

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE TSUNAMIS EN EL LITORAL PACÍFICO COLOMBIANO. PARTE II (REGIÓN DE BUENAVENTURA)

Liliana Caballero ¹
Modesto Ortiz ²

¹ División Zona Costera, Centro Control Contaminación del Pacífico - CCCP
Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia
Tél. (57-2) – 727 26 37, Fax: (57-2) – 727 11 80. e-mail: cccp@cccp.org.co

² Departamento de Oceanografía, Centro de Investigación Científica y
de Educación Superior de Ensenada – CICESE
Km 107 Carretera Tijuana - Ensenada. Ensenada, C.P. 22860, Baja California, México

Recibido en noviembre de 2001; aceptado en mayo de 2003

RESUMEN

Las zonas de inundación para la ciudad de Buenaventura fueron delimitadas mediante la implementación del modelo numérico TIME en esta región. El análisis detallado de los resultados arrojados por el modelo permitió determinar el epicentro dentro de la falla sísmica Colombo-Ecuatoriana, eventualmente más peligroso para ésta población. Tomando como base dicho origen se estudió el impacto de eventos con distintas magnitudes y diferentes condiciones de marea. El estudio de condiciones de vulnerabilidad y las ventajas que presenta sobre otras poblaciones sugiere a Buenaventura como posible centro de operaciones, para poblaciones cercanas, en caso de presentarse una emergencia de este tipo.

Palabras claves: Buenaventura, TIME, Tsunami, Falla Sísmica, Zonas de Inundación, Vulnerabilidad.

ABSTRACT

The flood zones for Buenaventura city were delimited by using the numerical model TIME. The obtained results allowed determining the eventually most dangerous epicenter, inside the Colombo-Ecuadorian fault, for this population. Taking into account this origin, the impact of events with different magnitudes and tide levels was studied. The study of both, vulnerability conditions and advantages over other towns, suggests Buenaventura as a possible operations center, for near towns, in the case of an emergency.

Key words: Buenaventura, TIME, Tsunami, Fault, Flood Zones, Vulnerability.

INTRODUCCIÓN

Buenaventura, uno de los principales puertos marítimos colombianos, está ubicado en cercanías de la falla sísmica Colombo-Ecuatoriana que abarca la zona de subducción entre las placas Nazca y Suramericana, la cual generó durante el siglo pasado cuatro eventos sísmicos (1906, 1942, 1958 y 1979) de gran importancia que afectaron la costa Pacífica colombiana (Ramírez, 1980, Soloviev y Go 1984, Soloviev, *et al.*, 1992). Estos eventos tsunamigénicos dejaron como saldo miles de víctimas humanas e incontables pérdidas materiales. Dichas evidencias y el hecho de que esta zona sea considerada como una de las de mayor actividad sísmica en el país (García, *et al.*, 1984) dejan claro

que deben determinarse áreas más seguras para las poblaciones costeras para ser utilizadas como refugios ante una emergencia de esta naturaleza.

Éste y estudios anteriores (Quiceno, 2000 y Quiceno y Ortiz, 2001) hacen parte de los esfuerzos del CCCP, con el apoyo de DIMAR, por desarrollar estrategias de prevención para mitigar los posibles daños que podría causar a futuro un evento de esta naturaleza sobre la costa Pacífica colombiana.

Las zonas de inundación, las alturas y los tiempos de arribo de las olas de tsunami son obtenidos mediante la implementación, en la región de interés, del modelo numérico japonés Tsunami Inundation Modeling for Exchange, TIME (por sus siglas en inglés); desarrollado bajo el auspicio de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental, COI, en coordinación con el Grupo de Coordinación Internacional para el Sistema de Prevención de Tsunami en el Pacífico, ICG/ITSU. Los resultados del modelo han sido validados mediante la comparación con registros históricos para la costa Pacífica colombiana por Quiceno y Ortiz (2001), demostrando que éste es apropiado para la simulación de este tipo de fenómenos en el área de estudio.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio escogida para la simulación contiene parte de la falla sísmica Colombo-Ecuatoriana sobre la costa Pacífica colombiana y la ciudad de Buenaventura, incluyendo a la isla de Cascajal, para las cuales se realizaron los mapas de inundación. La batimetría de la zona, que incluye la falla sísmica o de generación del tsunami y la región de Buenaventura se dividió, para fines de cómputo, en tres grillas de diferente tamaño y resolución; variando desde 27 segundos, para la grilla que abarca la región de generación, hasta una resolución de un segundo para la grilla que cubre el área de Buenaventura. La información batimétrica y topográfica, utilizada para la interpolación de los datos reales a los nodos de las grillas, se obtuvo y adaptó de diferentes fuentes (Smith y Sandwell, 1997, CIOH e IGAC). El nivel de marea se mantuvo constante para todo el tiempo simulado.

La grilla que abarca la zona de generación se muestra en la Fig.1., las coordenadas geográficas de ésta son 1° N a 5.5° N, 80° N a 76.5° N. Esta región corresponde a parte de la costa Pacífica colombiana y contiene a las bahías de Buenaventura y Málaga, áreas en las que se encuentran asentadas algunas poblaciones importantes como la Base Naval de la Armada Nacional ARC, Isla Palma, La Bocana y Punta Soldado. La Fig.2 muestra una grilla intermedia y las ubicaciones correspondientes a estas poblaciones. La grilla de mayor resolución contiene a las poblaciones de Buenaventura e isla de Cascajal, como se observa en la Fig.3. Las coordenadas geográficas de esta región son: 3.85° N a 3.92 ° N, 77.12 ° W a 76.95° W.

METODOLOGÍA

La evolución de tsunamis que contempla tres etapas, generación, propagación e inundación, sigue los siguientes lineamientos, en el marco del modelo TIME:

En la etapa de generación la forma inicial del tsunami se determina usando el modelo de Mansinha-Smylie (1971), el cual supone que la deformación instantánea de la superficie del océano es igual a la deformación vertical del lecho marino. En este estudio, guiados por los registros históricos y siguiendo lo propuesto por Quiceno y Ortiz (2001), se tomaron, para los casos simulados, los siguientes valores de los parámetros sísmicos: echado 30° y profundidad de la falla 10000 m; el rumbo se alineó de manera que coincidiera con la dirección de la brecha sísmica; la dislocación se tomó con una dirección de 120° , y su magnitud se varió en un rango de 0.5 a 6 m, con el fin de simular diferentes escenarios sísmicos.

La propagación del tsunami se modela mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas de aguas someras, bajo la condición de frontera móvil que permite evaluar el nivel de inundación en la costa (Goto, *et al.*, 1997). La validez de estas ecuaciones y su eficacia han sido ampliamente discutidas por diversos autores (Lamb, 1932 y Pedlosky, 1979), mostrando ser exitosas en la reproducción de inundación por tsunamis (Shuto, *et al.*, 1986; Takahashi *et al.*, 1995; Ortiz, *et al.*, 2000a; Ortiz, *et al.*, 2000b; Ortiz, *et al.*, 2000c). El método numérico empleado es un esquema de diferencias centrales con un error de truncación de segundo orden (leap-frog scheme).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante los resultados del modelo fue posible obtener mapas de inundación, que representan las alturas de ola máxima en todo tiempo para cada nodo de la grilla, para Buenaventura y mareogramas sintéticos, o gráficos de alturas de ola y tiempo de llegada en dos áreas de interés: la grilla intermedia de la Fig.2. y la grilla de Buenaventura Fig.3. Los puntos en estas figuras corresponden a la ubicación de los mareógrafos que en este contexto de simulación se denominarán virtuales.

Es obvio que un sismo generado frente a la bahía de Buenaventura representará mayor riesgo para esta población. Sin embargo, a fin de evaluar los tiempos de llegada y las alturas de ola generadas por distintos epicentros, y desarrollar mecanismos efectivos de reacción por parte de la comunidad para cada evento, se escogieron como áreas de ruptura sobre la falla sísmica las indicadas en la Fig.1. En las tablas 1 y 2 se muestran las alturas (H) y tiempos (T) de llegada de la primera ola, obtenidos de los mareógrafos virtuales de la grilla intermedia (Fig.2.) y de Buenaventura (Fig.3.). Los resultados de estas tablas corresponden a una condición de marea media con una magnitud constante de 8.05 en la escala de Richter.

Las tablas revelan que los eventos más peligrosos para Buenaventura son los originados en $79^\circ W$ $2.9^\circ N$ y en $78.8^\circ W$ $3.5^\circ N$. El tiempo de reacción para su población es del orden

de 90 minutos, en caso de evacuación, con alturas de ola de aproximadamente 1.4 m. Las diferencias de tiempo de llegada de la primera ola para estos sismos no son mayores a cinco minutos, lo cual para fines de reacción de la población no representa un tiempo relevante. De otro lado, la diferencia de alturas para estos dos eventos en la grilla intermedia puede ser del orden de los 2 m, diferencia que puede provocar daños desastrosos. Por estas razones, se considera el último de estos dos epicentros como el potencialmente más peligroso para la comunidad de Buenaventura y con base en éste se generaron los resultados correspondientes a la inundación causada por olas de tsunami originadas por terremotos de diferente intensidad y bajo distintas condiciones de marea.

En las tablas 3 y 4 se consignan los resultados obtenidos para sismos de diferentes intensidades en condiciones de marea media. En la Tabla 5 aparecen las alturas máximas obtenidas durante cuatro horas de tiempo simulado en los nodos de la grilla correspondiente al área de Buenaventura.

Las variaciones en la altura de las olas con la intensidad del sismo generador indican que para la grilla intermedia hay cambios apreciables del nivel del mar para eventos con intensidades mayores o iguales a 7.7. En un primer acercamiento y teniendo en cuenta la topografía de esta zona, particularmente la de bahía Málaga, estos resultados indican que para la máxima intensidad simulada (8.2) la Base Naval de la Armada Nacional ARC (correspondiente al punto 3 de la Fig.2.) y Ladrilleros (punto 2) no se verían gravemente afectados; pues aunque las alturas de ola son considerablemente grandes, hasta 8 m, la altura sobre la que se encuentran asentadas estas localidades es de 25 msnm. Lo contrario sucedería para la población de Isla Palma (punto 1), donde las alturas de ola pueden llegar a ser de 4 m e inundar esta región somera. Igualmente ocurriría para los caseríos de La Bocana (punto 5) y Punta Soldado (punto 6), regiones con topografías bajas, del orden de 1 o 2 msnm, en las que las alturas de ola llegan a los 5 m. No obstante, un análisis detallado del riesgo para estos caseríos demanda la generación de mapas de inundación y por ende se requeriría de información batimétrica más precisa de estas áreas.

Los resultados para Buenaventura, tablas 4 y 5, muestran que cambios del orden de centímetros en el nivel del mar, para condiciones de marea media, se obtienen para eventos de intensidades mayores o iguales a 7.7. Para la magnitud máxima simulada, 8.2, las alturas pueden llegar hasta los 2 m (punto 7 en Fig.3). Específicamente, para las cercanías a la isla de Cascajal es de aproximadamente 1 m y menores a esta cantidad para la zona costera de Buenaventura (puntos 3, 4 y 5 en la Fig.3.).

De la comparación de los datos obtenidos en las grillas intermedia y de Buenaventura puede observarse que existe un cambio considerable en las alturas de ola en estas dos áreas. Esto implica, como puede observarse en los registros virtuales ubicados en el canal de navegación (puntos 5 a 14, Tabla 3.), que la mayor cantidad de energía es disipada en la entrada al canal; de manera que las poblaciones que se encuentran asentadas en la entrada y a lo largo de éste serían las más afectadas. A su llegada a la zona de Buenaventura la altura de las olas disminuiría, apreciablemente, por la pérdida de energía a su paso por el canal.

Los anteriores resultados pueden verse drásticamente modificados si el nivel de marea es mayor. Para evaluar el efecto de la condición de marea sobre las alturas máximas de ola de tsunami se consideró un evento de magnitud 8.2 bajo condiciones de marea media y alta. En la Tabla 6 se anotan las alturas máximas de inundación en cada caso y en las figuras 4 y 5 se aprecian las áreas inundadas correspondientes a estos eventos.

Los resultados anteriores muestran, efectivamente, que la condición de marea es determinante a la hora de evaluar el impacto de la ola de tsunami. Para el caso de marea alta, las alturas de ola máxima obtenidas del campo de agua en todo punto y para todo instante de tiempo triplican a las alturas obtenidas en condición de marea media. El mapa de inundación muestra que en cercanías a la isla de Cascajal las alturas máximas de ola para un sismo de 8.2, en condición de marea alta, son del orden de 3.5 m y para Buenaventura de 2.5 m, Fig.5. También se observa que el área inundada en este caso es mayor.

Estos resultados permiten establecer al evento de magnitud 8.2 con epicentro 78.8W 3.5N, en condición de marea alta, como el más peligroso dentro de los eventos estudiados, para el cual se elaboró el mapa de inundación (Fig. 6.) que se propone como base para la toma de decisiones y planes de contingencia por parte de las autoridades competentes.

CONCLUSIONES

Los resultados expuestos para las cercanías al canal de navegación dejan en claro el alto peligro que enfrentan las comunidades asentadas en La Bocana y Punta Soldado. Para estas poblaciones, planes de reacción y de educación relacionados con la convivencia con el riesgo deben ser desarrollados de manera expedita.

Según este estudio las zonas más afectadas por tsunami en Buenaventura son las zonas bajas de la isla de Cascajal y la zona costera de Buenaventura, representadas, entre otras por los barrios: Santa Cruz, Miramar, Santa Fe, El Porvenir, Punta del Este y las zonas industrial y comercial, por ser las que enfrentarían el ataque directo de las olas.

Pese a esta situación, Buenaventura presenta ventajas respecto a otras poblaciones de la costa Pacífica que por su ubicación se encuentran en riesgo de ataque de olas de tsunami, ya que su topografía no costera es montañosa con alturas de hasta 70 msnm. De otro lado, las alturas de ola del tsunami se ven, considerablemente, disminuidas por su paso a través del canal de navegación como se encontró en este estudio. Los mapas de inundación muestran a la parte oriental de la zona continental de Buenaventura, una gran extensión de territorio, como una región favorecida ante el ataque de un tsunami. Adicionalmente, el tiempo de reacción para esta población, alrededor de 90 minutos, permite dar un aviso de alarma que, bajo planes de contingencia efectivos, alerte a la población en riesgo.

No obstante, la falta de información sobre esta amenaza a la población, el hecho de que la mayoría de las zonas en alto riesgo estén construidas sobre rellenos sanitarios y sin ningún tipo de normas de sismoresistencia, y la alta densidad de población de estas zonas hacen más vulnerable a esta comunidad. Por lo tanto es prioritaria la difusión de la información contenida en el mapa de inundación aquí presentado, entre la comunidad; el establecimiento de rutas de evacuación, y la pronta educación de la población en cuanto a estrategias de reacción.

En términos generales, para una reacción eficaz en la eventualidad de un ataque de olas de tsunami, a la luz de los resultados obtenidos por el presente estudio y con los planes de contingencia a ser diseñados por las autoridades competentes, puede decirse que la zona central de la isla de Cascajal y la zona occidental de Buenaventura (áreas en verde del mapa de inundación mostrado en la Fig.6.) son lugares apropiados para implementar centros de operaciones y/o albergues para las comunidades cercanas en mayor riesgo (áreas en color crema de la Fig.6.).

Se recalca que son muchas las poblaciones de la costa Pacífica colombiana que, por su ubicación, se encuentran bajo el mismo riesgo. Los análisis de este estudio se concentraron en las cercanías de la región de Buenaventura. A pesar de que esta ciudad cuenta con la mayor infraestructura (aunque no suficiente) en la costa Pacífica para el desarrollo de centros de operaciones, los tiempos de reacción para las comunidades asentadas fuera de esta zona podrían ser insuficientes para una apropiada evacuación hasta dichos centros. Por lo tanto, la simulación de inundación por tsunami para otras regiones es el paso a seguir para la determinación de mapas de inundación, tiempos de reacción y la implementación de planes de contingencia para las demás poblaciones en riesgo de la costa Pacífica colombiana.

AGRADECIMIENTOS

Los autores están especialmente agradecidos con Alexandra Quiceno, por su apoyo y cooperación al desarrollo de este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). Información batimétrica, cartas: Col76084 escala 1:10000, col15384 escala 1:30000, col15084 escala 1:25000, col14984 escala 1:50000, col153184 escala 1:30000.

García, L., A. Sarria, A. Espinosa, C. Bernal y M. Puccini.1984. Estudio General del Riesgo Sísmico de Colombia, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá.

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 Commission of UNESCO, Manuals and Guides # 35, Paris, Francia, 38 pp.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. Mapas Cartográficos escala 1:2000, casco urbano de Buenaventura, planchas cartográficas escala 1:25000: costa del Valle del Cauca 259I, III, IV (1969,1988,1969); 260 III (1970,1968); 278II, IV (1968,1988); 298I, II, III (1988); 279I (1971).

Lamb, H. 1932. Hydrodynamics, Cambridge University Press, 738 pp.

Mansinha, L. y E. Smylie. 1971. The Displacement Field of Inclined Faults. BSSA, 61, Pp. 1433-1440.

Ortiz, M., E. Gómez-Reyes y H. Vélez-Muñoz. 2000a. A Fast Preliminary Estimation Model for Transoceanic Tsunami Propagation. Geof. Int., 39, (3), Pp. 1-14.

Ortiz, M., S. Singh, V. Kostoglodov y J. Pacheco. 2000b. Source areas of the Acapulco-San Marcos, Mexico earthquakes of 1962 (M 7.1; 7.0), as constrained by tsunami and uplift records. Geof. Int., 39, (4), Pp. 337-348.

Ortiz, M., V. Kostoglodov, S. Singh y J. Pacheco. 2000c. New constraints on the uplift of October 9, 1995 Jalisco-Colima earthquake (M_w 8) based on the analysis of tsunami records at Manzanillo and Navidad, Mexico. Geof. Int., 39,(4), Pp. 349-357.

Pedlosky, J. 1979. Geophysical Fluid Dynamics. Springer-Verlag, New York, 624 pp.

Quiceno, A. 2000. Proyecto Evaluación del Impacto de un Tsunami sobre al Zona Costera de Tumaco por medio de la modelación matemática, Centro Control Contaminación del Pacífico, Armada Nacional de Colombia.

Quiceno, A. y M. Ortiz. 2001. Evaluación del Impacto de Tsunamis en el Litoral Pacífico Colombiano (Región de Tumaco), Boletín Científico, Armada Nacional de Colombia, Pp. 5-14.

Ramírez, J. 1980. Informe Preliminar Terremotos Colombianos noviembre 23 y diciembre de 1979.

Shuto, N., T. Suzuki, K. Hasegawa, y K. Inagaki, 1986. A study of numerical techniques on the tsunami propagation and run up. Science of Tsunami Hazard, 4, (2), Pp. 111-124.

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

Soloviev, S. y Ch. Go. 1984. A catalogue of tsunamis on the eastern shore of the Pacific Ocean, Moscow, 'Nauka' Publishing House, 202 pp. English translation: Soloviev S.L., Go Ch. N. (1984). A catalogue of tsunamis on the eastern shore of the Pacific ocean, Translation by Canada Institute for Scientific and Technical Information, National Research Council, Ottawa, Canada KIA OS2.

Soloviev, S., Ch. Go y K. Kim. 1992. Catalog of Tsunamis in the Pacific 1969-1982. Geophysical Committee of the Academy of Sciences of the USSR, 207 pp.

Takahashi, T., T. Takahashi, N. Shuto, F. Imamura y M. Ortiz. 1995. Source Models of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake tsunami. A Topical Issue of Pure and Applied Geophysics, 144, (No. 3/4), Pp. 747-767.

FIGURAS Y TABLAS

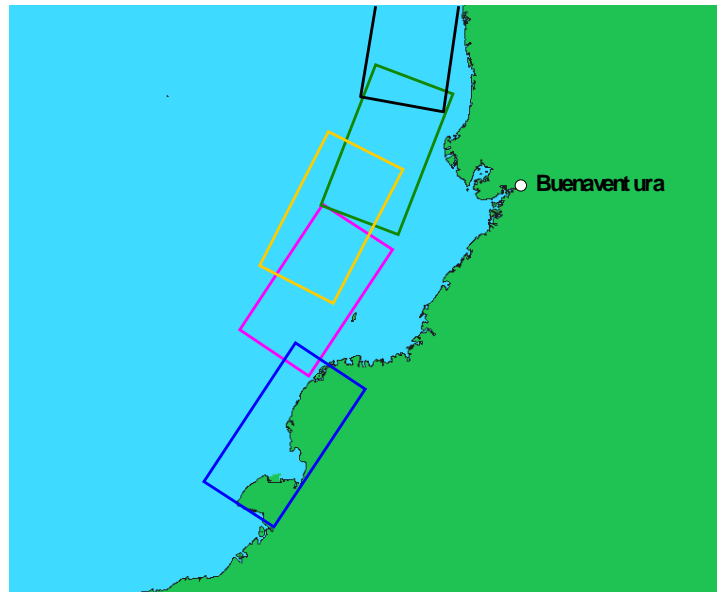


Figura 1. Área de estudio escogida para la modelación de la generación, propagación e inundación por tsunami en la CPC. Las coordenadas geográficas de esta zona son: 1° N a 5.5 ° N, 80 ° N a 76.5 ° N. Las áreas de ruptura sobre la falla sísmica escogidas para la generación de olas de tsunami se esquematizan mediante cuadrados. Los epicentros son en orden ascendente: 79.4W 1.6N, 79W 2.9N, 78.8W 3.5N, 78.2W 4.1 N, 77.9W 5.1N.



Figura 2. Puntos escogidos para la generación de mareogramas sintéticos en una grilla intermedia que cubre poblaciones importantes asentadas sobre Bahía Málaga. La Base Naval de la Armada Nacional corresponde al punto 3, isla Palma al punto 1, La Bocana al punto 5 y Punta Soldado al punto 6.

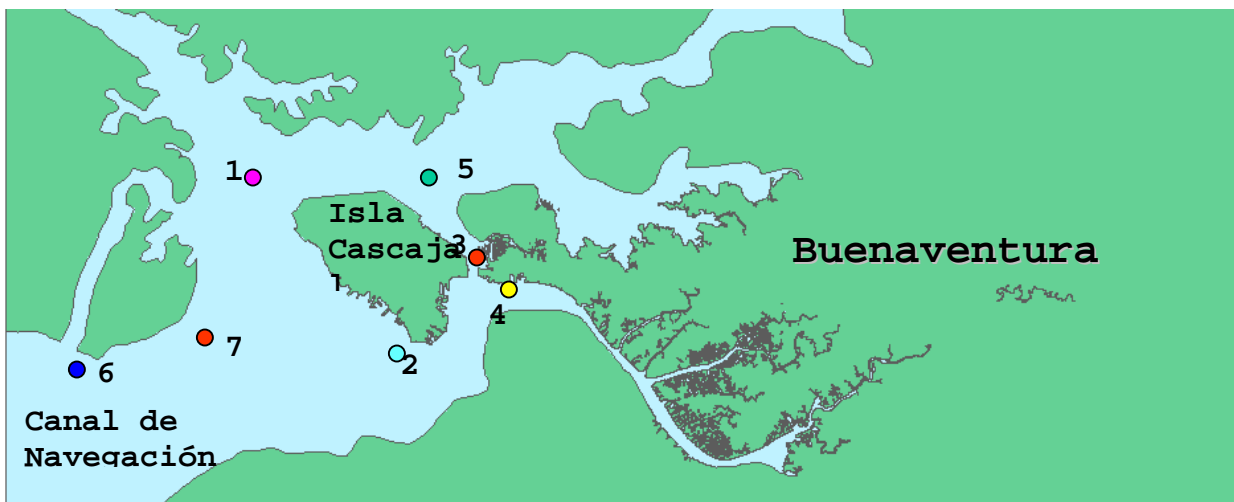


Figura 3. Puntos escogidos para la generación de mareogramas sintéticos en el área de Buenaventura. Las coordenadas geográficas correspondientes a esta zona son: 3.85° N a 3.92° N, 77.12° W a 76.95° W.

Tabla 1. Altura (H) en metros y tiempo de llegada (T) en minutos de la primera ola registrada por los mareógrafos virtuales ubicados en la grilla intermedia del área de estudio.

| Punto de Observación | 1 * | | 2 * | | 3 * | | 4 * | | 5 * | | 6 * | |
|----------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) |
| 79.4W 1.6N | 56.7 | 0.27 | 54.1 | 0.43 | 80.1 | 0.21 | 78.5 | 0.48 | 94.5 | 0.72 | 90.3 | 0.65 |
| 79.01W 2.9N | 35.3 | 0.86 | 33.6 | 1.6 | 56.8 | 0.4 | 45.8 | 1.2 | 64.8 | 1.9 | 64.0 | 1.45 |
| 78.8W 3.5 N | 37.6 | 2.2 | 36.2 | 4.4 | 61.5 | 0.8 | 48.6 | 3.1 | 67.6 | 3.6 | 66.5 | 2.3 |
| 78.2 W 4.1N | 36.2 | 1.3 | 34.1 | 2.7 | 60.1 | 0.7 | 46.7 | 1.74 | 66.4 | 1.7 | 65.5 | 1.15 |
| 77.9 W 5.1N | 49.8 | 0.5 | 49.7 | 0.7 | 71.6 | 0.2 | 59.4 | 0.5 | 79.2 | 0.5 | 83.0 | 0.3 |

Tabla 2. Altura (H) en metros y tiempo de llegada (T) en minutos de la primera ola registrada por los mareógrafos virtuales ubicados en el área de Buenaventura.

| Punto de Observación | 1 * | | 2 * | | 3 * | | 4 * | | 5 * | |
|----------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) |
| 79.4W 1.6N | 123.8 | 0.57 | 133.6 | 0.31 | 152.5 | 0.16 | 165.5 | 0.15 | 131.8 | 0.36 |
| 79W 2.9N | 97.4 | 0.97 | 102.8 | 0.4 | 109.5 | 0.5 | 158.2 | 0.2 | 104.7 | 0.57 |
| 78.8W 3.5N | 99.5 | 1.28 | 104.3 | 0.5 | 110 | 0.8 | 154 | 0.3 | 106.8 | 0.7 |
| 78.2 W 4.1N | 101.1 | 0.96 | 119.2 | 0.47 | 113.7 | 0.54 | 153.7 | 0.27 | 111.9 | 0.59 |
| 77.9 W 5.1N | 114.1 | 0.27 | 119.7 | 0.09 | 160.3 | 0.04 | 165.9 | 0.04 | 121.8 | 0.17 |

Tabla 3a. Altura (H) en metros y tiempo de llegada (T) en minutos de la primera ola registrada por los mareógrafos virtuales ubicados en la grilla intermedia área de estudio.

| Punto de observación | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | |
|----------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) |
| 6.9 | 41 | 0.02 | 39.4 | 0.06 | 65 | 0.008 | 52 | 0.03 | 70 | 0.03 | 69 | 0.03 | 76 | 0.02 |
| 7.2 | 42 | 0.05 | 38 | 0.08 | 64 | 0.01 | 51 | 0.05 | 70 | 0.06 | 68 | 0.04 | 75 | 0.03 |
| 7.5 | 41 | 0.12 | 37 | 0.24 | 63 | 0.04 | 50 | 0.18 | 69 | 0.2 | 67 | 0.14 | 75 | 0.12 |
| 7.7 | 39 | 0.3 | 36.5 | 0.5 | 61 | 0.09 | 49 | 0.4 | 68 | 0.5 | 66 | 0.35 | 74 | 0.3 |
| 7.9 | 38 | 1.4 | 36 | 2.7 | 61 | 0.5 | 48.5 | 1.97 | 68 | 2.2 | 66.4 | 1.36 | 74 | 1.2 |
| 8.1 | 38 | 2.7 | 36 | 5.3 | 62 | 0.96 | 49 | 3.6 | 68 | 4.0 | 67 | 2.5 | 74 | 2.3 |
| 8.2 | 38 | 3.2 | 36 | 6.3 | 62 | 1.2 | 49 | 4.4 | 68 | 4.8 | 67 | 3 | 74 | 2.7 |

Tabla 3b. Altura (H) en metros y tiempo de llegada (T) en minutos de la primera ola registrada por los mareógrafos virtuales ubicados en la grilla intermedia área de estudio.

| Punto de observación | 8 | | 9 | | 10 | | 11 | | 12 | | 13 | | 14 | |
|----------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) |
| 6.9 | 89 | 0.02 | 80.5 | 0.01 | 88 | 0.01 | 93 | 0.01 | 82 | 0.01 | 73 | 0.01 | 90 | 0.01 |
| 7.2 | 84 | 0.03 | 82 | 0.02 | 86.5 | 0.02 | 92 | 0.02 | 75. | 0.03 | 84 | 0.03 | 82 | 0.02 |
| 7.5 | 83 | 0.12 | 80.5 | 0.07 | 86 | 0.08 | 91 | 0.09 | 80 | 0.08 | 73 | 0.09 | 89 | 0.096 |
| 7.7 | 82 | 0.3 | 79.2 | 0.2 | 84 | 0.2 | 90 | 0.2 | 79 | 0.2 | 72 | 0.27 | 87 | 0.29 |
| 7.9 | 82 | 1.3 | 79.5 | 0.8 | 85 | 0.98 | 90 | 0.92 | 79 | 0.93 | 72 | 1.04 | 87 | 1.05 |
| 8.1 | 82.5 | 2.4 | 80 | 1.6 | 85 | 1.8 | 90 | 1.6 | 79 | 1.7 | 72 | 1.9 | 87.5 | 1.8 |
| 8.2 | 82.5 | 2.9 | 80 | 1.9 | 85 | 2.2 | 90 | 1.9 | 79 | 2.05 | 72 | 2.3 | 87.5 | 2.2 |

Tabla 4. Altura (H) en metros y tiempo de llegada (T) en minutos de la primera ola registrada por los mareógrafos virtuales ubicados en Buenaventura. El guión (-) indica que para todo tiempo la altura es 0 metros.

| Punto de observación | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | |
|----------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) | T (min) | H (m) |
| 6.9 | 102 | 0.009 | 110 | 0.008 | - | 0 | 138 | 0.004 | 111.7 | 0.008 | 90 | 0.01 | 95 | 0.01 |
| 7.2 | 101 | 0.02 | 125.5 | 0.02 | - | 0 | 137 | 0.005 | 110 | 0.01 | 89 | 0.03 | 94 | 0.02 |
| 7.5 | 100 | 0.06 | 108 | 0.04 | - | 0 | 134 | 0.007 | 109 | 0.05 | 88 | 0.1 | 93 | 0.09 |
| 7.7 | 99 | 0.18 | 106 | 0.07 | 168 | 0.02 | 166 | 0.01 | 108 | 0.11 | 86.5 | 0.3 | 92 | 0.24 |
| 7.9 | 98 | 0.56 | 105 | 0.18 | 112 | 0.3 | 171 | 0.07 | 107 | 0.3 | 87 | 1.0 | 91 | 0.8 |
| 8.1 | 98 | 0.8 | 105 | 0.3 | 109 | 0.68 | 167 | 0.19 | 107 | 0.5 | 87 | 1.8 | 91 | 1.4 |
| 8.2 | 96 | 0.97 | 105 | 0.4 | 108 | 0.8 | 164 | 0.25 | 106 | 0.56 | 86.5 | 2.1 | 91 | 1.6 |

Tabla 5. Altura de ola máxima vs. intensidad del sismo para el área de Buenaventura.

| Intensidad | Altura Máxima de Inundación (m) |
|------------|---------------------------------|
| 6.9 | 0.63 |
| 7.2 | 0.62 |
| 7.5 | 0.65 |
| 7.7 | 0.76 |
| 7.9 | 1.5 |
| 8.1 | 2.18 |
| 8.2 | 2.55 |

Zonas de Inundación en el Área de Buenaventura, Mw=8.2, Marea media

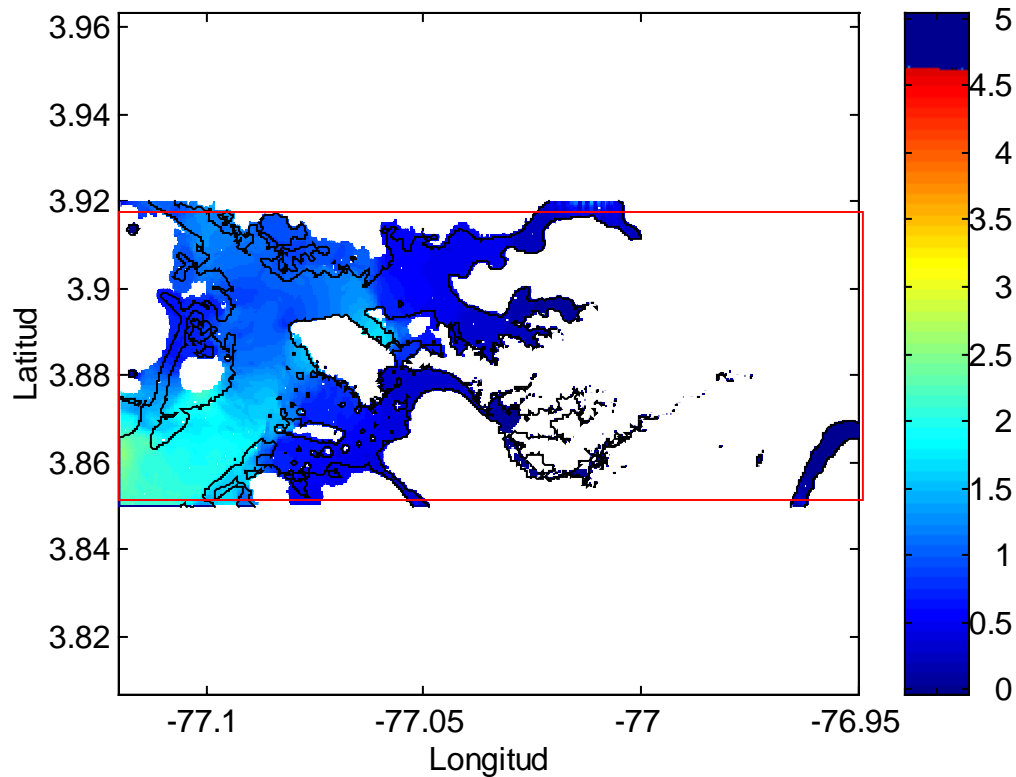


Figura 4. Mapa de inundación para un evento con origen en 78.8W 3.5N, magnitud 8.2 y con un nivel de marea media. Las áreas blancas dentro del cuadro rojo representan las zonas que permanecen secas y los colores indican, según la escala adjunta, la altura máxima de ola encontrada para todo el tiempo simulado.

Tabla 6. Efecto de la marea sobre la altura máxima de inundación.

| Condición de Marea | Intensidad | Máximo de Inundación (m) |
|--------------------|------------|--------------------------|
| Media | 8.2 | 2.55 |
| Alta | 8.2 | 6.24 |

Zonas de Inundación para el Área de Buenaventura, Mw=8.2, Marea Alta

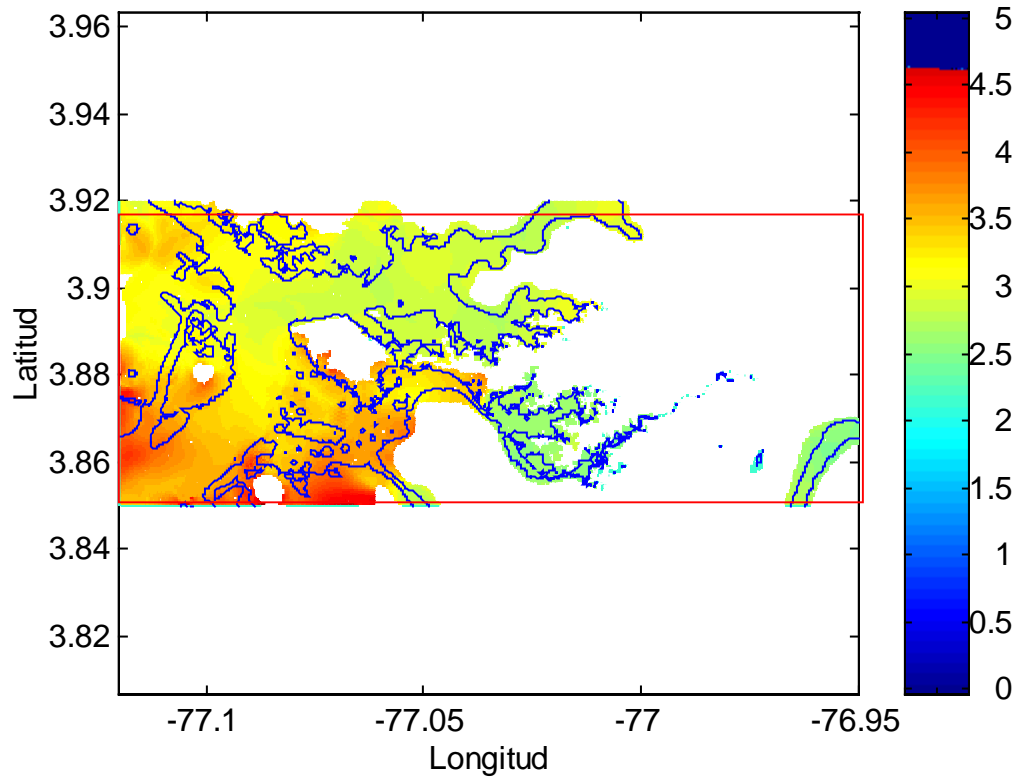


Figura 5. Mapa de inundación para un evento con origen en 78.8W 3.5N, magnitud 8.2 y con un nivel de marea alto. Las áreas blancas representan las zonas que permanecen secas y los colores indican, según la escala adjunta, la altura máxima de ola encontrada para todo el tiempo simulado.

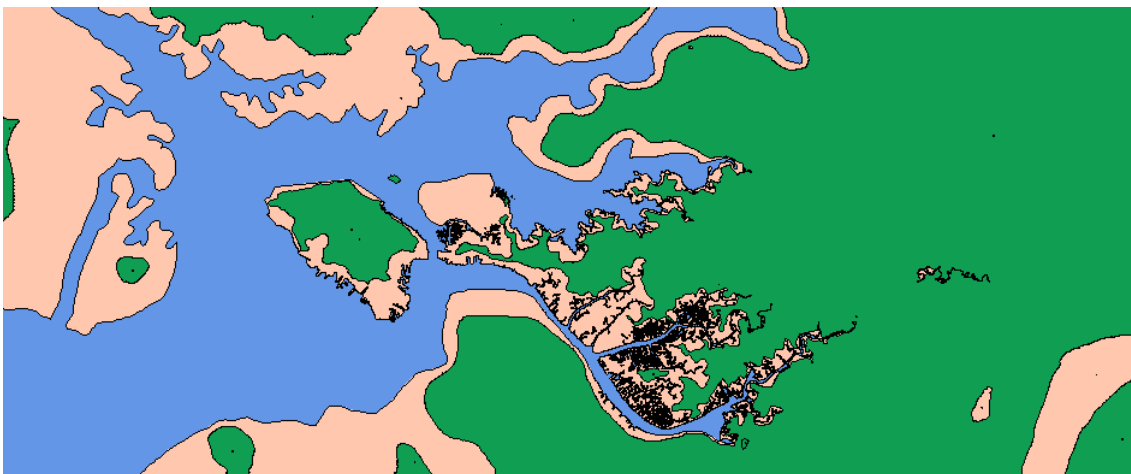


Figura 6. Contornos de inundación por tsunami incorporados al sistema de información geográfica CARIS, para un evento con origen en 78.8W 3.5N, magnitud 8.2 y con un nivel de marea alto.