant y Buland, 1998)

Después de la revisión de los principales estudios sobre la tectónica de la zona cercana al Pacífico colombiano, en la Figura 2 se ubicaron las regiones homogéneas dadas por Gutscher *et ál.* (1999); la evolución de las placas de Cocos y de Nazca, donde se resaltan las zonas activas propuestas por Meschede y Barckhausen (2000), y la clasificación de los mecanismos de ruptura de los principales eventos sísmicos con profundidad inferior a 50km registrados en el período 1976-1999 en la zona de interés. En la Figura 2 se ilustran los principales estudios de tectónica realizados en cercanías del Pacífico colombiano bajo las siguientes convenciones: a) Circunferencias en rojo representan sismos que se produjeron por una falla de desgarre con movimiento relativo hacia la derecha, localizados en la falla de Panamá; b) Circunferencias en blanco representan eventos sísmicos producidos en un sistema de falla normal localizados en la grieta (rift) de Panamá; c) Circunferencias en amarillo representan a los sismos ocurridos sobre una falla inversa en la zona de subducción, y d) Circunferencias en azul corresponden a los sismos que se produjeron por un sistema de falla normal sobre el Graben de Yaquina.

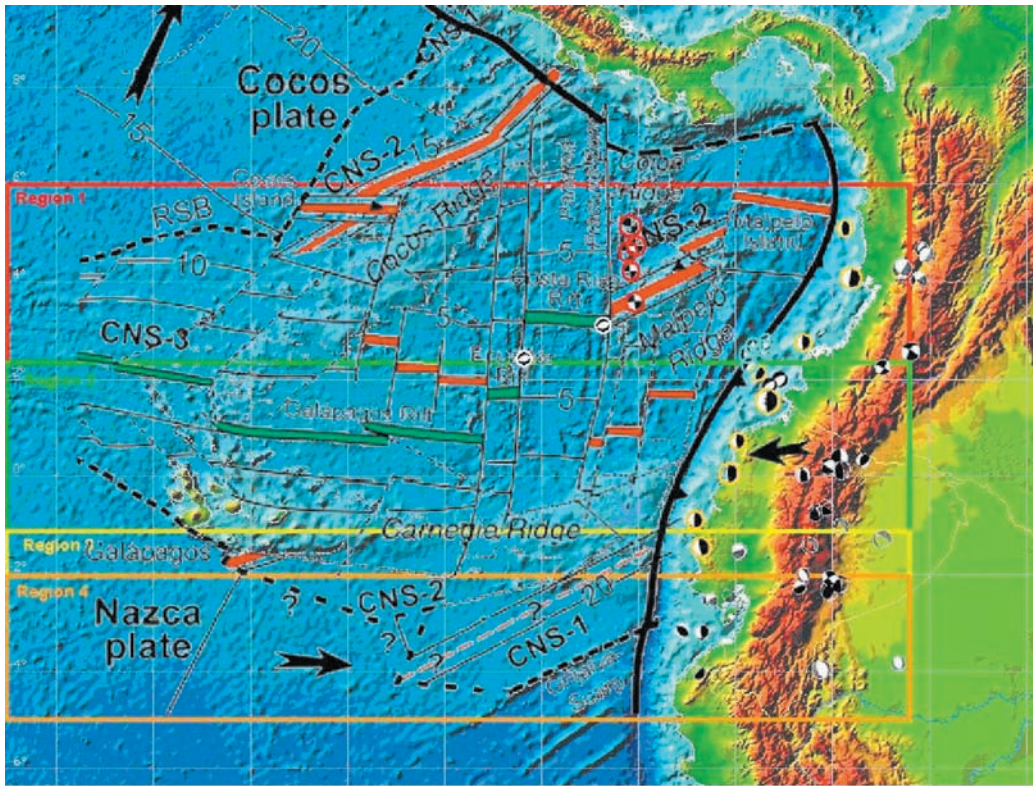


Figura 2. Superposición de las regiones sísmicas homogéneas dadas por Gutscher *et al.* (1999); la evolución tectónica de las placas de Cocos y Nazca, propuesta por Meschede y Barckhausen (2000), y la clasificación de los mecanismos de falla para 57 eventos sísmicos con $M_b > 4.5$ realizada por Gutscher *et al.* (1999)

Gutscher *et al.* (1999) proponen cuatro regiones de comportamiento sismo-tectónico similar así: Región 1. Subducción de alta pendiente en dirección este-sureste y reducida actividad volcánica, entre 6°N y 2.5°N (rectángulo rojo en la Fig. 2); Región 2. Actividad sísmica en profundidades intermedias con amplia actividad volcánica, entre las latitudes 2.5°N y 1°S (rectángulo verde en la Fig. 2); Región 3. Se caracteriza por presentar una subducción de alta pendiente en dirección noreste y reducida actividad volcánica, esta región se localiza entre las latitudes 1°S y 2°S (rectángulo amarillo en la Fig. 2); Región 4. Localizada por debajo de los 2°S de latitud, definida por una subducción de baja pendiente y no reciente actividad volcánica.

Meschede y Barckhausen (2000) realizaron la restauración paleográfica para la corteza oceánica formada por la expansión del sistema formado por las placas de Cocos y Nazca y sus precursores para intervalos de tiempo de 0.5 millones de años. En la Fig. 2 se observan polígonos de color verde y rojo, los

cuales dan cuenta de los sistemas activos e inactivos, respectivamente, en la evolución del sistema.

Las magnitudes de sismos seleccionadas varían entre $M_w 7.5$ y $M_w 8.0$, siendo los sismos de magnitud M_w igual a 7.5 descritos como “mayores”, según United States Geological Survey (USGS, 2003), y los

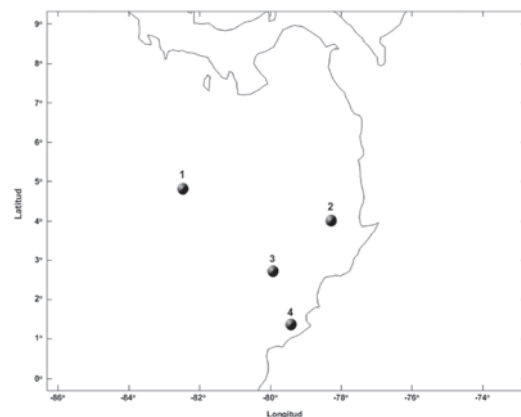


Figura 3. Eventos sísmicos seleccionados para la modelación de tsunamis.

sismos de magnitud M_w igual a 8.0 catalogados como “grandes”, con una amplia capacidad destructiva. Los registros sísmicos sugieren que los sistemas tectónicos que aportan la mayor actividad sísmica en el Pacífico colombiano son la zona de subducción que se localiza paralela a la costa Pacífica colombiana y la falla de Panamá (Pennington, 1981; INGEOMINAS, 2003). Se evaluaron para los dos sistemas diferentes eventos sísmicos y magnitudes asociadas a éstos que representarían la dinámica allí presente; en la Figura 3 se localizan los cuatro eventos seleccionados como generadores de tsunamis durante las modelaciones. Los resultados obtenidos evidencian las posiciones 3 y 4 como las que potencialmente provocarían inundaciones en la región de estudio.

Evento sísmico 3. Ubicado sobre la zona de subducción, se soporta en un gran número de eventos sísmicos registrados sobre el Graben de Yaquina, con mecanismo de fallamiento normal. Los elementos descriptores del sismo son: epicentro, hipocentro y ángulos del plano de falla, se extrajeron del registro número 17 de Gutscher *et ál.* (1999)

Localización epicentro: 2.77° N y 79.76° W
 Profundidad del hipocentro: 30 km
 Rumbo/Buzamiento/Ángulo de deslizamiento:
 16°/43°/-78°

Evento sísmico 4. Localizado sobre la zona de subducción, donde el mecanismo de falla es de cabalgamiento representado por el registro número 10 de Gutscher *et ál.* (1999), el cual fue el precursor del último tsunami con registro en el Pacífico colombiano, ocurrido el 12 de diciembre de 1979 con magnitud M_w 7.9. A continuación los elementos que describen el evento:

Localización epicentro: 1.57° N, -79.36° W
 Profundidad del hipocentro: 26.6 km
 Rumbo/Buzamiento/Ángulo de deslizamiento:
 30°/16°/118°

El Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) como entidad encargada de la investigación sismológica, basado en evaluaciones de las características de los segmentos de subducción de la costa Pacífica colombiana, concluyó que el segmento de Cabo Corrientes Norte - Buenaventura se caracteriza por sismos de magnitudes alrededor

de 7.0, ya que las zonas de ruptura no pueden ser tan grandes como para generar eventos mayores. Por el contrario, el segmento de Buenaventura - Esmeraldas (Ecuador), sobre el cual se localizan los eventos 3 y 4 tiene un potencial mayor de generación de sismos de gran magnitud, ejemplo de ello son los sismos de 1906 y 1979, ambos desencadenadores de ondas de tsunami.

Tránsito de las ondas de tsunami

El tránsito de las ondas de tsunami generadas por los sismos mayores ubicados en las posiciones 3 y 4, requirieron como primer paso el cálculo de la deformación del lecho marino producida por el sismo, la cual se considera como el perfil inicial de la superficie libre del mar y punto de partida durante el tránsito de las ondas de tsunami desde su generación hasta el arribo a la costa. Los modelos numéricos utilizados para el cálculo del tránsito de las ondas de tsunami, desde la fuente generadora hasta la costa, son el modelo de Mansinha y Smylie (1971), para el cálculo del campo de deformación del lecho marino y el modelo del proyecto Tsunami Inundation Modeling Exchange (TIME) (Detalles metodológicos disponibles en Goto *et ál.*, 1997; Yeh *et ál.*, 1996), con el cual se calcula la inundación en la zona costera. El modelo involucra la teoría de ondas largas donde la aceleración vertical de las partículas es despreciable, comparada con la aceleración gravitacional y, por lo tanto, el movimiento vertical de las partículas no tiene efecto sobre la distribución de presiones y la velocidad horizontal de las partículas de agua es uniforme en la dirección vertical.

Con base en estas aproximaciones, el movimiento de las ondas largas está regido por las ecuaciones 1, 2 y 3, ecuaciones de conservación de momentum y de conservación de masa, sobre las cuales basa su concepción el modelo TIME.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [u(h + \eta)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(h + \eta)]}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Donde,

x e y Coordenadas: x en dirección oeste-este y y en dirección sur-norte.

u y v Velocidad en la dirección x y y , respectivamente.

t Tiempo.

h Profundidad del nivel de referencia de la columna de agua.

η Desplazamiento vertical del agua sobre el nivel de referencia.

g Aceleración gravitacional.

$\frac{\tau_x}{\rho}$ y $\frac{\tau_y}{\rho}$ Fricción del fondo en las direcciones x y y , respectivamente.

ρ Densidad del agua.

La implementación del modelo TIME requiere información batimétrica y topográfica en el dominio de cálculo y del perfil inicial de las ondas de tsunami obtenido del modelo de deformación. Se utilizó la información batimétrica y topográfica de diversas fuentes y escalas, cada una acorde con los requerimientos de las mallas de cálculo dentro del modelo. El modelo utiliza mallas anidadas de tamaño de celda del orden de cientos de metros en las exteriores hasta de decenas de metros en las interiores, donde cada uno de los nodos debe tener información topográfica o batimétrica. La información batimétrica se obtuvo de varias fuentes, como: 1) El proyecto ETOPO2 (Smith y Sandwell, 1997), con una resolución de 2' de arco; 2) Las cartas náuticas levantadas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), y 3) A partir de información batimétrica de detalle obtenida por el Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), durante el año 2004. La información topográfica fue obtenida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y CCCP 2000.

Durante las modelaciones se extrajeron los campos de velocidad y nivel del agua para todos los intervalos de cálculo, bajo las condiciones iniciales de marea media que corresponden a un nivel de 2.2m, la cual implica una probabilidad de no excedencia del 49.5% y para marea alta 3.6m, la cual tiene asociada una probabilidad de no excedencia de 94.2% (Cardona, 2005). Las combinaciones de altura y velocidad para cada instante de tiempo cualificaron la amenaza.

Diferentes autores han propuesto la valoración de la amenaza por inundación considerando el nivel del flujo (h) y la velocidad (v) (Paredes y Noya, 2004;

Universidad Nacional de Colombia, 2003); esta última corresponde a una metodología adoptada para el cálculo de la amenaza por inundación en zonas aluviales (Figura 4). De estas zonas se dispone de amplios registros tanto de magnitud de la inundación como de daños ocasionados, se adoptó esta relación para las zonas costeras ya que los elementos expuestos a la inundación son equiparables, tales como viviendas, pobladores, infraestructura, etcétera.

Los criterios para la evaluación y clasificación de la amenaza por inundación se basaron en combinaciones profundidad - velocidad de flujo, puesto que son estos los que condicionan la dimensión de los daños en la zona inundada, limitando el uso del suelo a actividades que no se afecten por la presencia del flujo en el terreno, o restringiendo el uso según una tolerancia admisible a los daños. Las restricciones derivadas de la velocidad están asociadas al impacto directo del flujo y al poder erosivo de la corriente. Asimismo, la profundidad que alcanza el flujo restringirá el uso sobre el terreno a actividades que permitan cierta tolerancia a la inundación; a mayores profundidades de flujo, mayores deberán ser las restricciones y éstas deben ser tales que los daños sobre los bienes inmuebles sean mínimos (Universidad Nacional de Colombia, 2003)

En la Figura 4 las 'molestias' se refieren al humedecimiento en primer piso por unos cuantos centímetros, que en general afectan los zócalos de la mismas; los 'daños moderados' incluyen entre otros el humedecimiento de camas y tomacorrientes; la categoría 'daños graves' incluye la socavación de fundaciones, pérdida de enseres de las viviendas, daño en la infraestructura de servicios, etcétera; por último, se consideran las 'pérdidas de vidas' que inician para una velocidad cercana a cero, con una altura de lámina de agua cercana a los 80 cm, que compromete a personas en sillas de ruedas y niños.

La cualificación final de una zona como potencial a sufrir daños desde molestias hasta pérdidas de vida, es dada por la condición más desfavorable obtenida durante la modelación según la altura y velocidad de la inundación para un tiempo específico.

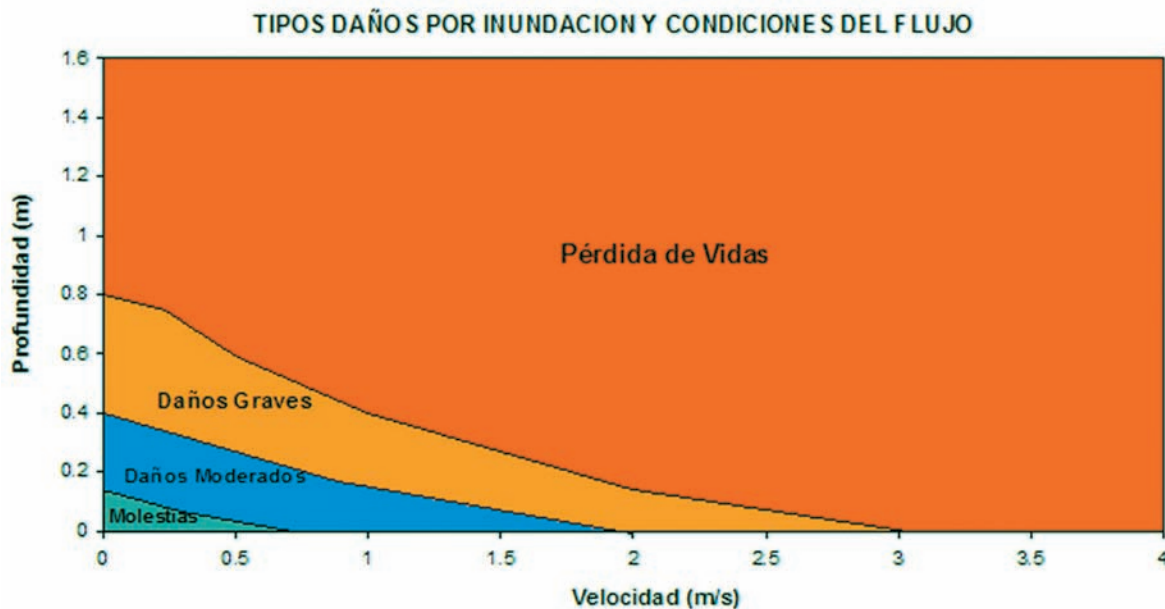


Figura 4. Relación profundidad - velocidad y sus daños asociados (Tomado de: Universidad Nacional, 2003)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los resultados de los diferentes escenarios de inundación, las condiciones más desfavorables del grupo evaluado son las del sismo con epicentro en la posición 3, ubicada a 128km de la bahía de Tumaco y con mecanismo de falla superficial normal, sus ondas de tsunami fueron las de mayor magnitud y el tiempo de arribo cercano a 40 minutos. En la Figura 5 se muestran en detalle, para esta posición del sismo generador, los campos de inundación para Mw 7.5, 7.8 y 8.0.

Para todos los casos, las áreas no inundadas son mayores cuando los arribos de ondas de tsunami coinciden con estado de marea media, y éstas disminuyen cuando aumenta la magnitud del sismo generador. Los sitios que experimentan mayor altura de onda son Vaquería, islote localizado hacia la izquierda de la isla de Tumaco; la isla de El Morro, en las playas del Batallón Fluvial de Infantería de Marina No. 70 (BAFLIM No. 70), y la playa turística. La isla de Vaquería funciona como barrera natural para la isla de Tumaco (área completamente poblada), ya que ella soporta el impacto inicial de las ondas de tsunami y en ella se disipa gran parte de la energía, lo que se traduce en una reducción de hasta el 50% en las alturas

máximas de ola incidente en la costa de la isla de Tumaco; mientras en Vaquería se alcanzan alturas de onda de hasta 4.5m, en la isla de Tumaco no se exceden los 2m, para el evento contemplado más desfavorable, Mw 8.0 en marea alta. Su actual funcionalidad se asemeja a la atribuida a la isla del Guano durante la ocurrencia de los tsunamis de 1906 y 1979 en esta región.

El sector continental se ve afectado de manera importante, el agua hace su ingreso por los esteros presentes en el área, y sólo parte de los terrenos del barrio La Ciudadela no sufren inundación, dado que es un terreno sobreelevado artificialmente durante la ejecución del Proyecto de Reorientación de Desarrollo Urbano Colombo - Europeo ALA, que reubicó a los pobladores afectados durante el tsunami de 1979.

Para el sismo generador de magnitud Mw 8.0, durante marea alta y marea media, la inundación es de grandes proporciones y se considera destructiva, al igual que para una magnitud Mw 7.8 durante marea alta; la única porción de terreno que no sufre inundación es El Morro (formación de 80 m de altura). La máxima altura registrada y el tiempo de arribo de la primera onda, que para todas las modelaciones corresponde a la de mayor tamaño del tren de ondas de tsunami.

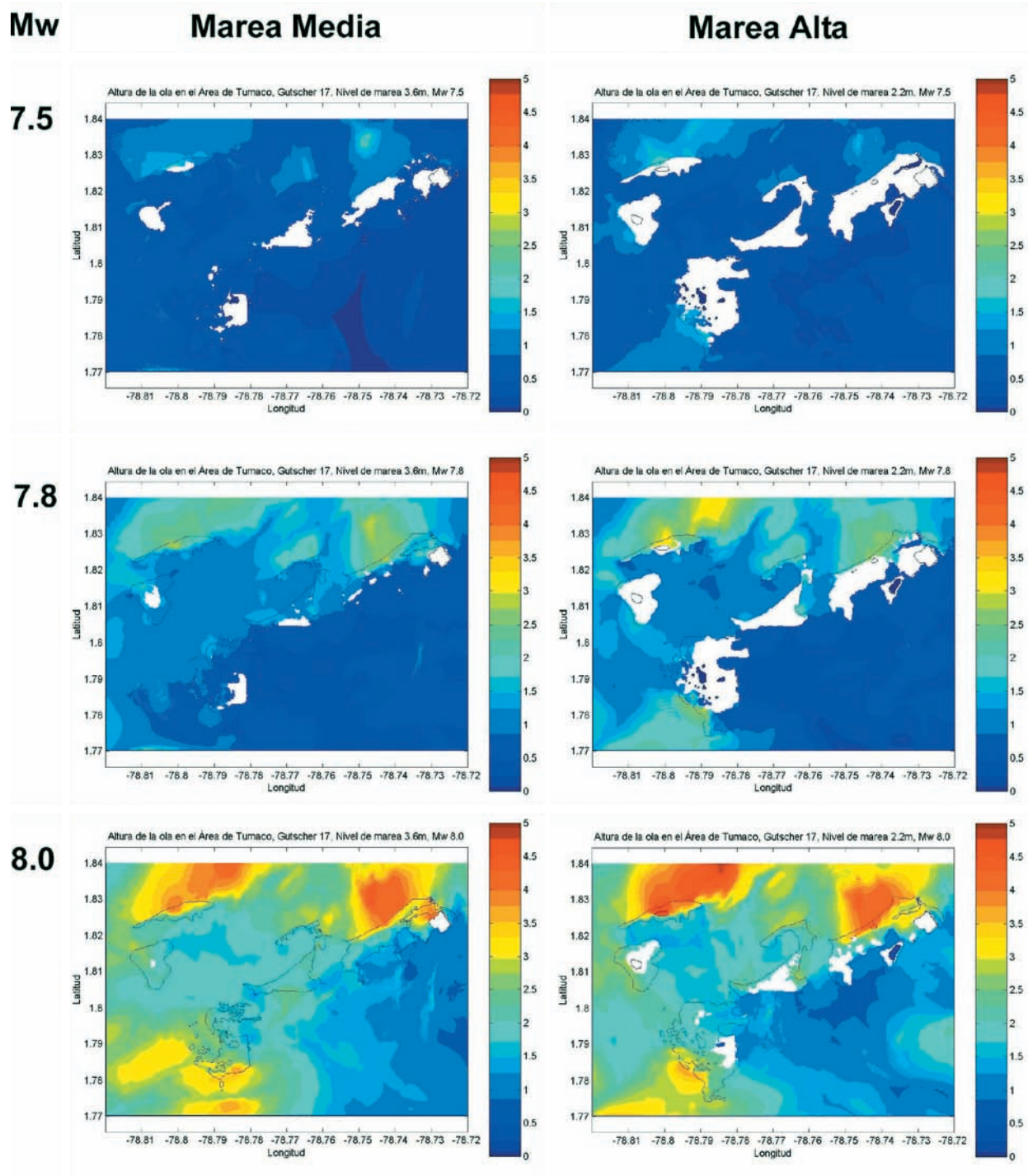


Figura 5. Distribución de la inundación máxima para la posición 3 durante marea alta y media con Mw de 7.5, 7.8 y 8.0.

Campos de velocidad

Se mencionó con anterioridad que el modelo TIME permite calcular, además del nivel, la velocidad de la lámina de agua en procura de crear mapas de

amenaza por inundación provocada por ondas de tsunami. Los campos de velocidad fueron extraídos para cada intervalo de tiempo (0.5s) durante el período modelado (2h); en la Figura 6 se muestran los campos de velocidad para la posición de sismo 3,

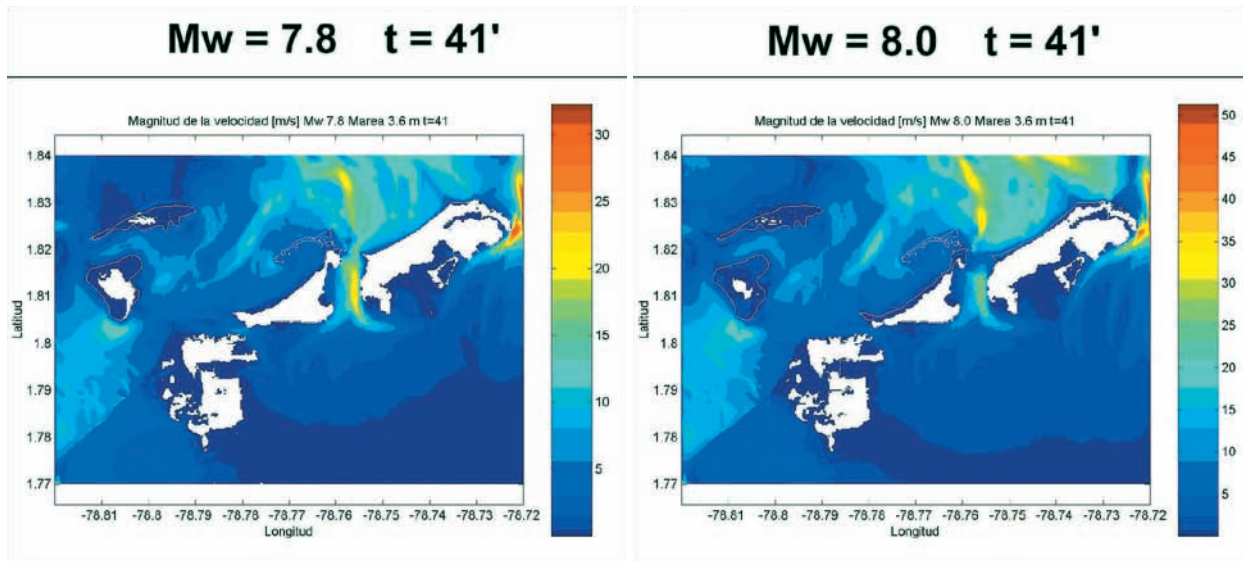


Figura 6. Campo de velocidad durante el minuto de arribo de la primera ola de tsunami para la posición del sismo 3.

con Mw de 8.0, para el tiempo de arribo de la primera onda de tsunami, y durante el estado de marea alta. En ella se observa que las mayores velocidades se concentran en dos sectores, bajo el puente que une las islas de El Morro y Tumaco, con velocidades promedio de 20m/s y en el canal de navegación con velocidades de 15m/s. Estos dos sectores son los que registran mayor profundidad en el dominio (12 y 8m, respectivamente)

El cálculo de la velocidad toma mayor relevancia al ser comparado con la altura de la lámina de agua inundante, ya que es esta combinación la que relaciona los potenciales efectos para los elementos expuestos a la amenaza: personas y edificaciones.

Amenaza por inundación provocada por tsunami

Los fenómenos naturales como el que aquí se contempla, de origen geológico, y sus efectos asociados representan un peligro latente que bien puede considerarse como una amenaza para el desarrollo social y económico de la región. Por sus características este evento ocurre en forma repentina e inesperada, causando sobre los elementos expuestos alteraciones representadas en: pérdida de vida y salud de la población; la destrucción o pérdida de los bienes del municipio, y daños severos sobre el medio ambiente. Además de causar desorganización de los patrones normales de vida y efectos sobre la estructura socio-económica.

El riesgo es determinado por la combinación de una amenaza y la vulnerabilidad; ésta última se refiere a los elementos expuestos a esta amenaza, los cuales pueden ser tangibles e intangibles. El riesgo existe si la amenaza incide negativamente sobre las poblaciones o sus actividades. Es decir, la amenaza por si sola no representa riesgo a menos que ésta afecte negativamente a un tercero, en este caso las poblaciones o sus actividades, las cuales pueden verse transformadas, interrumpidas o eliminadas por la manifestación de la amenaza.

La posición identificada como 3, dentro de las modelaciones, ofrece las mayores alturas de ola inundante, las cuales han transitado desde el sitio de generación hasta la entrada de la bahía de Tumaco, sin sobrepasar obstáculos que reduzcan su energía; el evento sísmico está ubicado sobre una de las porciones de la zona de subducción más activa en el Graben de Yaquina, para el escenario del sismo en esta posición, con Mw 8.0 (Fig. 5) y ocurrencia durante marea alta se presentará el campo de amenaza. Para este escenario, sólo el pequeño sector de color blanco que coincide con El Morro no sufre inundación, la isla donde se encuentra esa formación soporta las mayores alturas de onda y la isla de Tumaco es inundada con una lámina de agua de alrededor de 2m. Esta condición sugiere que, a excepción de El Morro, no existen zonas que se consideren seguras.

A partir de los campos de inundación y velocidad en el dominio para cada intervalo de cálculo (0.5s) se

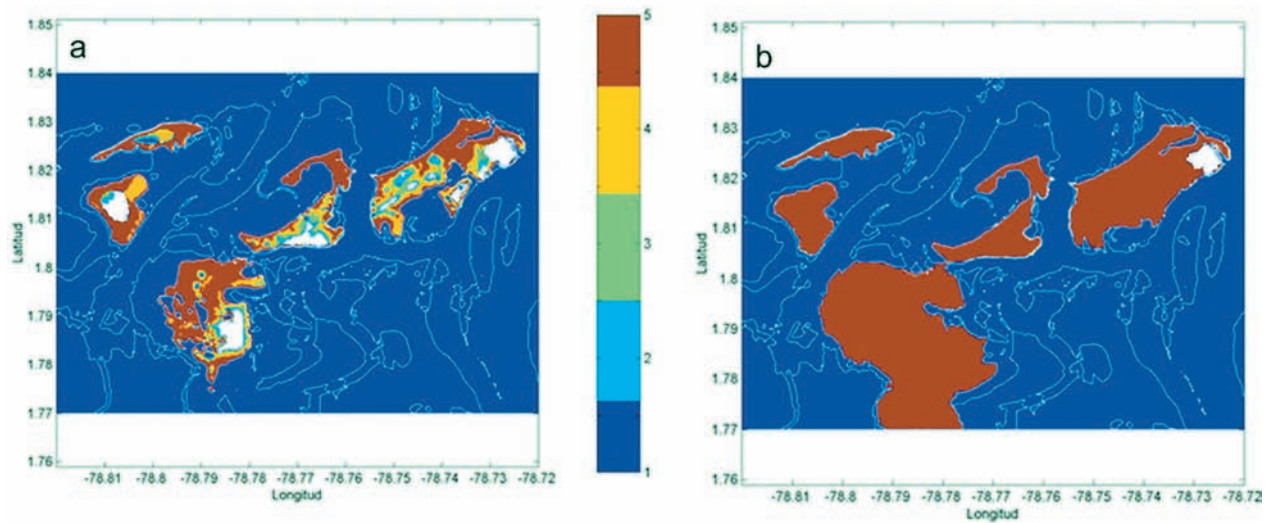


Figura 7. a. Clasificación de la amenaza por inundación, considerando el efecto conjunto de la velocidad y la profundidad durante el tránsito de la primera onda. b. Amenaza por inundación provocada por un tsunami para el casco urbano de Tumaco durante todo el evento de inundación.

calificó cada celda según las reglas de decisión de la Figura 4, las cuales corresponden al daño potencial que tienen lugar en la celda para un tiempo t así: Molestias (2); Daños moderados (3); Daños graves (4); pérdidas de vidas (5), las celdas que no fueron clasificadas tienen atributo (1). Con la clasificación máxima adquirida por cada celda durante todo el periodo modelado se construyó el mapa de amenaza por tsunami.

En la Figura 7a se aprecia la clasificación de la amenaza, considerando el transcurso de 15 minutos alrededor del arribo de la primera ola de tsunami, que para esta posición es la máxima registrada. De esta forma se dispone adicionalmente de la clasificación terreno seco o mojado, los daños que pueden causar condiciones particulares de velocidad y altura de agua inundante.

En la Figura 7b se muestra la amenaza producida por la inundación para los campos de altura de ola y velocidad durante dos horas, se observa que todo el terreno inundado ofrece condiciones suficientes para producir pérdidas de vidas, lo que sugiere que las medidas a implementar para el resguardo de la población deben ser muy sólidas. Para tomar decisiones de ordenamiento sobre terrenos particulares se recomienda aumentar el nivel de detalle para la evaluación de la amenaza lo que se resume en la elaboración de topografía de detalle.

CONCLUSIONES

- Durante la inundación en el borde costero las ondas de tsunami se superponen con la onda de marea, condición que modula la extensión y magnitud de la inundación, el régimen de marea en la bahía de Tumaco alcanza niveles máximos de hasta 4m, razón por la cual la coincidencia de ondas de tsunami con niveles altos, medios o bajos de marea generan campos de inundación completamente diferentes, pasando desde desastrosos hasta leves inundaciones. Durante marea baja la zona intermareal se convierte en un espacio de amortiguamiento de la inundación.

- El tiempo promedio requerido por las ondas de tsunami para el tránsito desde su origen hasta el casco urbano de Tumaco es de 20 a 35 minutos, condición que pone de manifiesto el poco tiempo disponible por los pobladores para realizar tareas de resguardo y por las autoridades locales y departamentales para la implementación de sistemas de alerta y de alarma, razón por la cual los planes de reacción deben ser simples, efectivos y precisos.

- Para la determinación de la amenaza por tsunami no es suficiente considerar sólo la altura de la lámina de agua inundante, la combinación de la altura y velocidad condicionan la magnitud de los daños en la zona inundada, los cuales varían desde leves molestias hasta pérdidas de vidas. Considerar sólo el nivel del agua puede enmascarar grandes peligros, es así como bajos niveles de onda inundante combinados con altas velocidades pueden producir

mayores daños que niveles altos de lámina de agua asociados con bajas velocidades.

- El escenario de inundación en todos los casos modelados y seleccionado para la evaluación de la amenaza por tsunami es el producido por un sismo en la posición (2.77 °N, 79.76 °O), con una magnitud de Mw 8.0 y arribo de las ondas de tsunami a la costa con coincidencia de nivel alto de la marea. Las alturas máximas registradas son cercanas a 4.75m y en promedio la zona inundada soporta 2m de altura de lámina de agua, el único sector que no sufre inundación es el sector conocido como El Morro, este escenario es completamente desastroso. La evaluación de la amenaza indica que toda el área inundada presenta condiciones suficientes para producir pérdidas de vidas, por lo tanto las medidas de protección implementarse deben ser sólidas y que realmente ofrezcan protección.

- La isla de Vaquería funciona como barrera natural de protección para la isla de Tumaco, ya que ella soporta el impacto inicial de las olas de tsunami y disipa gran parte de la energía, lo que se traduce en una reducción de hasta el 50% en las alturas máximas de ola incidente en la costa. Su actual funcionalidad se asemeja a la atribuida a la isla del Guano durante la ocurrencia de los tsunamis de 1906 y 1979.

AGRADECIMIENTOS

Los autores hacen mención y reconocimiento al apoyo directo y la asesoría que el Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), adscrito a la Dirección General Marítima (DIMAR), a través del Grupo de Investigación Modelado Integral de Zonas Costeras, brindó para la realización del presente trabajo.

LITERATURA CITADA

Caicedo, J. H., B. Martinelli, H. Meyer y J. A. Reyna. 1996. Simulaciones numéricas de propagación de tsunami para la costa Pacífica de Colombia. Memorias, X Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar, Comisión Colombiana de Oceanografía (COI), Bogotá, 14 pp.

Cardona, Y. 2005. Modelación de tsunamis en la costa Pacífica colombiana. Caso de aplicación bahía de Tumaco. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Postgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. Medellín.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2003. Aportes al entendimiento de la bahía de Tumaco, entorno oceanográfico, costero y de riesgo. (Ed.) DIMAR. San Andrés de Tumaco: CCCP, Serie Publicaciones Especiales Vol. 2, 168 pp.

Englant R. y R. Buland. 1998. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth relocation. Bulletin Seismologic Society American, (88): 722-743.

Goto, C., Y. Ogawa, N. Shuto y F. Imamura. 1997. IUGG/IOC TIME Project: Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme, Intergovernmental Oceanographic Comision of UNESCO, Manuals and Guide No. 35, París, Francia, 38 pp.

Gutscher M., J. Malavieille, S. Lallemand y J. Collot. 1999. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Canegie Ridge collision. Earth an planetary science letters, (168): 255-270.

INGEOMINAS. 2003. [En línea]. Colombia: Base de datos en línea eventos históricos e instrumentales. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Disponible en: <http://www.ingeqinas.gov.co/>

Mansinha, L. y D. E. Smylie. 1971. The displacement of the earthquake fault model. Bulll Seismol Soc Amer, (61): 1400-1433.

Meschede, M. y U. Barckhausen. 2000. Plate tectonic evolution of the Cocos - Nazca spreading center. En: Silver, E. A., Kimura, G. and T. H. Shipley. [en línea]. Proc. ODP, Sci. Results, 170 College Station, TX (Ocean Drilling Program). Disponible en: www-odp.tamu.edu/publications/170_SR/volume/chapters/SR170_07.PDF.

Paredes G. y M. Noya. 2004. Estrategia para mitigar daños en los abanicos aluviales: Enseñanzas de Vargas 1999. Memorias del II Simposio Venezuela.

Pennington, W. 1981. Subduction of eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. Journal Geophysics. Res. (86): 10753-10770.

Ortiz, M. y A. Quiceno. 2001. Evaluación del impacto de tsunamis en el litoral Pacífico colombiano. Parte I (Región Tumaco). Boletín Científico CCCP, (8): 5-14.

Smith, W. y D. Sandwell. 1997. Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*, (277): 1956-1962.

USGS. 2003. [en línea]. Earthquakes hazard program. Glosario de términos. United States Geological Survey. Disponible en: http://earthquake.usgs.gov/image_glossary/seismic_moment.html

Universidad Nacional de Colombia. 2003. Diseño de la metodología para la formulación de planes integrales de ordenamiento y manejo de microcuencas - PIOM - y su aplicación en la parte baja de la cuenca hidrográfica de la quebrada

la Iguaná. CONVENIO 053 DE 2001. Universidad Nacional - Sede Medellín / Corantioquia / Mi Río. Medellín.

Universidad del Cauca. 2003. Vulnerabilidad social por tsunami, inundación y licuación en el área insular del municipio de Tumaco. Convenio Universidad del Cauca - Dirección Nacional de Prevención y Atención de Desastres. Popayán.

Wells, D. y K. Coppersmith. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacements. *Bull Seism. Soc. Am.*, (84): 974-1002.

Yeh H., P. Liu y C. Synolakis. 1996. Long Wave Runup models. Word Scientific Publishing. Singapoure.