

ANÁLISIS DEL ARRIBO DE ONDAS DE TSUNAMI A LAS POBLACIONES DE LA BAHÍA DE TUMACO A TRAVÉS DE SEÑALES SINTÉTICAS

Ingeniera Civil Yuley Cardona Orozco

División de Zona Costera, Centro Control Contaminación del Pacífico -CCCP
Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia
Tél: +52 (2) 727 26 37, Fax: +57 (2) - 727 11 80
e-mail: cccp@cccp.org.co
ycardona@cccp.org.co - ymcardon@yahoo.com.ar

Recibido en junio de 2004; aceptado en julio de 2004

RESUMEN

La bahía de Tumaco, localizada en la zona sur del Pacífico colombiano, es una región amenazada por la ocurrencia de tsunamis. En ella se asientan catorce poblaciones de los municipios de Tumaco y Francisco Pizarro. Disponer de información acerca del tiempo esperado de arribo de tsunamis generados localmente, así como de la altura de las olas de tsunami y el período durante el cual las poblaciones se encuentran amenazadas, se convierte en una herramienta invaluable para la implementación efectiva de sistemas de alerta locales por tsunami. En el presente estudio se hace una simulación numérica de la generación y propagación de un tsunami frente a la bahía de Tumaco, con el objetivo de analizar el arribo de las ondas del tsunami a diez de las poblaciones asentadas en esta zona. El análisis permitió identificar la amplificación del tsunami por resonancia en algunas de las localidades, además de establecer los tiempos de arribo de las ondas de tsunami para cada una éstas.

Palabras claves: Tumaco, Tsunami, Sistema de Alerta, Resonancia, Amenaza, Simulación Numérica.

ABSTRACT

The bay of Tumaco, located in the southernmost Pacific coast of Colombia, is a region threatened by the occurrence of tsunamis. Fourteen coastal populations of the municipalities of Tumaco and Francisco Pizarro are settled along the bay. Previous information about the expected arrival time and height of tsunamis generated locally, and of the time lapse in which the populations are threatened after a tsunami is triggered by an earthquake, becomes an essential tool for the effective implementation of local tsunami warning systems. In this study we analyze the arrival of the tsunami at 10 of the populations settled along Bay of Tumaco by means of the numerical simulation of a tsunami generated offshore the Bay of Tumaco. Tsunami amplification by resonance was found in some of the localities. Arrival times and heights were established from the resulting synthetic tsunamis at each one of the localities.

Key words: Tumaco, Tsunami, Tsunami Warning, Resonance, Threatened, Numerical Simulation.

INTRODUCCIÓN

La bahía de Tumaco forma parte de la costa nariñense, en donde se tiene registro de la ocurrencia de cuatro tsunamis de origen cercano en la última centuria, acaecidos el 31 de enero de 1906, el 22 de mayo de 1942, el 19 de enero de 1958 y el 12 de diciembre de 1979 (HTDB/PAC, 2001). Es por ello que esta región se considera amenazada por este fenómeno natural.

El borde costero de la bahía comprende los municipios de Francisco Pizarro y Tumaco. En él se asientan catorce poblaciones, resaltándose el casco urbano del municipio de Tumaco por su alta densidad poblacional, que según registros del DANE (2000) poseía 80753 habitantes para el año 2003.

Anteriores investigaciones han determinado las zonas de inundación para el casco urbano de Tumaco, a partir del tsunami de 1979 y de la simulación numérica de éste (Quiceno y Ortiz, 2001). Sin embargo, los restantes asentamientos del borde costero de la bahía no han sido considerados dentro del análisis, debido principalmente a la ausencia de información batimétrica y topográfica adecuadas y a la dificultad de levantamiento de éstas por medio de métodos convencionales dadas las características propias del terreno (predominantemente manglar) y climatológicas de la zona.

Ante la imposibilidad de la elaboración de mapas de inundación por tsunami para las poblaciones de la bahía de Tumaco, resta estudiar lo que es viable con la información disponible; por ello este estudio surge del deseo de conocer las características esperadas del tren de ondas de un tsunami, generado localmente, llegando a cada una de estas poblaciones. Así, inicialmente, se elaboró una simulación numérica de un fenómeno de esta naturaleza, generado frente a la bahía de Tumaco, y se obtuvieron los mareogramas sintéticos del tsunami frente a la costa de las poblaciones de Punta Cascajal, Llanaje, La Chorrera, Soledad, Curay, Colorado, La Caleta, Trujillo, Tumaco y Vaquería.

De esta forma se pretende disponer de una aproximación en tiempo de arribo del tsunami, que se convierte en una herramienta para implementar sistemas locales de alerta de tsunamis útiles para las entidades locales y nacionales, de atención y prevención de desastres.

En conformaciones naturales como las de una bahía, las ondas del tsunami al reflejarse pueden

amplificarse por resonancia y por superposición.

Los resultados de la simulación numérica de tsunamis permiten identificar estos fenómenos en el área de estudio.

ÁREA DE ESTUDIO

Por las características del fenómeno, el área de estudio se subdividió en dos regiones con diferente resolución espacial. La primera es la región oceánica, suficientemente extensa para permitir que el tsunami sintético se propague mar adentro, evitando posibles reflexiones artificiales en las fronteras del modelo. Esta región comprende el área de generación del tsunami, la pendiente continental, las planicies abisales y la bahía de Tumaco (Fig. 1). La segunda región, anidada dentro de la primera y donde se centra la atención es la bahía de Tumaco (Fig. 2), localizada al extremo sur de la costa Pacífica colombiana en el departamento de Nariño posee un área de aproximadamente 350 km² (CCCP. 2003a), con una profundidad promedio de 12.23 m. La entrada de la bahía tiene una longitud de 23.06 km y desde ésta hasta Bocana Chagüí (punto más interno de la bahía) tiene una longitud de 23.93 km.

En la Figura 2 se indican las catorce poblaciones ubicadas en el borde costero de la misma y de las cuales se consideran diez en el análisis. En los asentamientos contemplados la actividad económica se centra en la pesca artesanal y la agricultura, sus construcciones son, principalmente, de madera y se ubican sobre terrenos de baja mar y retiros de ríos (CCCP. 2003a).

METODOLOGÍA

Los procedimientos aplicados persiguen un solo objetivo: extraer las señales sintéticas del tsunami, en puntos frente a las costas de cada una de las poblaciones contempladas en la bahía de Tumaco, que permitan obtener una idea de cómo es el arribo de las ondas de tsunami a ellas (altura de ola y tiempo de llegada).

El modelo utilizado en este trabajo para la extracción de las señales sintéticas del tsunami es el modelo de Goto *et al.*, (1997), disponible mediante el proyecto 'Tsunami Inundation Modeling for Exchange', TIME, de la Universidad de Tohoku.

Éste fue implementado con éxito en el Pacífico colombiano y calibrado con las observaciones del tsunami del 12 de diciembre de 1979, en el casco urbano del municipio de Tumaco (Quiceno y Ortiz, 2001) y en el casco urbano del municipio de Buenaventura (Caballero y Ortiz 2002).

El modelo numérico utiliza la teoría de aguas someras para ondas largas, donde la aceleración vertical de las partículas es despreciable comparada con la aceleración gravitacional; incluye la teoría no lineal, considerando la fricción que ofrece el fondo en la región de cálculo de la inundación. Está regido por el grupo de ecuaciones (1):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = A \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = A \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right)$$

donde,

x e y son las coordenadas horizontales,
 η es el desplazamiento vertical del agua sobre el nivel de referencia,
 g es la aceleración gravitacional,
 D es la profundidad total del agua que corresponde a la suma de $h + \eta$ (donde h es la profundidad desde el nivel de referencia hasta el fondo),
 M y N son las velocidades integradas en la vertical, en las direcciones x y y .

La fricción en el fondo se basa en la ley cuadrática de fricción y está controlada con el parámetro de rugosidad de Manning (m). En este modelo no se contempla la viscosidad interna del fluido.

La implementación del modelo requiere, principalmente, de información batimétrica y topográfica, en el dominio de cálculo, y precisa del mecanismo focal del sismo generador del tsunami. 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 información batimétrica ETOPO2 (Smith

& Sandwell, 1997), con una resolución de 2' de arco; cartas náuticas levantadas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, e información de detalle obtenida por el CCCP durante el año 2000 y la información topográfica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y CCCP 2000.

Los parámetros del sismo elegido durante el estudio fueron extraídos de Gutscher *et al.*, (1999); donde se expone la más reciente aproximación al mecanicismo de falla presente durante el evento del 12 de diciembre de 1979, el cual se describe a partir de los siguientes parámetros:

Extremo SW del plano de falla:	1.584° N, 79.386°W
Dislocación de la falla:	5.2 m
Longitud de la falla:	180 Km
Ancho de la falla:	70 Km
Rumbo del plano de la falla:	30°
Echado de la falla:	16°
Ángulo de desplazamiento sobre el plano de la falla (°):	118°

Las modelaciones se realizaron para un período de dos horas, en cuatro mallas anidadas; la primera corresponde a la región oceánica (Fig. 1) y las mallas interiores incluyen la bahía y el casco urbano de Tumaco. Los puntos donde se obtuvieron las señales sintéticas de tsunami y las poblaciones asociadas a cada una se ilustran en la Figura 3. Finalmente, son ocho puntos de control asociados a diez poblaciones. La ubicación precisa de ellos está contenida en la Tabla 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las señales sintéticas de tsunami extraídas para las poblaciones de la bahía (Fig. 4) tienen una resolución temporal de quince segundos, para un lapso de registro de dos horas, la altura de lámina de agua reportada no incluye el estado de marea.

Las señales sintéticas de tsunami para las poblaciones de Vaquería y Punta Cascajal (Fig. 4.a. y Fig. 4.h.), localizadas en la entrada de la bahía y donde las ondas de tsunami no han sido transformadas por el ingreso a la misma, son similares en su forma; por cuanto la primera ola es la de mayor magnitud y se presenta en los minutos 22 y 26, respectivamente, con una altura de 2.62 y 2.33 m.

La segunda ola de tsunami tiene una altura de alrededor de 1/3 de la primera, en ambas series, y se presenta en el minuto 49 para Vaquería y 57 para Punta Cascajal.

La siguiente población a la que hace arribo la onda de tsunami es Tumaco (Fig. 4.g.) en el minuto 31. Es, además, en este punto donde se presenta la mayor altura de ola de las series consideradas, 2.73 m; 28 minutos después llega la segunda ola con una altura de 1.38 m y no se repiten alturas de similar tamaño en el período modelado.

Frente a la costa de las poblaciones de Llanaje y La Chorrera (Fig. 4.b), las cuales se encuentran localizadas al Norte y en la parte intermedia de la bahía, la primera ola de tsunami hace su arribo en el minuto 42 con una altura de 1.53 m; 30 minutos después llega la segunda ola con una altura de 1.59 m, con lo cual se mantiene el lapso de tiempo entre la llegada de la primera y la segunda ola de las señales consideradas hasta este punto.

Analizando las series para los puntos localizados en la parte interna de la bahía se encuentran Soledad-Curay y Trujillo (Fig. 4.c. y 4.f.), ambos sitios de similares características; localizados, aproximadamente, a la misma distancia de la entrada de la bahía, 23 Km. La llegada de la primera ola con alturas de 2.31 y 2.49 m es registrada en los minutos 58 y 62, 30 minutos después de haber cruzado la entrada de la bahía. Esto, sin duda, es un elemento que ofrece a estas poblaciones un factor de protección, ya que las acciones concebidas dentro sus sistemas de alarma locales tendrían una confirmación por parte de los pobladores de las localidades de Vaquería, Punta Cascajal y Tumaco, con suficiente antelación. La segunda ola llega a Soledad y Curay 23 minutos después de la primera y para Trujillo 28 minutos después, para estas señales la altura con respecto a la primera ola es menor en un 20%, caso contrario a lo registrado en las poblaciones de la entrada de la bahía, donde éstas se atenúan en un 65%.

Restan las poblaciones de Colorado y La Caleta (Fig. 4.d. y 4.e.), las cuales se localizan en la parte más interior de la bahía, aproximadamente, a 24 km de la entrada de la misma; en estas señales se presenta una particularidad, ya que es la segunda ola la de mayor tamaño. Así la primera ola llega en el minuto 64, con una altura de 1.73 m para Colorado

y en el minuto 65, con una altura de 1.61 m, para La Caleta. En coherencia con el arribo de la segunda ola, a la entrada de la bahía, aproximadamente 30 minutos después del arribo de la primera, ésta se registra en los minutos 92 y 96, con alturas de 1.93 y 1.97 m, respectivamente.

Este hecho y la similitud de alturas entre la primera y la segunda ola en las poblaciones de Soledad, Curay y Trujillo, todas ellas ubicadas en la parte interna de la bahía, sugiere una superposición de la porción de onda reflejada de la primera ola que se encontraba en tránsito dentro de la bahía cuando la segunda hacía su recorrido de ingreso.

Para una profundidad promedio en la bahía de 12.23 m, la velocidad de fase de la onda es de 10.94 m/s, por lo tanto para recorrer los 23.93 km que tiene de longitud la bahía, desde la entrada hasta el punto más interno de ella, se toma 36.45 minutos. Si se considera que el tiempo transcurrido entre los picos sucesivos de olas de tsunami (período) es de 30 minutos, para la bahía de Tumaco se presenta un fenómeno conocido como resonancia y es el responsable de la amplificación de la segunda ola de tsunami para las poblaciones de Trujillo, Soledad, Curay, Colorado y La Caleta; para las dos últimas llegando a ser de ellas la más alta registrada durante el período de cálculo. Este fenómeno se presenta en también la bahía de Concepción, en Chile, según registros del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (PUC, 2003). En resumen se muestran todas las señales para las poblaciones consideradas en la Figura 5.

CONCLUSIONES

- El comportamiento típico de las señales sintéticas de tsunami en la entrada de la bahía consta de una ola de tamaño relativamente grande, seguida de pequeñas olas de tamaño inferior en un 50%.
- Para las señales extraídas en los puntos interiores de la bahía, el efecto de resonancia de la ola hace que el comportamiento general sea de hasta dos olas similares de gran magnitud, seguidas por otras de altura inferior al 50% de las dos anteriores.
- De las localidades mencionadas, el primer punto al que llega la onda de tsunami es Vaquería; sitio donde, además, se registra la segunda mayor altura comparada con las demás señales.
- Ordenando las localidades de acuerdo al menor tiempo de arribo del tsunami, se tiene:

Vaquería, Punta Cascajal, Tumaco, Llanaje-La Chorrera, Soledad-Curay, Trujillo, Colorado y La Caleta, ver en detalle la Tabla 2. La diferencia en el tiempo de arribo entre Vaquería y La Caleta es de 42 minutos, los cuales se convierten en un lapso de tiempo valioso para la implementación, por parte de las autoridades locales, de los planes de contingencia por tsunami, ya que dispondrían de una confirmación del arribo del tsunami y de su magnitud por la poblaciones cercanas a la entrada de la bahía.

- Al ordenar descendientemente las señales sintéticas de tsunami, según la mayor altura registrada en todo el período modelado, se tienen en primer y segundo lugar a Tumaco y Vaquería, ambas ubicadas en la entrada sur de la bahía. En tercer lugar está Trujillo, una de las poblaciones localizada en la parte más interna del área de estudio; donde, pese a la pérdida de energía por fricción durante el tránsito del tsunami dentro de la bahía, la resonancia hace que se posicione por encima de Punta Cascajal, que ocupa el cuarto lugar y está ubicada en la entrada norte de la bahía de Tumaco. En la quinta posición se encuentra Soledad-Curay, que se considera ubicada en la zona media de la bahía. Las posiciones sexta y séptima están ocupadas por La Caleta y Colorado, que, a diferencia de las demás, se posicionan así por el arribo de la segunda ola. Este fenómeno justificado por la resonancia que tiene lugar en la bahía. La última posición la ocupa Llanaje - La Chorrera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Caballero, L. y M. Ortiz. 2002. Evaluación del Impacto de Tsunamis en el Litoral Pacífico Colombiano. Parte II (Región Buenaventura). Boletín Científico CCCP No 9. Pp. 37-46.

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH. Información batimétricas, cartas: Col 76084 escala 1:10000, Col15384 escala 1:30000, Col15084 escala 1:25000, col14984 escala 1:50000, col153184 escala 1:30000.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2003a. Aportes al Entendimiento de la Bahía de Tumaco. Ed. DIMAR. Serie Publicaciones Especiales Vol. 2, Bogotá, 168 pp.

Centro Control Contaminación del Pacífico, 2003b. Memoria Técnica del Mapa de Inundación

por Tsunami de Origen para el Casco Urbano del Municipio de Tumaco. Informe Técnico. División de Zonas Costera. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2001. Proyección de la Población 2005. DANE. Bogotá, Colombia.

Goto, C., Y. Ogawa, N. Shuto and 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, pp. 38.

Gutscher M.A., J. Malavieille, S. Lallemand, J.Y. Collot, 1999. Tectonic Segmentation of the North Andean Margin: Impact of the Carnegie Ridge Collision. Earth and Planetary Science Letters 168, Elsevier, pp. 255-270.

HTDB/PAC, 2001. Historical Tsunami Database for the Pacific, 47BC - 2000 AD. CD-ROOM, Tsunami Laboratory, ICMMG SD RAS, Novosibirsk, Rusia.

Pontificia Universidad Católica de Chile. 2003. Curso Geografía del Mar. PUC. [en-línea] URL: http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h71.html

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

Quiceno, A. y M. Ortiz, 2001. Evaluación del Impacto de Tsunamis en el Litoral Pacífico Colombiano. Parte I (Región Tumaco). Boletín Científico CCCP No. 8.Pp. 5-14.

FIGURAS Y TABLAS

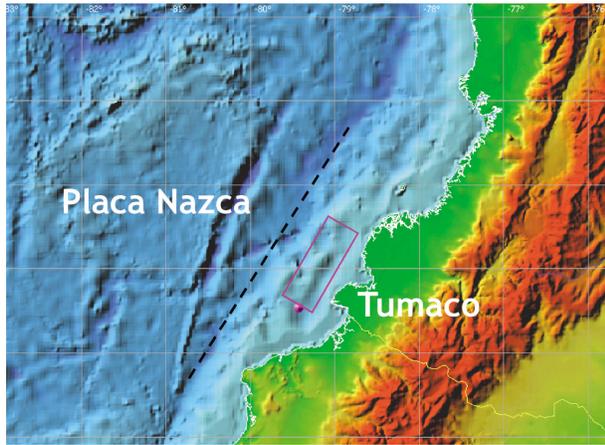


Figura 1. Área de estudio general. El rectángulo indica el área de generación del tsunami en la posición del sismo del 12 de diciembre de 1979.

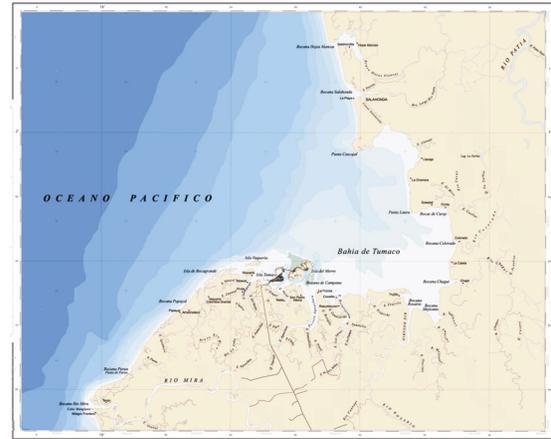


Figura 2. Detalle de la bahía de Tumaco. Donde se indica la ubicación de las poblaciones en el borde costero de la misma.

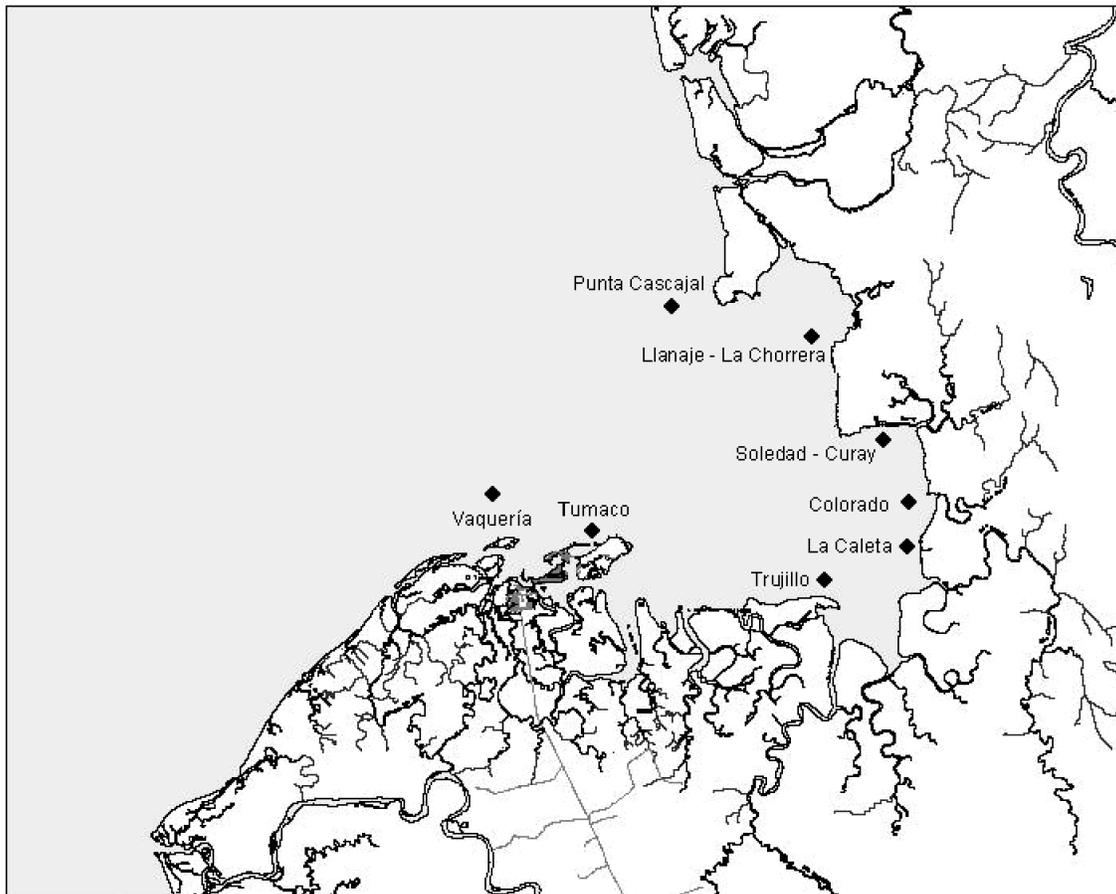


Figura 3. Ubicación de los puntos donde se extrajeron las señales sintéticas de tsunami para las poblaciones mencionadas.

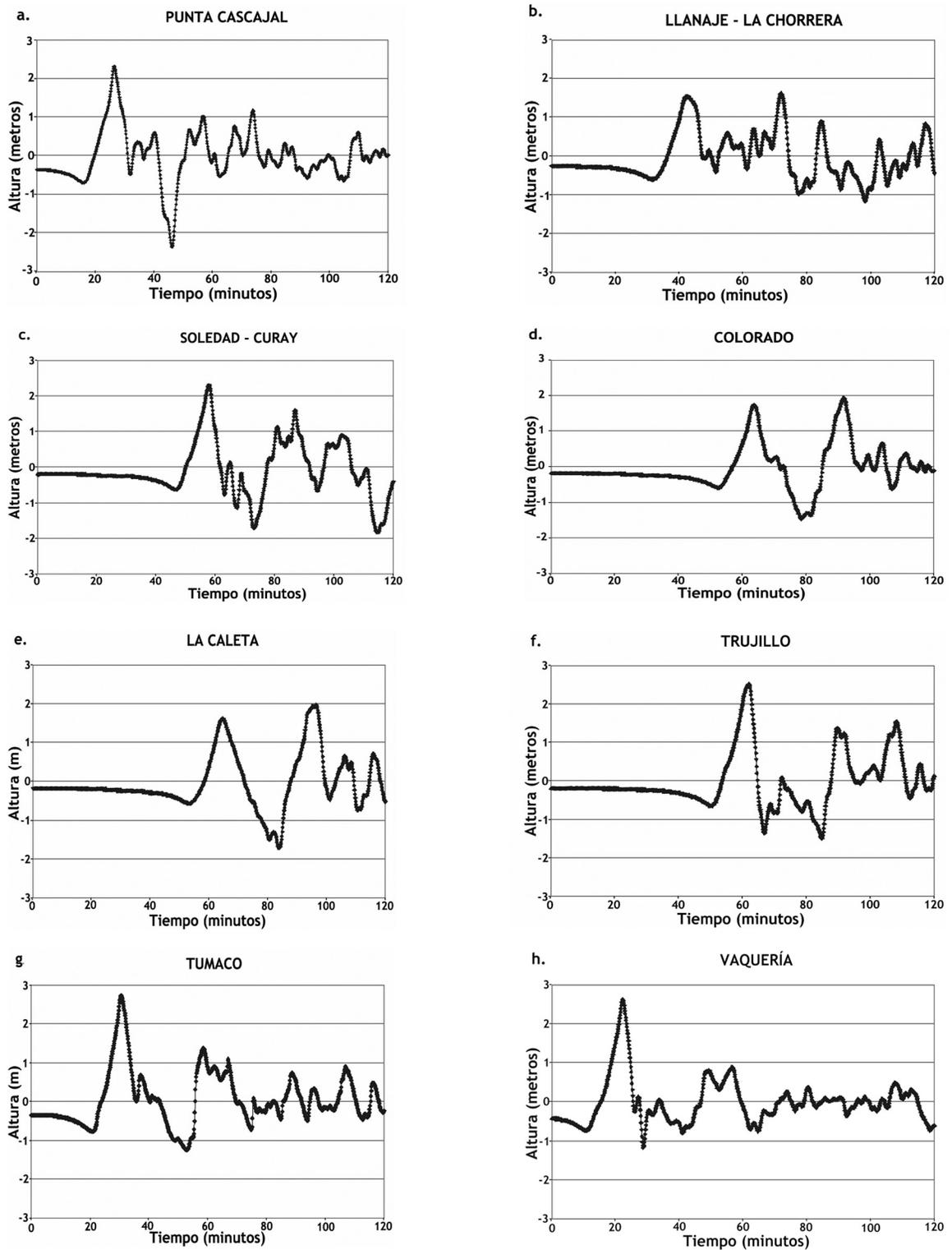


Figura 4. Señales sintéticas de tsunami para las poblaciones de la bahía de Tumaco, durante 120 minutos de modelación: a. Punta cascajal, b. Llanaje - La Chorrera, c. Soledad - Curay, d. Colorado, e. La Caleta, f. Trujillo, g. Tumaco y h. Vaquería.

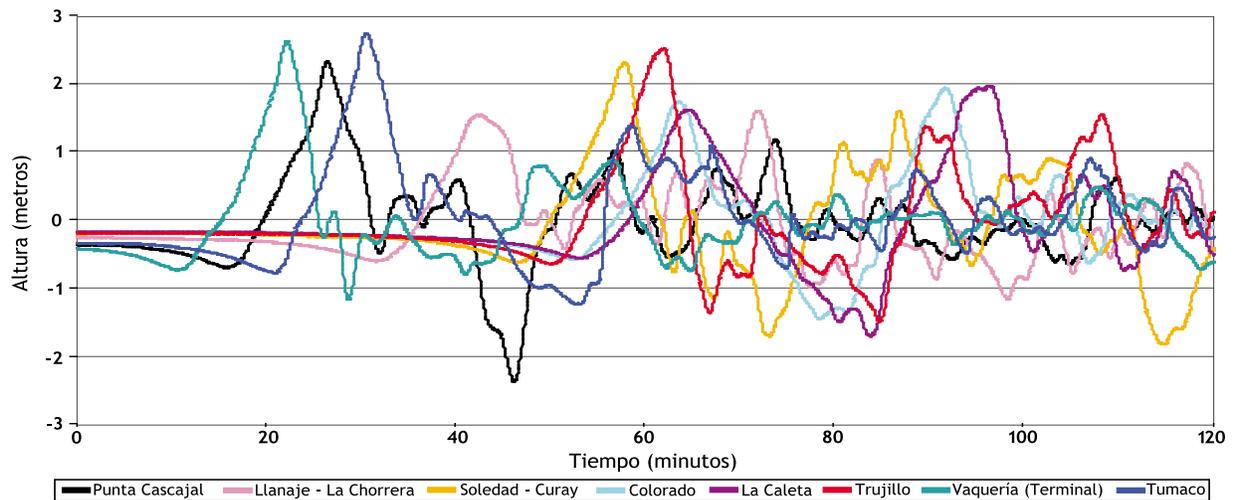


Figura 5. Señales sintéticas de tsunami para las poblaciones de la bahía de Tumaco.

Tabla 1. Posiciones de las señales sintéticas de tsunami para las poblaciones de la bahía de Tumaco.

Población	Longitud (°)	Latitud(°)
Punta Cascajal	-78.6985528	1.97568056
Llanaje - la Chorrera	-78.6151472	1.95427167
Soledad - Curay	-78.5708278	1.89872500
Colorado	-78.5596397	1.85851389
La Caleta	-78.5703092	1.83479806
Trujillo	-78.6082167	1.81427778
Tumaco	-78.7584667	1.83453110
Vaquería	-78.8091389	1.85655556

Tabla 2. Orden de arribo de la primera onda de tsunami a las poblaciones de la bahía de Tumaco consideradas (la altura de ola no considera estado de marea).

Población	Tiempo de llegada (minutos)	Altura de la ola (m)
Vaquería	22	2.62
Punta Cascajal	26	2.33
Tumaco	31	2.74
Llanaje - La Chorrera	42	1.54
Soledad - Curay	58	2.31
Trujillo	62	2.49
Colorado	64	1.73
La Caleta	65	1.61