

ARTÍCULO



Peligrosidad debido a tsunamis en la Costa Pacífica colombiana: en el Golfo de Cúpica

Tsunami hazards in the Colombian Pacific Coast: Cupica's Gulf

Fecha recepción: 2010-05-22 / Fecha aceptación: 2010-11-03

Gary Javier González Núñez, gary.gonzalez@armada.mil.co.

*Jefe Departamento de Operaciones ARC "Cartagena de Indias",
Base Naval ARC "Bolívar", Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia*

Luis Otero Díaz, lotero@cioh.org.co.

*Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH),
Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia*

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa el grado de amenaza al que se encuentra expuesto el Golfo de Cúpica (Chocó), en caso de presentarse un evento tsunamigénico. Para la generación y propagación de los eventos seleccionados en la evaluación, se utilizó el modelo numérico C3 (Cantabria, COMCOT y TsunamiCLAW). Los resultados muestran que el evento que generaría un mayor impacto es el propuesto en la zona de subducción colombo - ecuatoriana de la fuente histórica del tsunami ocurrido en 1906, donde el primer tren de ondas llega a las costas 40 minutos después de haberse producido el evento, generando un desplazamiento máximo de la superficie libre de 6 m y alturas de olas de hasta 2.5 m. Otras posibles fuentes generadoras de tsunamis fueron propuestas, la primera entre Cabo Corrientes y Arusí, y la segunda entre Arusí y Cabo Marzo, ambas en sentido noroeste. Los resultados obtenidos con las dos nuevas fuentes propuestas muestran que el segundo evento (Arusí – Cabo Marzo) genera olas con una altura máxima de 2 metros para Ciudad Mutis y Huina, muy similares a los valores presentados para el evento de 1906. Ciudad Mutis debe considerarse como el corregimiento con más alta amenaza en caso de un evento tsunamigénico, ya que presenta los mayores valores de máximo desplazamiento de la superficie libre. Se encontró que la configuración del Golfo de Cúpica, la Punta de Solano, los demás accidentes morfológicos y la batimetría de la zona, generan efectos resonantes que provocan la concentración de energía de las ondas de tsunami, agravando el impacto del fenómeno en la zona costera de la Bahía de Solano.

Palabras claves: Tsunami, Golfo de Cúpica, ciudad Mutis, modelo numérico C3.

ABSTRACT

This article assesses the threat level to which the Gulf of Cupica (Chocó) is exposed, should an event of a tsunamigenic sort occur. The C3 numerical model (Cantabria, COMCOT and TsunamiCLAW) was used for the generation and propagation of the selected events in the assessment. The results show that the event which would generate greatest impact is the event proposed in the Colombian - Ecuadorian subduction zone of the historical source of the tsunami which occurred in 1906. In this event, the first wave train reached the coast 40 minutes after the event occurred, subsequently generating maximum displacement of the free surface equivalent to 6 m and wave heights up to 2.5 m. Other potential tsunami - generating sources were proposed; the first source is between Cabo Corrien-

INTRODUCTION

Tsunamis are phenomena which occur infrequently, but represent a greater threat than earthquakes, hurricanes and tornadoes [1]. For instance, there was an earthquake on December 26th, 2004 in the Indian Ocean with a magnitude $M_w = 9.0$ [2], which generated a series of tsunamis that considerably affected several countries, causing more than 227.898 [3] fatalities on the shores of Asia and Africa. Among the countries that were affected by the tsunami there are: Indonesia, Thailand, Sri Lanka, India, Bangladesh, Burma, Malaysia, Maldives, Somalia, Kenya, Tanzania and Seychelles, among others.

The coasts of Colombia have not been unrelated to the impact of tsunamis. During the XX century, there were 4 major earthquakes South of the Colombian Pacific Coast, with $M_w > 7.6$, which generated tsunami waves. The largest one occurred on January 31st, 1906 ($M_w = 8.8$). Similarly tsunamis of tectonic origins were originated on May 14th, 1942 ($M_w = 7.6$), January 19th, 1958 ($M_w = 7.7$), and the latest one took place on December 12th, 1979, with an $M_w = 8.2$ [4,5].

On August 15, 2007 the Center for the Pacific Tsunami Warning Centre (PTWC), warned of a possible phenomenon of tsunami generated by an earthquake near the coast of Peru and which would probably affect the Colombian Pacific coast. National authorities triggered the tsunami contingency plans, especially in the towns of Buenaventura, Tumaco and Ciudad Mutis, beginning with the evacuation of coastal areas. However, for the evacuation of the coastal area of Bahía Solano, the authorities and the Local Emergency Committee did not have a preliminary study in order to establish potential areas for evacuation of the municipality and the surrounding townships, and therefore no evacuation plan or response plan for an alert in the event of a tsunami had been implemented.

Several authors have conducted studies on the assessment of the impact of tsunamis on the Pacific coast of Colombia, within which the following are worth mentioning: Quiceno and Ortiz [6] assessed the impact of tsunamis in the region of Tumaco; Caballero and Or-

tiz [7] assessed the impact of tsunamis in the Buenaventura region; Cardona [8] analyzed the arrival of tsunami waves in the townships of Tumaco Bay through synthetic signals; Cardona, *et al.*, [9] estimated the threat of a flood generated by tsunami waves, considering the height and speed of the water wall which would reach the municipality of Tumaco; Restrepo and Otero [10] carried out the numerical modeling of tsunamigenic events in the Colombian Pacific Basin - Buenaventura Bay; Bastidas [11], conducted risk assessment for tsunamis originated nearby the Bay of Buenaventura. However, the studies conducted to date have not assessed the impact of a tsunami in the northern Colombian Pacific, especially in the Gulf of Cupica area, where the largest population settlements of the Pacific coast area are located.

As a result, this article aims primarily at the assessment of the level of threats to which the Gulf of Cupica is exposed, due to tsunamis originated nearby, in order to generate information which will aid in the development of emergency, contingency and evacuation plans. The following methodology was followed in order to achieve this objective: (1) identification of potential tsunami sources, (2) selection of the worst credible seismic case scenarios, (3) defining the conditions of sea level (4) generation and propagation of events using the C3 numerical model (Cantabria, COMCOT and Tsunami CLAW) and (5) representation of the flooding process.

SEISMOTECTONICS AND HISTORICAL SEISMICITY

The Gulf of Cupica is located north of the Colombian Pacific Coast and is limited by Punta de Solano and Cabo Marzo (figure 1). The Gulf of Cupica contains important coastal towns such as: Ciudad Mutis, El Valle, Cupica Mecana, Nabugá, Huaca and Huina, which belong to the municipalities of Bahía Solano and Cupica, and appertain in turn to the Department of Chocó. The approximate population for this area is 9,094 inhabitants [12].

This region makes part of the margin of the Northern Andes (figure 2), which is a region of intense underwater crustal deformation, especially in the area where the Carnegie Ridge is subducted down into the Ecuador. This section of the subduction zone has produced six major earthquakes in the last century. The largest earthquake took place in 1906, had a magnitude equiva-

tes and Arusí, and the second source is located between Arusí and Cabo Marzo; both are northwest - bound. The results obtained with the two new sources proposed show that the second event (Arusí - Cabo Marzo) generates waves with a maximum height equivalent to 2 meters for Ciudad Mutis and Huina. Said waves are quite similar to the values reported for the 1906 event. Ciudad Mutis is to be regarded as the district with the highest threat in case of the occurrence of an event of a tsunamigenic sort, since it yields the highest values of maximum displacement of the free surface. It was found that the configuration of the Gulf of Cupica, Punta de Solano, other morphological accidents and the bathymetry of the area generate resonant effects which cause the energy of tsunami waves to concentrate, thus aggravating the impact of the phenomenon in the Bahía de Solano coastal zone.

Key words: Tsunami, Gulf of Cupica, ciudad Mutis, numerical model C3.

INTRODUCCIÓN

Los tsunamis son fenómenos que ocurren con poca frecuencia pero representan una mayor amenaza que los terremotos, huracanes y tornados [1]. Como muestra de lo anterior, el 26 de diciembre de 2004 se produjo un sismo en el Océano Índico con una magnitud $M_w=9.0$ [2], el cual generó una serie de tsunamis que afectaron considerablemente a varios países, causando más de 227,898 [3] víctimas fatales en las costas de los continentes asiático y africano. Entre los países que fueron afectados por el tsunami se encuentran: Indonesia, Tailandia, Sri Lanka, India, Bangladesh, Burma, Malasia, Islas Maldivas, Somalia, Kenia, Tanzania y las Islas Seychelles, entre otros.

Las costas de Colombia no han sido ajenas al impacto de tsunamis. Al sur de la Costa Pacífica Colombiana se presentaron durante el siglo XX cuatro grandes terremotos con $M_w > 7.6$, que generaron ondas de tsunami. El más grande de ellos ocurrió el 31 de enero de 1906 ($M_w=8.8$). De igual forma se originaron tsunamis de origen tectónico el 14 de mayo de 1942 ($M_w=7.6$), el 19 de enero de 1958 ($M_w=7.7$), y el último se registró el 12 de diciembre de 1979, con una $M_w=8.2$ [4,5].

El 15 de agosto de 2007 el Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWC), alertó sobre un posible fenómeno de tsunami generado por un terremoto ocurrido cerca de las costas peruanas y que probablemente afectaría a la costa Pacífica Colombiana. Las autoridades nacionales activaron los planes de contingencia por tsunami, especialmente en las ciudades de Buenaventura, Tumaco y Ciudad Mutis, iniciando con la evacuación de las zonas costeras. Sin embargo, para la evacuación de la zona costera de Bahía Solano, las autoridades

y el Comité Local de Emergencias no contaban con un estudio preliminar que estableciera las posibles áreas de evacuación de la cabecera municipal y de los corregimientos aledaños y, por consiguiente, no se tenía implementado un plan de evacuación y de respuesta ante una alerta en caso de un evento de tsunami.

Diferentes autores han adelantado estudios sobre la evaluación de impactos de tsunamis en el litoral pacífico colombiano, dentro de los que cabe mencionar los siguientes: Quiceno y Ortiz [6], evaluaron el impacto de tsunami para la región de Tumaco; Caballero y Ortiz [7], evaluaron el impacto de tsunamis para la región de Buenaventura; Cardona [8], analizó el arribo de ondas de tsunami a las poblaciones de la Bahía de Tumaco a través de señales sintéticas; Cardona, et Al., [9], estimaron 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; Restrepo y Otero [10], efectuaron la modelación numérica de eventos tsunamigénicos en la Cuenca Pacífica colombiana - Bahía de Buenaventura; Bastidas [11], realizó una estimación de riesgos por tsunami de origen cercano en la Bahía de Buenaventura. No obstante, los estudios realizados hasta el momento no han evaluado el impacto de un tsunami en la zona norte del Pacífico colombiano, especialmente en el área del Golfo de Cúpica, donde se encuentran los mayores asentamientos poblacionales para esta zona del litoral Pacífico.

Por lo anterior, el presente artículo tiene por objetivo primordial evaluar el grado de amenaza al que se encuentra expuesto el Golfo de Cúpica debido a tsunamis de origen cercano, con el propósito de generar información que sirva de soporte técnico para la elaboración de planes de emergencia, contingencia y evacuación. Para cumplir este objetivo se llevó a cabo la siguiente metodología: (1) identificación de las potenciales fuentes de tsunami; (2) selección de los peores escenarios sísmicos creíbles; (3) definición de las condiciones de nivel del mar; (4) generación y propagación de eventos utilizando el modelo numérico C3 (Cantabria, COMCOT y Tsunami CLAW) y (5) representación del proceso de inundación.

SISMOTECTÓNICA Y SISMICIDAD HISTÓRICA

El Golfo de Cúpica se encuentra al norte de la Costa Pacífica Colombiana y está limitado por la Punta de Solano y Cabo Marzo (figura 1). En él se encuentran poblaciones costeras importantes como son: Ciudad Mutis, El Valle, Cúpica, Mecana, Nabugá, Huaca y Huina las cuales pertenecen a los municipios de Bahía Solano y Cúpica, que a su vez hacen parte del Departamento de Chocó. La población aproximada para esta zona es de 9.094 habitantes [12].

lent to $M_w > 8.6$, had an estimated rupture length of 500 km, was partially reactivated in three subsequent events from south to north [13]; May 14th 1942 ($M_w > 7$), the event dated January 19th, 1958 ($M_w = 7.7$) and December 12th, 1979 ($M_w = 8.2$) [14, 15]. The region of highest seismicity coincides with the northern flank of the Carnegie Ridge.

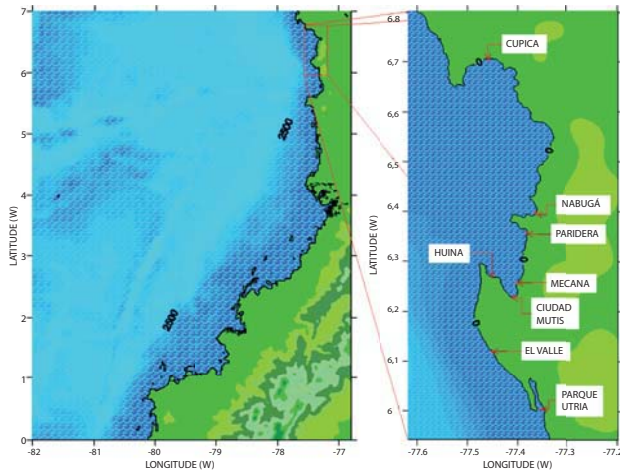


Figure 1. Study area. The figure on the left highlights the location of the Gulf of Cupica in the Colombian Pacific Coast; the figure on the right displays the main towns in the study area.

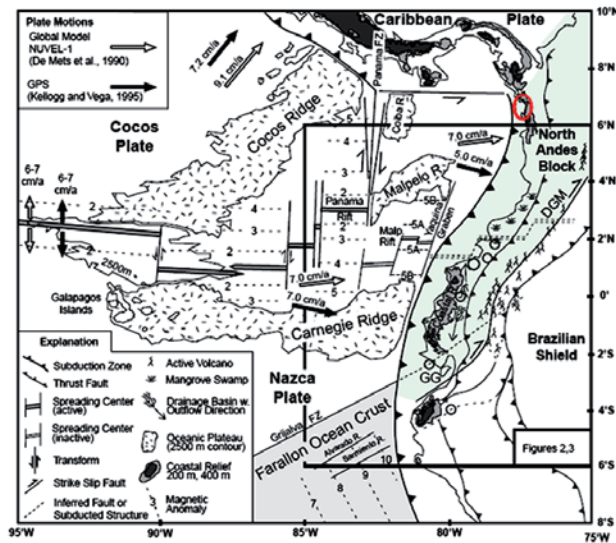


Figure 2. Tectonic environment of the area, relative movement of the plates and subduction zone. The red circle indicates the study area [13].

Collot et al. [16], state that in the northern region of Ecuador, SW of Colombia, the subduction of the Nazca

plate beneath the South American plate has produced one of the best examples of the variable behavior of an earthquake rupture. They conclude, therefore, that there is a correlation between the limits of the coseismic rupture zones of the events of 1906, 1942, 1958 and 1979, and the geological structure of the area (figure 3).

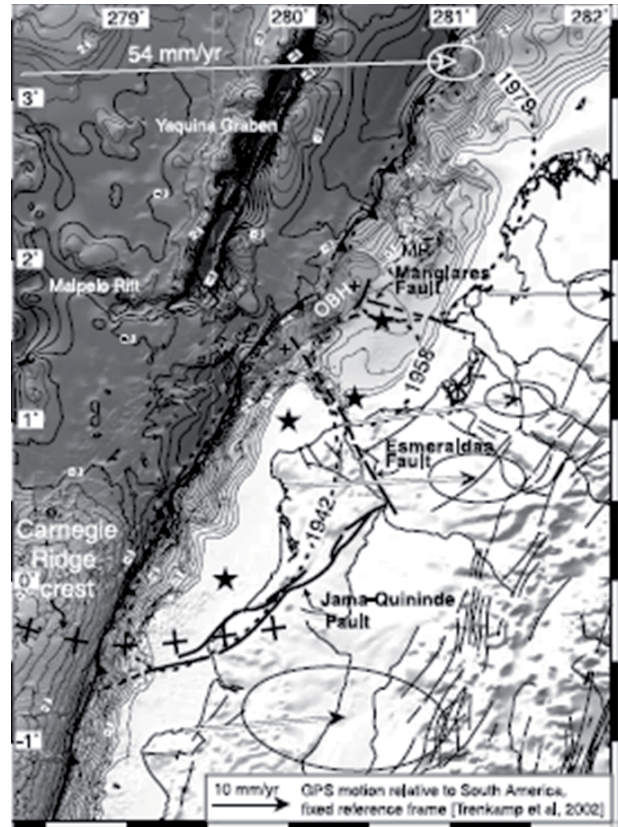


Figure 3. Structural relations between cross faults and the earthquake rupture zone [16].

In the north of the Colombian Pacific region, the structural strength of the coastal morphology of the Serrania del Baudo is displayed very well in the Bahía Solano - Bahía Utría zone (figure 4), where the 8 km of the Bahía de Utría depression match closely with the Bahía Solano fault. The Bahía Solano fault is a reverse fault with a slip rate equivalent to 0.2 to 1 mm/year [17]. Seismic activity in the fault zone of Bahía Solano and the associated segments is well renowned. There have been several major seismic events throughout this area, with relevant magnitude, the most remarkable one being the earthquake of 1970 ($M_s = 7.0$), which destroyed in 80% the municipality of Ciudad Mutis [18].

Esta región hace parte del margen del Norte de los Andes (figura 2), la cual es una región de intensa deformación de la corteza submarina, especialmente, en el área donde la Dorsal de Carnegie se subduce por debajo del Ecuador. Esta sección de la zona de subducción ha producido seis grandes terremotos en el siglo pasado. El más grande en 1906, con una magnitud $M_w > 8.6$ y una longitud de ruptura estimada de 500 Km, parcialmente reactivada en tres eventos subsecuentes de sur a norte [13], el del 14 de mayo de 1942 ($M_w > 7$), el del 19 de enero de 1958 ($M_w = 7.7$) y el del 12 de diciembre de 1979 ($M_w = 8.2$) [14, 15]. La región de más alta sismicidad coincide con el flanco norte de la Dorsal de Carnegie.

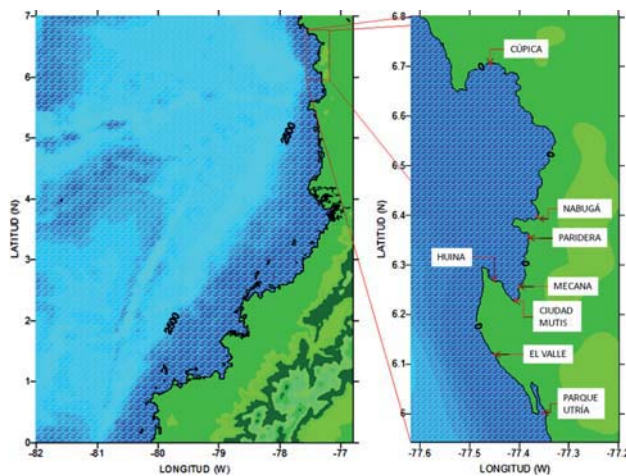


Figura 1. Área de estudio. En la figura de la izquierda se resalta la ubicación del Golfo de Cúpica en la Costa Pacífica Colombiana y a la derecha los principales centros poblacionales de la zona de estudio.

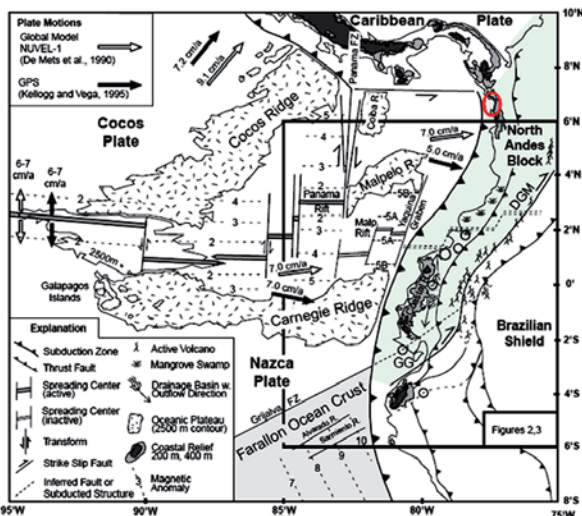


Figura 2. Entorno tectónico del área, movimiento relativo de las placas y zona de subducción. El círculo rojo indica el área de estudio [13].

Collot *et Al.*, [16], exponen que en la región del norte del Ecuador-SW de Colombia, la subducción de la placa Nazca debajo de la placa Sur América ha producido uno de los mejores ejemplos del comportamiento variable de ruptura de un terremoto, por lo que concluye que existe una correlación entre los límites de las zonas de ruptura cosísmicas de los eventos de 1906, 1942, 1958 y 1979, y la estructura geológica de la zona (figura 3).

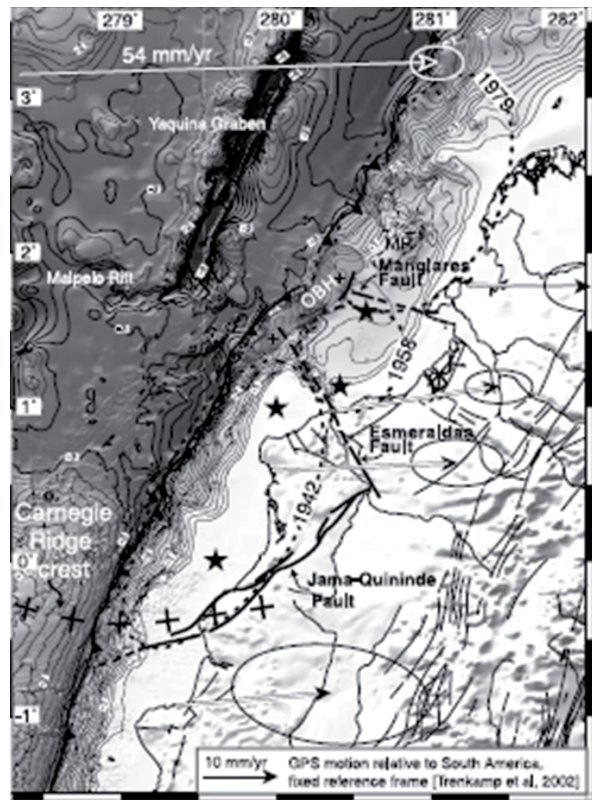


Figura 3. Relaciones estructurales entre fallas transversales y la zona de ruptura de terremotos [16].

En la región norte del Pacífico colombiano, la fortaleza estructural de la morfología costera de la Serranía del Baudó es exhibida muy bien en la zona Bahía Solano-Bahía Utría (figura 4), donde los 8 km de la depresión de la Bahía de Utría coinciden muy de cerca con la falla de Bahía Solano. La falla de Bahía Solano es una falla inversa con una velocidad de echado (*slip*) de 0.2 a 1 mm/año [17]. La actividad sísmica en la zona de la falla de Bahía Solano y de los segmentos asociados es reconocida. A lo largo de esta zona se registraron varios eventos sísmicos de magnitud importante entre los que se destaca el sismo de 1970 ($M_s = 7.0$) que destruyó en un 80% el municipio de Ciudad Mutis [18].

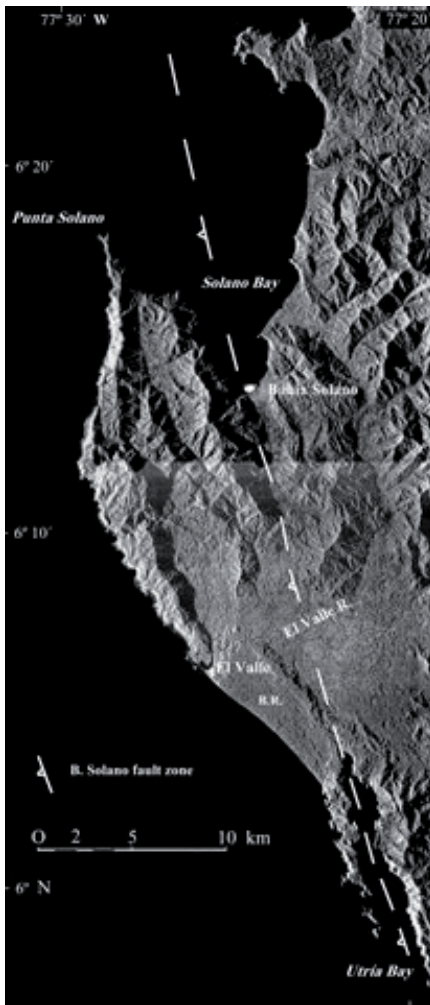


Figure 4. Radar Image of Bahía Solano and Bahía Utría, showing strong structural control on the morphology of the coast and the design of the reverse fault from Bahía Solano across the bay. Source: Reprinted by Agustin Codazzi Geographical Institute (IGAC) and INTERA Information Technologies (STAR-1 radar).

DEFINITION OF SEISMIC SCENARIOS

The definition of seismic scenarios is based on the selection of the worst credible tsunami scenario for the region of study; i.e. assigning a maximum seismic event that generates a “maximum credible tsunami” in order to generate results. The following aspects were taken into account for the identification task: collection of information on historical tsunami events in the area of interest, analysis of historical seismicity in the region of the ocean in the area of study, analysis of focal Mecana and depths of seismic events, zoning of areas of interest and location of potential sources.

Studies conducted on recorded tsunamigenic events, as well as the analysis of historical events, have established that the generation of a tsunami event depends on the parameters of the generating source, such as the type of tectonic fault, depth of the focus, earthquake magnitude, depth of water in the area of generation, and speed at which the earthquake is generated. These parameters determine the type of underwater plate movement, and therefore the type of waves generated on the surface of water [11].

In order to define these seismic scenarios, seismic records were obtained from global databases such as the Harvard Centroid – Moment - Tensor CMT, NEIC and SISRA, using the following criteria:

- Latitude 1° to 7° N.
- Longitude 77° to 82° W.
- Depth of earthquakes from 0 to 50 km.
- Moment magnitude (Mw) 5 to 10.
- Events from 1471 to December 31, 2008.

Figure 5 shows the location of the events obtained from the Harvard CMT and SISRA catalogs. There are three areas where most of the seismic activity of the Colombian Pacific (red circles) is concentrated. Zone I corresponds to the subduction zone between Colombia and Ecuador, the area corresponding to segment II: Cabo Corrientes - Arusí and the area corresponding to segment III: Arusí - Cabo Marzo.

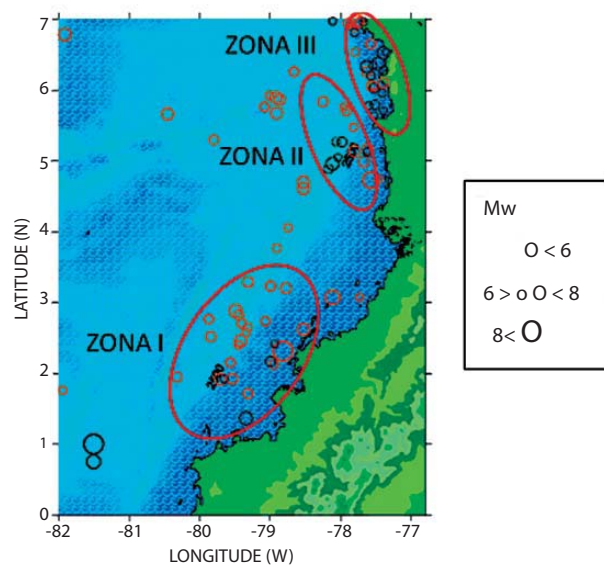


Figure 5. Graph with the events obtained from Harvard CMT (orange) and SISRA (gray). The red circles indicate areas with highest concentration of seismic activity.

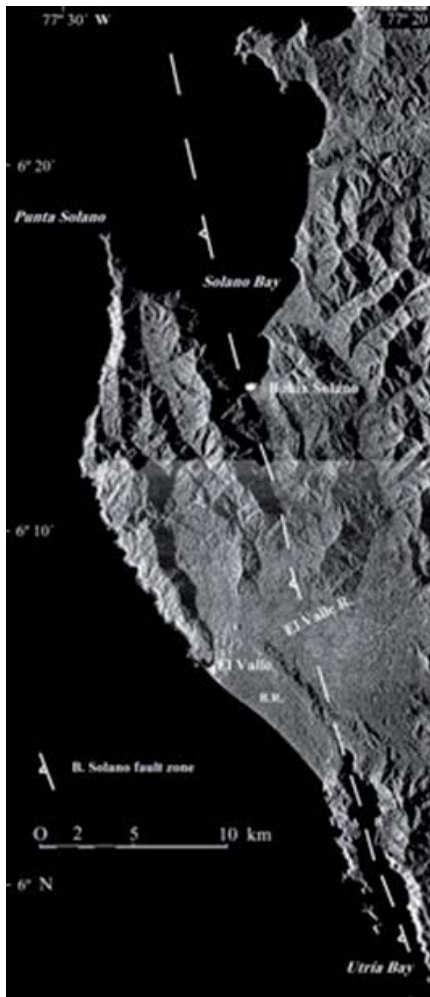


Figura 4. Imagen de radar de Bahía Solano y Bahía Utría, mostrando el fuerte control estructural en la morfología de la costa y el trazo de la falla inversa de Bahía Solano que atraviesa la bahía. Fuente: Reproducido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) e INTERA Information Technologies (STAR-1 radar).

DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS SÍSMICOS

La definición de los escenarios sísmicos se basa en la selección del peor escenario creíble de tsunamis para la región de estudio, es decir, asignar un máximo evento sísmico que genere un “máximo tsunami creíble” para la generación de resultados. Para la identificación se tuvo en cuenta lo siguiente: recopilación de la información sobre eventos históricos de tsunamis en la zona de interés, análisis de la sismicidad histórica de la región del océano de la zona de estudio, análisis de los mecanismos focales y profundidades de los eventos sísmicos, zonificación del área de interés y la localización de las potenciales fuentes.

Los estudios realizados sobre los eventos tsunamigénicos registrados, al igual que el análisis de los eventos históricos, han permitido establecer que la generación de un evento de tsunami depende de los parámetros de la fuente generadora, como el tipo de falla tectónica, profundidad del foco, magnitud del sismo, profundidad del agua en la zona de generación y velocidad a la cual se genera el sismo. Estos parámetros determinan el tipo de movimiento de la placa submarina y por lo tanto, el tipo de ondas generadas en la superficie del agua [11].

Para definir estos escenarios sísmicos se obtuvieron los registros sísmicos de base de datos globales como el *Harvard Centroid-Moment-Tensor CMT*, *NEIC* y *SISRA* utilizando los siguientes criterios:

- Latitud 1° a 7° N.
- Longitud 77° a 82° W.
- Profundidad de los sismos de 0 a 50 km.
- Magnitud de Momento (M_w) de 5 a 10.
- Eventos de 1471 a 31 diciembre de 2008.

En la figura 5 se presenta la ubicación de los eventos obtenidos de los catálogos *Harvard CMT* y *SISRA*. Se pueden distinguir tres zonas donde se concentra la mayoría de la actividad sísmica del Pacífico Colombiano (círculos rojos). La zona I que corresponde a la zona de subducción colombo-ecuatoriana; la zona II que corresponde al segmento Cabo Corrientes - Arusí y, la zona III que corresponde al segmento Arusí - Cabo Marzo.

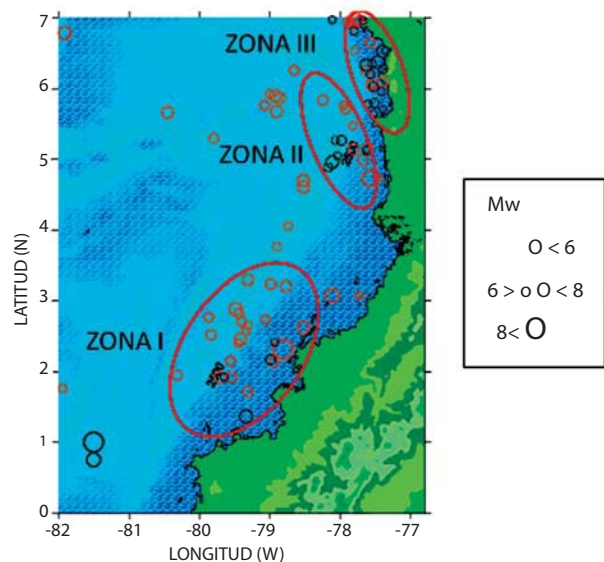


Figura 5. Gráfica de los eventos obtenidos de Harvard CMT (naranja) y SISRA (gris). Los círculos rojos indican las zonas de más alta concentración de actividad sísmica.

Table 1 shows the seismic events of the Harvard CMT catalog areas.

Table 1. Seismic events of the Harvard CMT catalogue.

AREA	DATE	LONG	LAT	DEPTH	FAULT PLANE 1			FAILURE PLAN 2			MW	MB
					STR1	DIP1	SLIP1	STR2	DIP2	SLIP2		
I	1979/12/12	-78,81	2,32	19,7	30	16	118	181	76	83	8,1	6,4
	1979/12/13	-79,49	2,88	15,0	45	19	107	207	72	84	6,3	5,0
	1979/12/31	-79,71	1,93	15,0	31	21	129	170	74	76	6,0	5,3
	1980/01/07	-79,06	2,74	15,0	30	1	114	185	77	84	5,3	5,0
	1980/01/26	-79,84	2,52	15,0	12	22	76	207	69	95	5,6	5,0
	1980/05/11	-80,32	1,95	15,0	330	56	172	65	83	34	5,5	5,1
	1980/09/03	-78,53	2,63	37,4	1	20	85	186	70	92	6,1	5,7
	1981/01/03	-78,95	2,13	18,0	253	24	39	20	75	109	5,4	5,7
	1981/01/07	-79,31	1,72	15,0	32	33	114	240	60	75	5,5	5,6
	1981/07/07	-79,87	2,77	15,0	16	43	-78	180	48	-101	5,3	5,1
	1982/08/01	-79,40	2,71	15,0	41	22	138	171	76	73	5,3	5,1
	1984/07/30	-79,35	2,58	44,5	35	33	121	179	62	71	5,1	4,9
	1985/06/10	-78,99	3,24	26,0	32	19	125	176	74	79	5,5	5,6
	1987/01/25	-79,31	3,3	15,4	19	32	-109	221	60	-79	5,7	5,6
	1989/02/12	-79,44	2,41	33,0	340	46	-116	195	50	-66	5,1	5,0
	1989/09/09	-79,53	1,92	15,0	1	29	-123	218	66	-73	5,7	6,0
	1994/06/03	-78,78	3,21	15,0	10	42	-123	231	56	-63	5,8	5,9
	1994/11/26	-79,32	2,65	15,0	357	37	-114	206	57	-73	5,2	5,1
	1995/11/13	-79,44	2,83	15,0	208	45	-90	28	45	-90	5,3	5,3
1996/04/27	-79,42	2,47	15,0	44	15	110	203	76	85	6,1	4,8	
1997/10/05	-79,56	2,15	15,0	345	25	140	218	74	-71	5,3	5,1	
II	1978/02/16	-78,24	5,84	15,0	249	36	-77	53	55	-100	5,6	5,5
	1988/09/20	-77,68	4,99	24,1	14	18	104	179	73	85	5,8	5,5
	1990/08/25	-77,93	5,71	35,1	350	36	79	183	54	98	5,3	5,1
	1991/12/10	-77,48	4,74	20,7	45	22	127	186	72	76	5,2	5,2
	1997/09/09	-77,82	5,47	24,1	338	28	40	211	73	112	5,1	5,1
	2002/08/08	-77,62	5,17	22,3	12	45	-140	251	63	-52	5,7	5,4
	2003/11/05	-77,81	5,14	27,6	15	38	-137	248	65	-60	5,9	5,7
	2004/11/15	-77,57	4,72	16,0	21	11	114	177	79	85	7,2	6,6
2008/02/10	-77,95	5,76	23,7	100	72	-12	194	79	-161	5,0	4,9	
III	1977/08/08	-77,78	6,93	15,0	287	19	25	173	82	108	5,4	5,2
	1983/01/23	-77,57	6,66	15,0	358	39	-20	104	78	-127	5,5	5,3
	1988/11/26	-77,89	6,95	21,4	316	29	-56	98	67	-107	5,4	5,5
	1990/08/25	-77,63	6,26	16,8	40	20	134	174	76	76	5,6	5,5
	1996/05/23	-77,56	6,06	15,9	349	8	82	176	82	91	5,7	5,5
	2000/07/12	-77,80	6,54	15,0	319	34	-144	167	59	-75	5,2	5,2
	2003/01/08	-77,40	6,10	25,1	299	76	172	31	82	14	5,7	5,5
	2006/01/23	-77,77	6,97	15,0	316	14	53	174	79	98	6,2	6,1
	2006/01/24	-77,73	6,96	23,7	307	29	50	170	68	110	5,4	5,3
	2006/01/29	-77,82	6,88	27,0	313	23	58	167	71	103	5,2	5,3
2007/09/22	-77,53	6,06	20,3	8	20	90	188	70	90	5,0	5,0	

The sources from which events with destructive potential could be generated for the area were identified in this step. Two tsunami - generating historical sources (events of 1906 and 1979, located in zone I) were selected for the modeling, and two new tsunamigenic

sources in areas different from the southern Colombian - north Ecuadorian subduction zone are hereby proposed, which correspond to potential events which would be generated in the above mentioned areas II and III (table 2):

En la tabla 1 se presentan los eventos sísmicos del catálogo Harvard CMT por zonas.

Tabla 1. Eventos sísmicos por zonas del catálogo Harvard CMT.

ZONA	FECHA	LON	LAT	PROF	PLANO DE FALLA 1			PLANO DE FALLA 2			MW	MB
					STR1	DIP1	SLIP1	STR2	DIP2	SLIP2		
I	1979/12/12	-78,81	2,32	19,7	30	16	118	181	76	83	8,1	6,4
	1979/12/13	-79,49	2,88	15,0	45	19	107	207	72	84	6,3	5,0
	1979/12/31	-79,71	1,93	15,0	31	21	129	170	74	76	6,0	5,3
	1980/01/07	-79,06	2,74	15,0	30	1	114	185	77	84	5,3	5,0
	1980/01/26	-79,84	2,52	15,0	12	22	76	207	69	95	5,6	5,0
	1980/05/11	-80,32	1,95	15,0	330	56	172	65	83	34	5,5	5,1
	1980/09/03	-78,53	2,63	37,4	1	20	85	186	70	92	6,1	5,7
	1981/01/03	-78,95	2,13	18,0	253	24	39	20	75	109	5,4	5,7
	1981/01/07	-79,31	1,72	15,0	32	33	114	240	60	75	5,5	5,6
	1981/07/07	-79,87	2,77	15,0	16	43	-78	180	48	-101	5,3	5,1
	1982/08/01	-79,40	2,71	15,0	41	22	138	171	76	73	5,3	5,1
	1984/07/30	-79,35	2,58	44,5	35	33	121	179	62	71	5,1	4,9
	1985/06/10	-78,99	3,24	26,0	32	19	125	176	74	79	5,5	5,6
	1987/01/25	-79,31	3,30	15,4	19	32	-109	221	60	-79	5,7	5,6
	1989/02/12	-79,44	2,41	33,0	340	46	-116	195	50	-66	5,1	5,0
	1989/09/09	-79,53	1,92	15,0	1	29	-123	218	66	-73	5,7	6,0
	1994/06/03	-78,78	3,21	15,0	10	42	-123	231	56	-63	5,8	5,9
	1994/11/26	-79,32	2,65	15,0	357	37	-114	206	57	-73	5,2	5,1
	1995/11/13	-79,44	2,83	15,0	208	45	-90	28	45	-90	5,3	5,3
1996/04/27	-79,42	2,47	15,0	44	15	110	203	76	85	6,1	4,8	
1997/10/05	-79,56	2,15	15,0	345	25	140	218	74	-71	5,3	5,1	
II	1978/02/16	-78,24	5,84	15,0	249	36	-77	53	55	-100	5,6	5,5
	1988/09/20	-77,68	4,99	24,1	14	18	104	179	73	85	5,8	5,5
	1990/08/25	-77,93	5,71	35,1	350	36	79	183	54	98	5,3	5,1
	1991/12/10	-77,48	4,74	20,7	45	22	127	186	72	76	5,2	5,2
	1997/09/09	-77,82	5,47	24,1	338	28	40	211	73	112	5,1	5,1
	2002/08/08	-77,62	5,17	22,3	12	45	-140	251	63	-52	5,7	5,4
	2003/11/05	-77,81	5,14	27,6	15	38	-137	248	65	-60	5,9	5,7
	2004/11/15	-77,57	4,72	16,0	21	11	114	177	79	85	7,2	6,6
	2008/02/10	-77,95	5,76	23,7	100	72	-12	194	79	-161	5,0	4,9
III	1977/08/08	-77,78	6,93	15,0	287	19	25	173	82	108	5,4	5,2
	1983/01/23	-77,57	6,66	15,0	358	39	-20	104	78	-127	5,5	5,3
	1988/11/26	-77,89	6,95	21,4	316	29	-56	98	67	-107	5,4	5,5
	1990/08/25	-77,63	6,26	16,8	40	20	134	174	76	76	5,6	5,5
	1996/05/23	-77,56	6,06	15,9	349	8	82	176	82	91	5,7	5,5
	2000/07/12	-77,80	6,54	15,0	319	34	-144	167	59	-75	5,2	5,2
	2003/01/08	-77,40	6,10	25,1	299	76	172	31	82	14	5,7	5,5
	2006/01/23	-77,77	6,97	15,0	316	14	53	174	79	98	6,2	6,1
	2006/01/24	-77,73	6,96	23,7	307	29	50	170	68	110	5,4	5,3
	2006/01/29	-77,82	6,88	27,0	313	23	58	167	71	103	5,2	5,3
2007/09/22	-77,53	6,06	20,3	8	20	90	188	70	90	5,0	5,0	

En este paso se identificaron aquellas fuentes desde las cuales se generarían eventos con potencial destructivo para la zona. Se seleccionaron para la modelación dos fuentes históricas generadoras de tsunami (eventos de 1906 y 1979, ubicadas en la zona I) y se proponen

dos nuevas fuentes tsunamigénicas en áreas diferentes a la zona de subducción sur colombiana – norte ecuatoriana, correspondientes a potenciales eventos que se generarían en las zonas II y III antes mencionadas (tabla 2):

Table 2. Worst seismic credible scenarios of tsunami generation.

Event	Earthquake location		Magnitude M _w	Depth (km)	Break area (L x W) km ²	Slip (°)	Strike (°)	Dip (°)	D (m)
	Lat	Lon							
1906	2.05°N – 79.16°W		8.80	25	514 x 214	63	31	13	13.80
1979	2.56° N – 78.85° W		8.20	18	240 x 100	63	31	13	5,91
Cabo Corrientes - Arusí	5.14N – 77.9 W		7.92	16	140 x 70	40	329	11	4,00
Arusí – Cabo Marzo	6.12 N – 77.65 W		7.96	15	147 x 73	53	349	14	4,20

The Wells and Coppersmith ratios [19] were used in order to calculate the rupture dimensions of the tsunami – generating fault (L x W):

$$M_w = (0,98 \pm 0,03) \log A_r + (4,07 \pm 0,06)$$

$$M_w = (0,82 \pm 0,10) \log D + (6,693 \pm 0,05)$$

$$\log D = (0,69 \pm 0,08) M_w - (4,80 \pm 0,57)$$

where, M_w is moment magnitude

A_r is the rupture area (km²)

D is the displacement of the fault (m)

DEFINITION OF THE SEA LEVEL CONDITION

In order to establish the possible scenarios of sea level, the time series of the mareograph located in Bahia Solano was analyzed. The series available has information from March 2nd, 1964 until September 30th, 1965, and in total there are 13,872 time records.

Figure 6 shows the sea level probability density function and probability distribution function. Based on the above functions, and in order to obtain a more realistic assessment of the impact of a tsunami in the Gulf of Cupica area, four scenarios of sea level were selected: 0 m tide level; the likeliest low tide (0.65 m); the likeliest high tide (2.6 m) and the highest tide recorded (3.5 m).

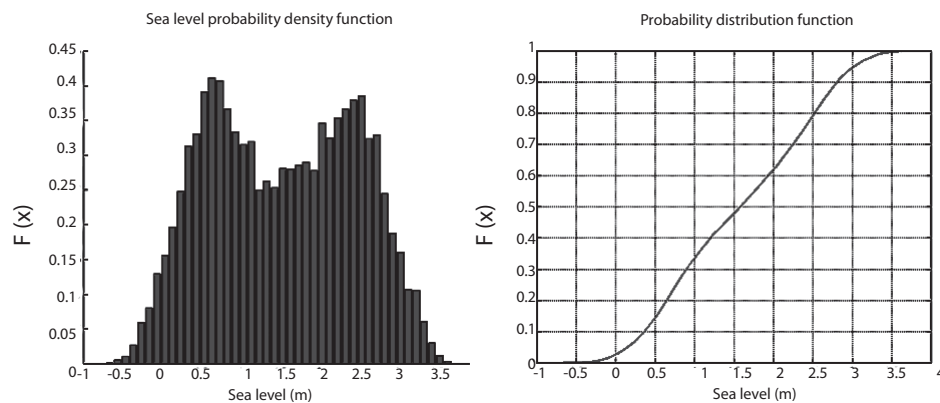
**Figure 6.** Left: Sea level probability density function. Right: the sea level probability distribution function.

Tabla 2. Peores escenarios sísmicos creíbles de generación de tsunamis.

Evento	Ubicación sismo Lat - Lon	Magnitud Mw	Prof (km)	Área Ruptura (L x W) km ²	Slip (°)	Strike (°)	Dip (°)	D (m)
1906	2.05°N – 79.16°W	8.80	25	514 x 214	63	31	13	13,80
1979	2.56° N – 78.85° W	8.20	18	240 x 100	63	31	13	5,91
Cabo Corrientes - Arusí	5.14N – 77.9 W	7.92	16	140 x 70	40	329	11	4,00
Arusí – Cabo Marzo	6.12 N – 77.65 W	7.96	15	147 x 73	53	349	14	4,20

Para el cálculo de las dimensiones de ruptura de la falla generadora de tsunami (L x W) se emplearon las relaciones de Wells y Coppersmith [19]:

$$M_w = (0,98 \pm 0,03)\log A_r + (4,07 \pm 0,06)$$

$$M_w = (0,82 \pm 0,10)\log D + (6,693 \pm 0,05)$$

$$\log D = (0,69 \pm 0,08) M_w - (4,80 \pm 0,57)$$

donde, M_w es la magnitud de momento

A_r es el área de ruptura en (Km²)

D es la dislocación de la falla (m)

DEFINICIÓN DE LA CONDICIÓN DEL NIVEL DEL MAR

Para establecer los escenarios posibles de nivel del mar se analizó la serie histórica del mareógrafo localizado en Bahía Solano. La serie disponible cubre desde el 02 de marzo de 1964 hasta el 30 de septiembre de 1965, y en total se cuenta con 13.872 registros horarios.

En la figura 6 se presentan la función de densidad de probabilidad y la función de distribución de probabilidad del nivel del mar. Con base en las funciones anteriores y con el fin de obtener una evaluación más realista del impacto de tsunami en el área del Golfo de Cúpica, se seleccionaron cuatro escenarios de nivel del mar: nivel de marea 0 m, la bajamar más probable (0.65 m), la pleamar más probable (2.6 m) y la máxima pleamar registrada (3.5 m).

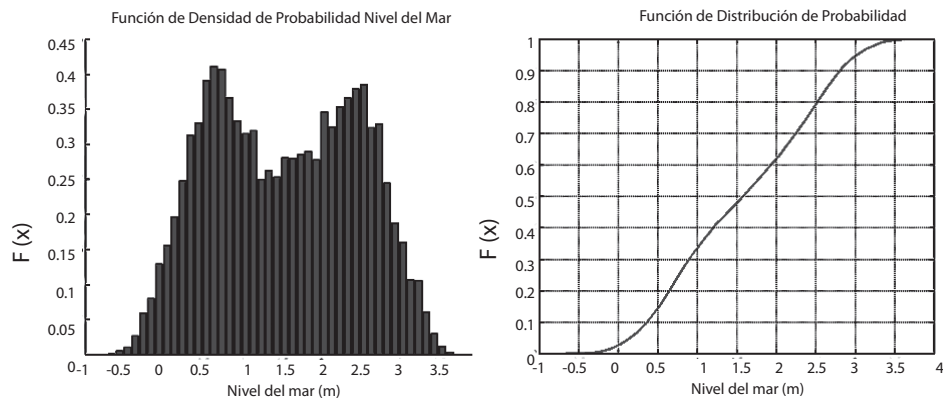


Figura 6. A la izquierda la función de densidad de probabilidad del nivel del mar. A la derecha la función de distribución de probabilidad del nivel del mar.

MESH DEFINITION

The discretization of the bathymetry of the study area comes from the following sources: global bathymetry of the Pacific Ocean, which was obtained from the ETOPO 5 project (Sanwell and Smith, 1997), the nautical charts developed by the Center for Oceanographic Research and Management (CIOH – from its original Spanish language initials - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas) and bathymetric surveys conducted by the Pollution Control Center of the Pacific (CCCCP).

The use of a multi – mesh embedded system at different levels allows proper recording of the evolution of tsunami waves in the different regions where it spreads. The global mesh, which covers the Colombian Pacific Ocean, is defined with a length equivalent to 885.6 x 864 km², discretized spatially with $\Delta x = \Delta y = 864$ m.

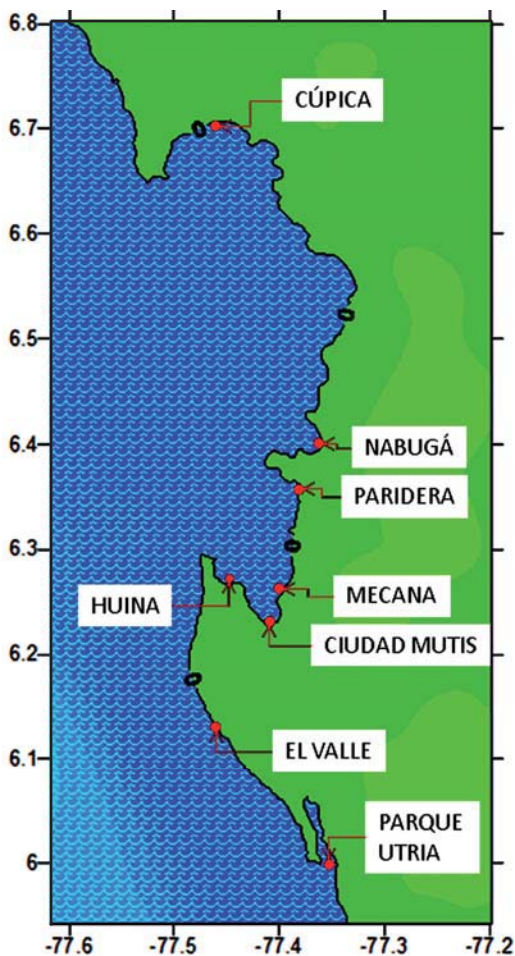


Figure 7. Map with the points at which wave height will be assessed.

The intermediate mesh which covers the Gulf of Cúpica, with dimensions equivalent to 45.36 x 92.88 km², cell size $\Delta x = \Delta y = 432$ m (105 x 215 items) permits analysis from as deep as 2500 m to the coast. The detail mesh comprises Bahía de Solano, with dimensions equivalent to 17,658 x 25,434 km², and cell size equivalent to $\Delta x = \Delta y = 54$ m (327 x 471 items).

Table 3. Work Mesh characteristics (h_{max} , Δx , Δt).

Mesh	h_{max}	Δx	Δt
Outer mesh	5214.72	864 m	0,500 s
Intermedia mesh	2613.91	432 m	0,250 s
Detail mesh	272.40	54 m	0.125 s

Note: h_{max} was calculated using zero tidal conditions.

Figure 7 and table 4 show the location of the assessment points and their.

Table 4. Geographical position where wave height will be evaluated.

Points	Latitude	Longitude
Ciudad Mutis	6.22875	- 77.41075
Huina	6.26975	-77.44875
Mecana	6.25875	-77.39875
Paridera	6.36025	- 77.38275
Nabugá	6.39625	- 77.36225
Cúpica	6.70200	- 77.466
El Valle	6.12600	- 77.462
Parque Utría	6.00200	- 77.354

NUMERICAL MODEL

For the simulation of the scenarios of established tsunamis, the C3 numerical model (Cantabria, COMCOT and TsunamiCLAW). This model, based on the COMCOT model [20] and the TSUNAMICLAW model [21], takes the major advantages of each one in order to adjust both schemes, finite volumes and finite differences. This model solves the long wave equations in shallow waters, which in their conservative form can be represented as follows:

DEFINICIÓN DE MALLAS

La discretización de la batimetría del área de estudio proviene de las siguientes fuentes: batimetría global del Océano Pacífico, que fue obtenida a partir del proyecto ETOPO 5 (Sanwell y Smith, 1997), de las cartas náuticas elaboradas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), y de levantamientos batimétricos realizados por el Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP).

La utilización de un sistema embebido multimallas en diferentes niveles permite registrar correctamente la evolución de ondas de tsunami en las diferentes regiones en donde se propaga. La malla global, que abarca el Océano Pacífico Colombiano, está definida con una longitud de 885,6 x 864 km² discretizada espacialmente con $\Delta x = \Delta y = 864$ m. La malla intermedia, que cubre el Golfo de Cúpica, con dimensiones de 45,36 x 92,88 km²

y celdas de tamaño $\Delta x = \Delta y = 432$ m (105 x 215 elementos), permite desde profundidades de 2500 m hasta la costa. La malla en detalle, que comprende la Bahía de Solano, con dimensiones de 17,658 x 25,434 km² y celdas de tamaño $\Delta x = \Delta y = 54$ m (327 x 471 elementos).

Tabla 3. Características de las mallas de trabajo (h_{max} , Δx , Δt).

Malla	h_{max}	Δx	Δt
Exterior	5214.72	864 m	0,500 s
intermedia	2613.91	432 m	0,250 s
Detalle	272.40	54 m	0.125 s

Nota. La h_{max} se calculó considerando condiciones de marea cero.

En la figura 7 y la tabla 4 se presentan la localización de los puntos de evaluación y su ubicación geográfica.

Tabla 4. Localización geográfica donde se evaluará la altura de la ola.

Puntos	Latitud	Longitud
Ciudad Mutis	6.22875	-77.41075
Huina	6.26975	-77.44875
Mecana	6.25875	-77.39875
Paridera	6.36025	-77.38275
Nabugá	6.39625	-77.36225
Cúpica	6.70200	-77.466
El Valle	6.12600	-77.462
Parque Utría	6.00200	-77.354

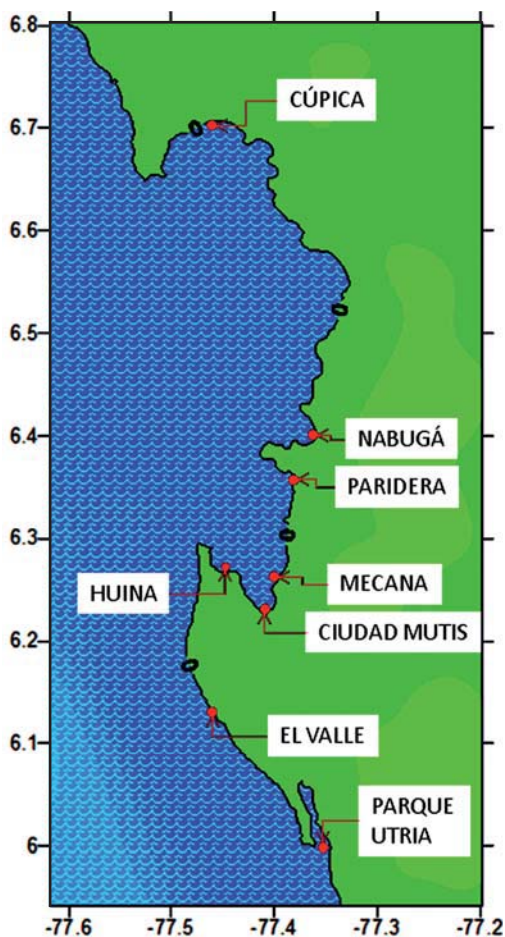


Figura 7. Mapa con los puntos donde se evaluará la altura de la ola.

MODELO NUMÉRICO

Para la simulación de los escenarios de tsunamis establecidos se empleó el modelo numérico C3 (Cantabria, COMCOT y TsunamiCLAW). Este modelo, basado en el modelo COMCOT [20] y el TSUNAMICLAW [21], toma las principales ventajas de cada uno de ellos para acoplar ambos esquemas, volúmenes finitos y diferencias finitas. Este modelo resuelve las ecuaciones de onda larga en aguas someras, que en su forma conservativa se pueden representar como:

RESULTS AND DISCUSSION

Propagation, flood and dry - out of a tsunamigenic event in the coastal zone of the study area were modeled with the C3 numerical model, using the generating sources proposed for each of the tide level scenarios selected.

1906 Tsunami (Zone I)

An event of this sort would generate a huge impact in the Gulf of Cupica. Figure 8 shows the maximum displacement of the free surface with different tide levels. Ciudad Mutis and Huina are the most highly exposed towns in the Gulf of Cupica, where the maximum displacement of the free surface would have values up to 6 m; Mecana, Paridera, Nabugá and Cupica have values between 5 m and 6 m, for a tide level equivalent to 3,5 m.

It is worth mentioning that there is relevant influence generated by Punta de Solano on the free surface displacement of the tsunamigenic event, and how coastal morphological accidents generate energy concentration of tsunami waves in areas such as Ciudad Mutis, Mecana and Huina.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Hu) + \frac{\partial}{\partial x}\left(Hu^2 + \frac{1}{2}gH^2\right) + \frac{\partial}{\partial y}(Huv) = gH \frac{\partial h}{\partial x} - \tau_x + f_c Hv$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Hv) + \frac{\partial}{\partial x}(Huv) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{2}gH^2 + Hv^2\right) = gH \frac{\partial h}{\partial y} - \tau_y - f_c Hu$$

where,

$H = (h + \zeta)$	water depth (variables dependent on the problem)
ζ	free surface elevation
h	water depth at rest
(x, y)	longitude and latitude of the earth
g	aceleration of gravity
(τ_x, τ_y)	tensions with the bottom
f_c	Coriolis parameter
(u, v)	rates averaged at depth in the directions (x, y)

The terms of tensions with the bottom represent the friction that the flow experiences against the bottom. Manning's formula is used in order to represent these terms:

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_y = \frac{gn^2}{H^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

Where n is the Manning coefficient, which for was assumed for this task as equal to 0,025.

The C3 numerical model has been tested and validated using the criteria proposed by Synolakis *et al.* [22], by means of analytical solutions and laboratory cases with broken and unbroken waves [23].

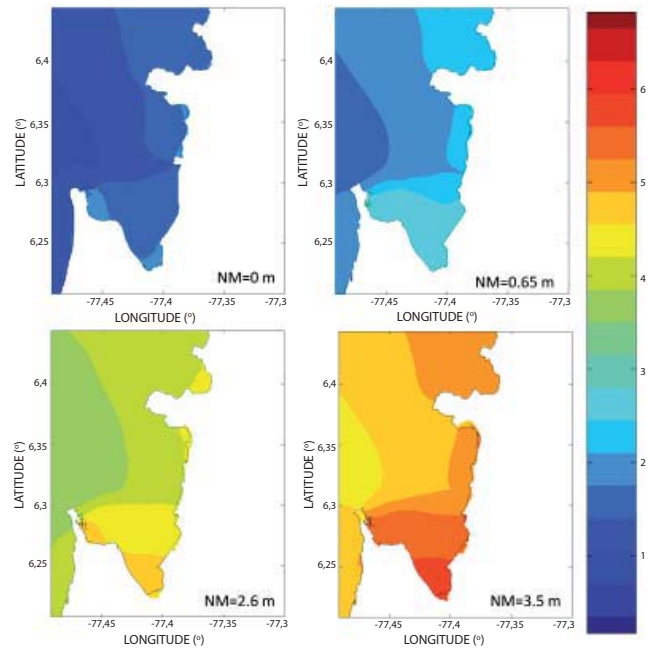


Figure 8. Maximum displacement of the free surface generated by the 1906 tsunami for the different tide levels.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Hu) + \frac{\partial}{\partial x}\left(Hu^2 + \frac{1}{2}gH^2\right) + \frac{\partial}{\partial y}(Huv) = gH \frac{\partial h}{\partial x} - \tau_x + f_c H v$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Hv) + \frac{\partial}{\partial x}(Huv) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{2}gH^2 + Hv^2\right) = gH \frac{\partial h}{\partial y} - \tau_y - f_c H u$$

donde,

$H = (h + \zeta)$	profundidad del agua (variables de pendientes del problema)
ζ	elevación de la superficie libre
h	profundidad del agua en reposo
(x, y)	longitud y latitud de la tierra
g	aceleración de la gravedad
(τ_x, τ_y)	tensiones con el fondo
f_c	parámetro de Coriolis
(u, v)	velocidades promediadas en profundidad en las direcciones (x, y)

Los términos de tensiones en el fondo representan la fricción que experimenta el flujo con el fondo. Para representar estos términos se utiliza la fórmula de Manning:

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_y = \frac{gn^2}{H^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

Donde n es el coeficiente de Manning, que para el presente trabajo se asumió igual a 0.025.

El modelo numérico C3 ha sido verificado y validado, siguiendo los criterios propuestos por Synolakis *et al.*, [22], mediante soluciones analíticas y casos de laboratorio con ondas rotas y no rotas [23].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el modelo numérico C3, se procedió a modelar la propagación, inundación y secado de un evento tsunamigénico en la zona costera del área de estudio, utilizando las fuentes generadoras propuestas para cada uno de los escenarios de nivel de marea seleccionados.

Tsunami de 1906 (Zona I)

Un evento como éste generaría un gran impacto en el Golfo de Cúpica. En la figura 8, se representa el máximo desplazamiento de la superficie libre con los diferentes niveles de marea. Ciudad Mutis y Huina son los asentamientos poblacionales más expuestos en el Golfo de Cúpica, donde el desplazamiento máximo de la superficie libre registraría valores de hasta de 6 m; Mecana, Paridera, Nabugá y Cúpica, presentan valores entre 5 m y 6 m, para el nivel de marea de 3.5 m.

Cabe resaltar la influencia que genera la Punta de Solano sobre el desplazamiento de la superficie libre del evento tsunamigénico, y cómo los accidentes morfológicos costeros generan concentración de energía de las ondas de tsunami en áreas como Ciudad Mutis, Mecana y Huina.

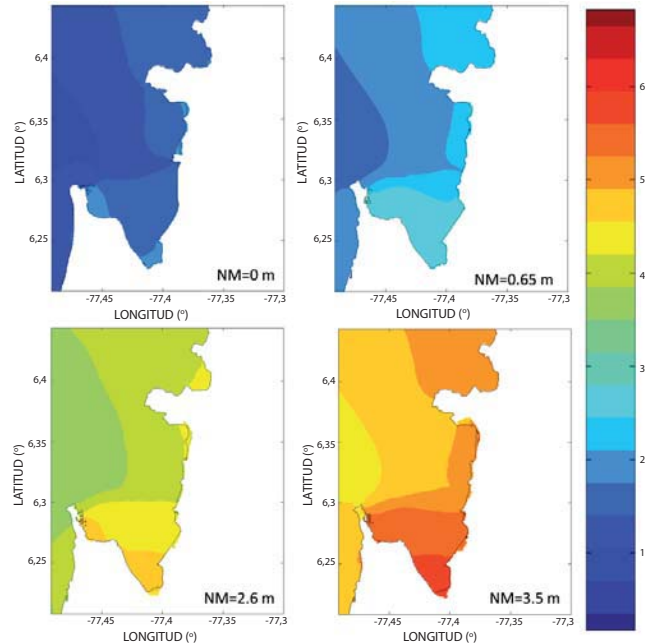


Figura 8. Máximo desplazamiento de la superficie libre generada por el tsunami de 1906 para los diferentes niveles de marea.

Figure 9 presents the time – related evolution of the free surface in different towns with different tide levels. Three wave trains can be observed: the first train occurs within 40 to 60 minutes of the earthquake, the second train occurs within 90 and 110 minutes, and the third

train occurs within 140 and 160 minutes after the event is generated. This result is particularly important when designing contingency or emergency plans, as it indicates that people would have to spend several hours in the evacuation areas.

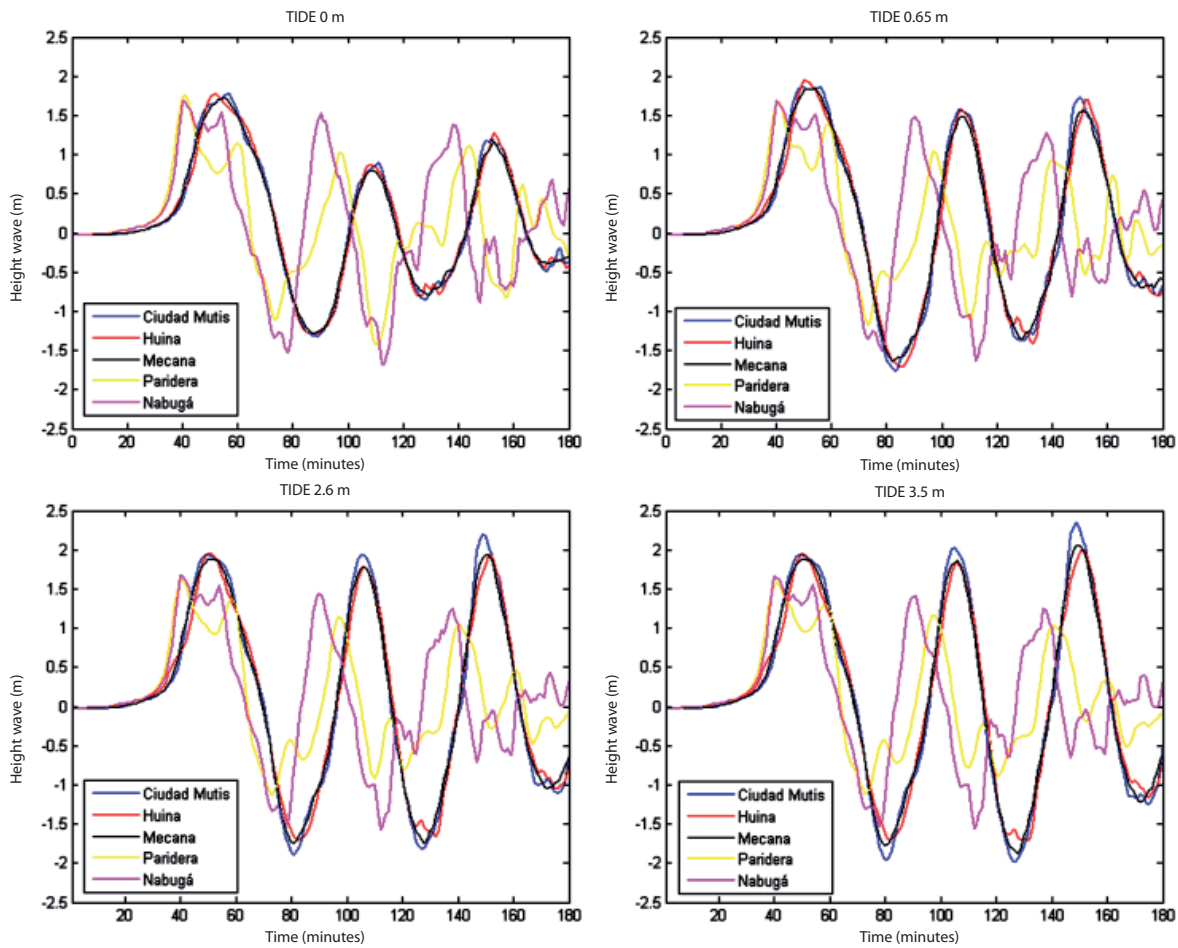


Figure 9. Related evolution of the free surface for Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Paridera and Nabugá, with the different tide levels (tsunami 1906).

For a zero - tide level, it can be observed that the first wave train has the highest elevations, whereas at 3.5 m tide level the third wave train would be highest. This phenomenon lies on the concentration of wave energy due to coastal morphology; i.e. the geography of the Gulf of Cupica causes the first tsunami – generated wave train reaching the coast to not be most destructive train. Since this wave train is affected by reflection at the boundaries of the Gulf, the bathymetry of Bahía de

Solano and the arrival of new wave trains, higher - and therefore more destructive - wave trains would subsequently be generated. It is necessary to study the resonant effect of the Gulf of Cupica more thoroughly and in detail.

Ciudad Mutis has the highest values due to its position in Bahía Solano, and remains the potentially most highly affected area in case of a tsunamigenic event with the aforementioned characteristics.

En la figura 9 se registra la evolución temporal de la superficie libre en diferentes poblaciones con los diferentes niveles de marea. Se pueden apreciar tres trenes de ola: el primero, entre los primeros 40 a 60 minutos; el segundo, entre los 90 y 110 minutos, y el tercero, entre

140 y 160 minutos, después de generado el evento. Este resultado es particularmente importante a la hora de diseñar los planes de contingencia o emergencia, pues indica que las personas deberán permanecer varias horas en las zonas de evacuación.

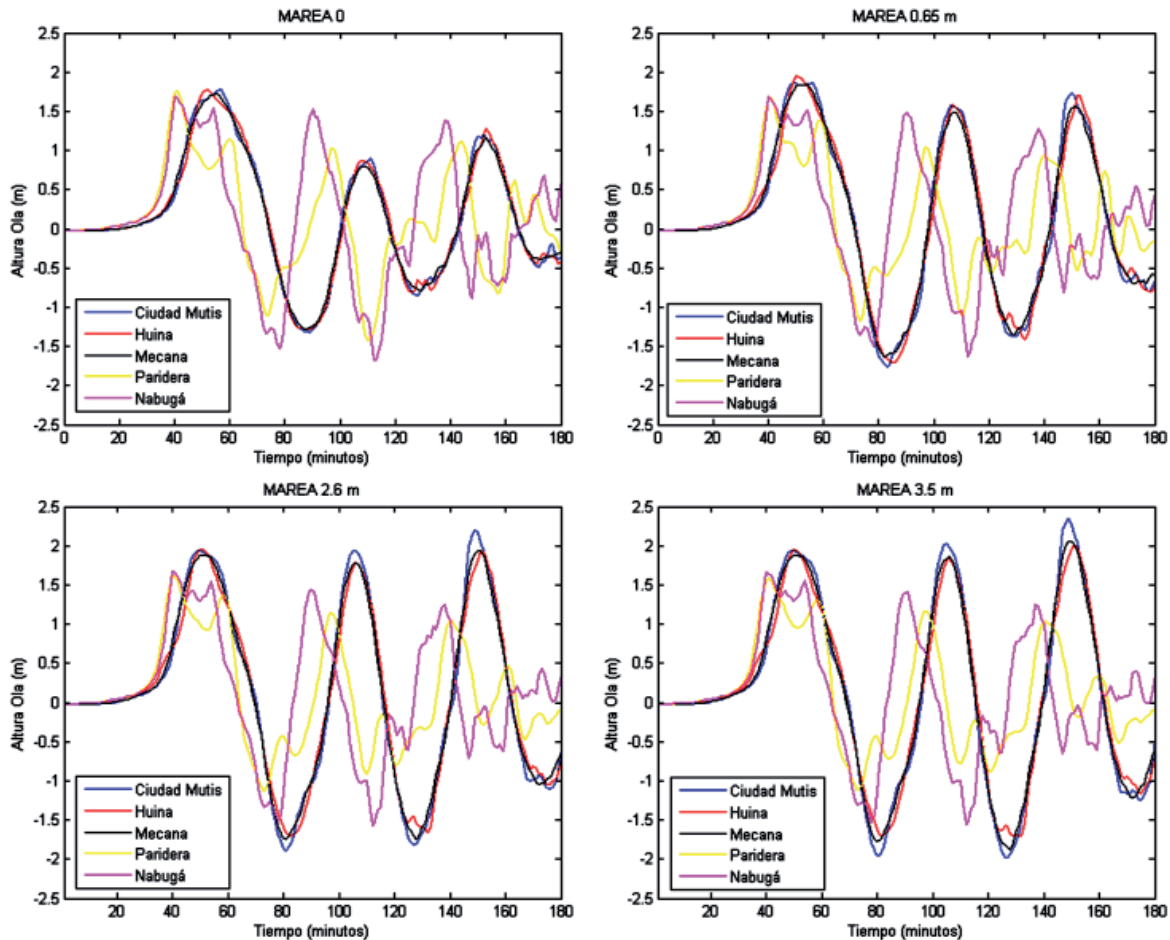


Figura 9. Evolución temporal de la superficie libre para Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Paridera y Nabugá, con los diferentes niveles de marea (tsunami 1906).

Para un nivel de marea cero, se observa que el primer tren de olas presenta las mayores alturas, mientras que con nivel de marea 3.5 m el tren de olas que presenta mayor altura es el tercero. Este fenómeno se debe a la concentración de energía de la onda debido a la morfología costera, es decir, la configuración geográfica del Golfo de Cúpica genera que la primera onda que llega a la costa producida por un evento de tsunami no sea la más destructiva, sino que al estar afectada esta onda por la reflexión en los contornos del golfo, la batimetría

de la Bahía de Solano y por el arribo de ondas nuevas, se genere ondas posteriores de mayor altura, y por lo tanto, más destructivas. El efecto resonante del Golfo de Cúpica es necesario estudiarlo con más detenimiento y detalle.

Ciudad Mutis presenta los mayores valores debido a su posición dentro de la Bahía de Solano y continúa siendo la zona más afectada en caso de un evento tsunamigénico con estas características.

1979 Tsunami (Zone I)

Figure 10 shows the maximum displacement of the free surface for different tide levels. A tsunamigenic event like this would generate an average impact from at a most probable high tide (2.6 m). At a 3,5 m tide level, the maximum values which would reach Ciudad Mutis and Huina are between 4 and 5 meters. The highest values in Mecana, Paridera and Nabugá would be 4 m.

Figure 11 shows the time evolution of the free surface at different tide levels. The maximum wave heights occur in tide level 3.5 m, with wave heights up to 1.1 m for Ciudad Mutis, Huina and Mecana. Paridera and Nabugá would have waves of 0.5 meters. It can be seen that the maximum values of the free surface would be in the second train of waves, different from the results obtained in the modeling of the 1906 tsunami.

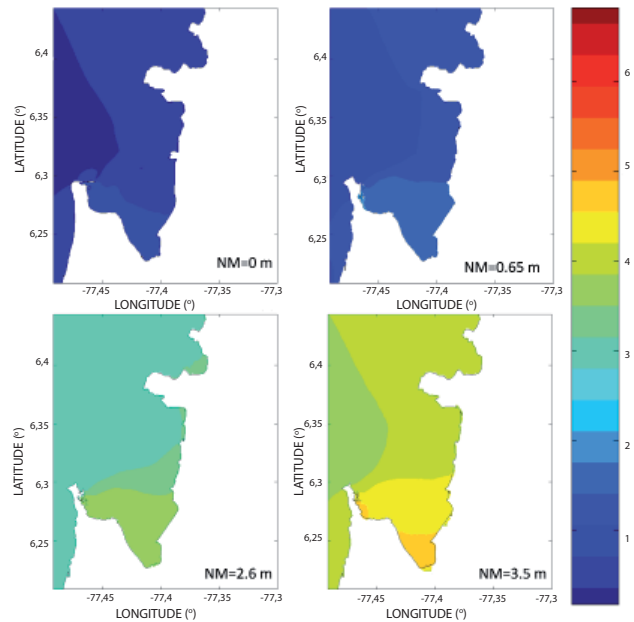


Figure 10. Maximum displacement of the free surface generated by the tsunami of 1979 for the different tide levels.

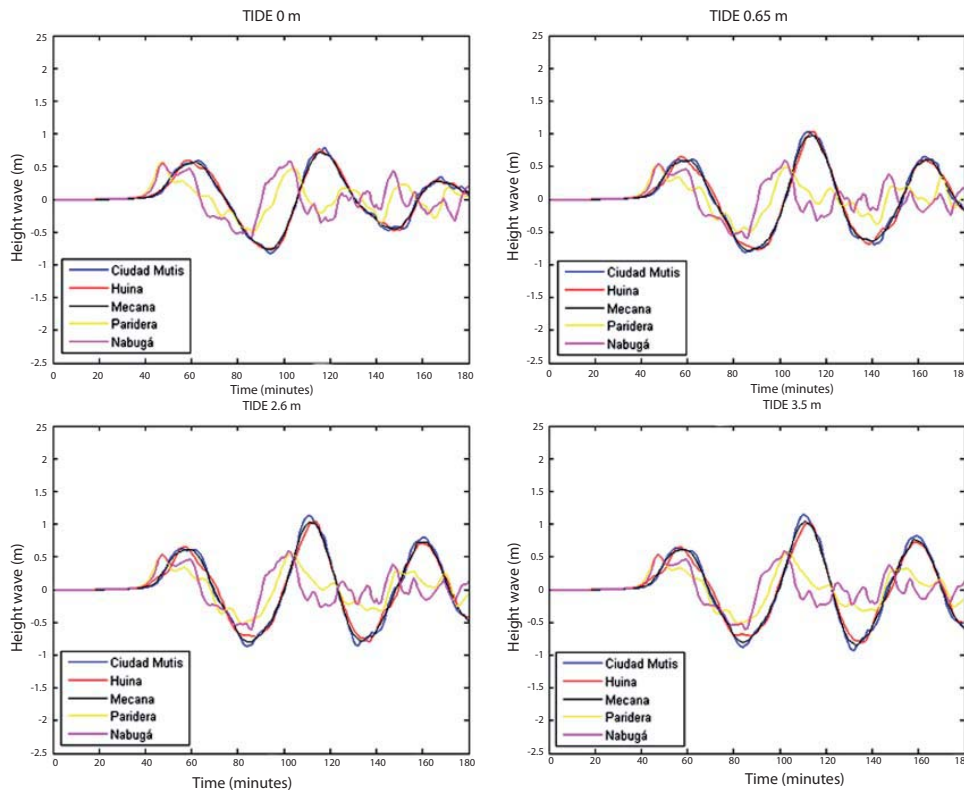


Figure 11. Related evolution of the free surface for Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Paridera and Nabugá, with the different tide levels (tsunami 1979).

Tsunami de 1979 (Zona I)

La figura 10 muestra el máximo desplazamiento de la superficie libre para los diferentes niveles de marea. Un evento tsunamigénico como éste generaría un impacto medio a partir de la pleamar más probable (2.6 m). En el nivel de marea de 3.5 m los máximos valores que alcanzan Ciudad Mutis y Huina se encuentran entre los 4 y 5 metros; Mecana, Paridera y Nabugá presentan valores máximos de 4 m.

En la figura 11 se representa la evolución temporal de la superficie libre en los diferentes niveles de marea. Las máximas alturas de ola se presentan en nivel de marea de 3.5 m: alturas de ola de hasta 1.1 m para Ciudad Mutis, Huina y Mecana; de 0.5 metros para Paridera y Nabugá. Se puede observar que los valores máximos de la superficie libre se encuentran en el segundo tren de olas, diferentes a los resultados obtenidos en la modelación del tsunami de 1906.

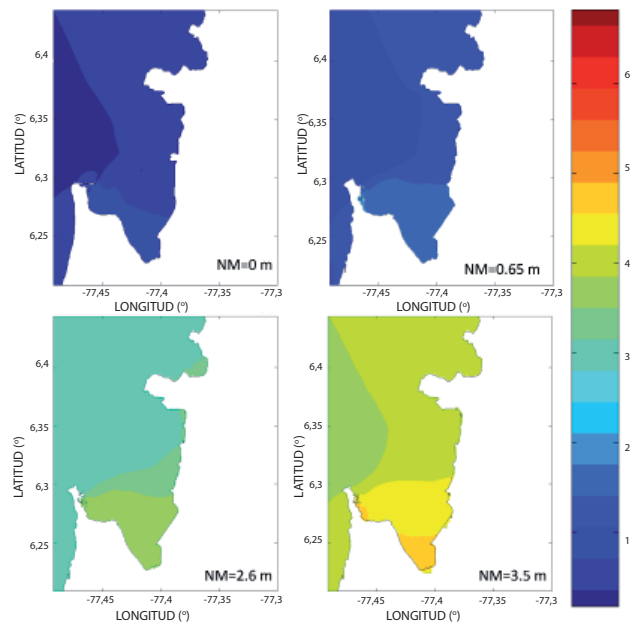


Figura 10. Máximo desplazamiento de la superficie libre generada por el tsunami de 1979 para los diferentes niveles de marea.

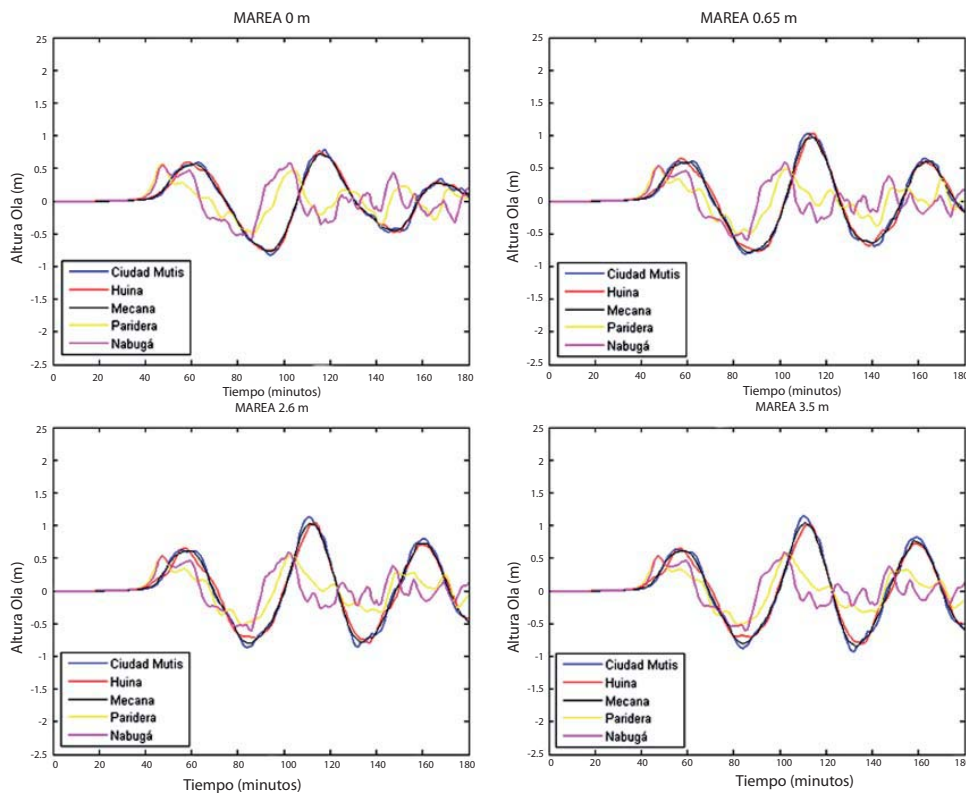


Figura 11. Evolución temporal de la superficie libre para Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Paridera y Nabugá, con los diferentes niveles de marea (tsunami 1979).

Cabo Corrientes – Arusí Source (Zone II)

An event generated by this source would have less impact in the Gulf of Cupica compared to the scenarios of 1906 and 1979. Figure 12 represents the maximum displacement of the free surface of this event at different tide levels. The maximum displacements of the free surface are presented in the highest tide recorded and are close to 4 m for Ciudad Mutis, Mecana and Paridera, and they exceed 4 m for Huina and Nabugá.

Figure 13 shows the time evolution of the free surface at the different points of evaluation. Three main wave trains can be observed for Ciudad Mutis, Huina and Mecana, as they are located in a small bay formed by Punta de Solano and Punta Huaca. The three above-mentioned wave trains would not reach 1 m in height, as in Paridera and Nabugá.

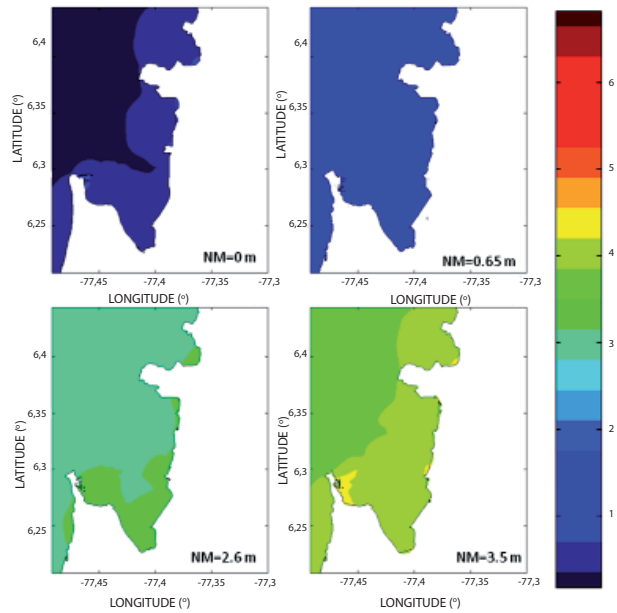


Figure 12. Maximum free surface displacement generated by the source Cabo Corrientes - Arusí for different tidal levels.

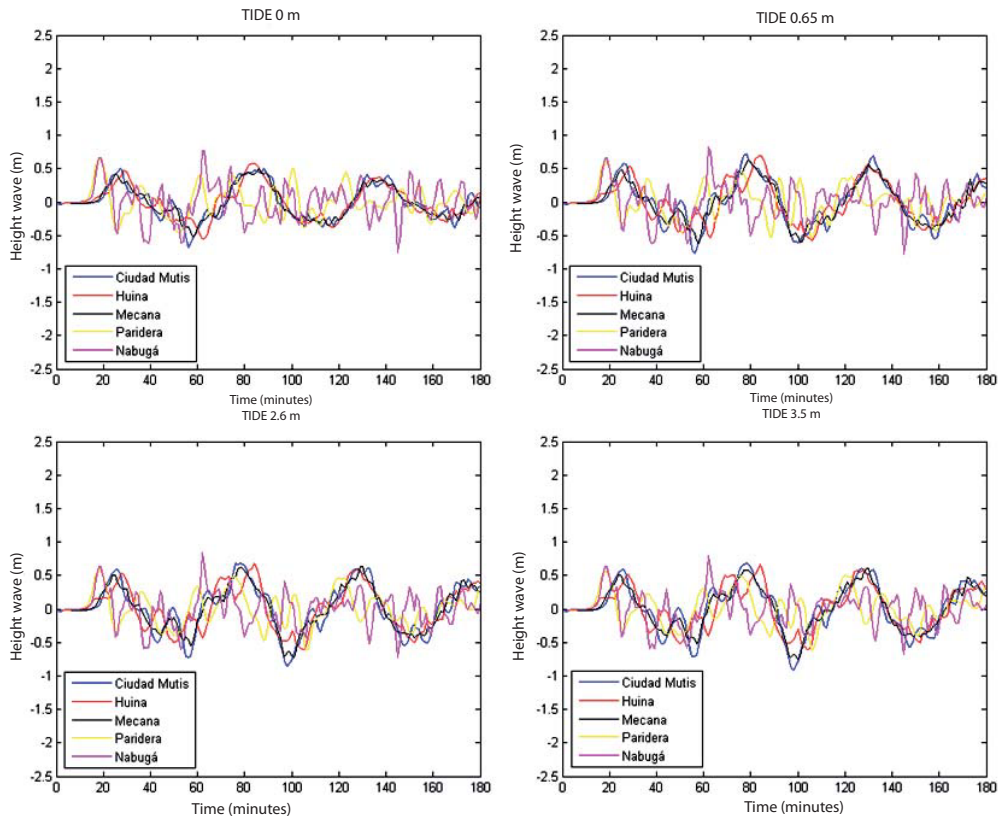


Figure 13. Time evolution of the free surface for Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Paridera and Nabugá with different tidal levels (Cabo Corrientes - Arusí source).

Fuente Cabo Corrientes – Arusí (Zona II)

Un evento generado por esta fuente genera un menor impacto en el Golfo de Cúpica en comparación con los escenarios de 1906 y 1979. En la figura 12 se representa el máximo desplazamiento de la superficie libre de este evento, en los diferentes niveles de marea. Los máximos desplazamientos de la superficie libre se presentan en la máxima pleamar registrada y se aproximan a los 4 m para Ciudad Mutis, Mecana y Paridera; y sobrepasan los 4 m para Huina y Nabugá.

En la figura 13 se representa la evolución temporal de la superficie libre en los diferentes puntos de evaluación. Se pueden observar tres trenes de olas principales para Ciudad Mutis, Huina y Mecana, por encontrarse incluidas en una pequeña bahía que conforman la Punta de Solano y Punta Huaca, estos tres trenes de olas no alcanzan 1 metro de altura, al igual que en Paridera y Nabugá.

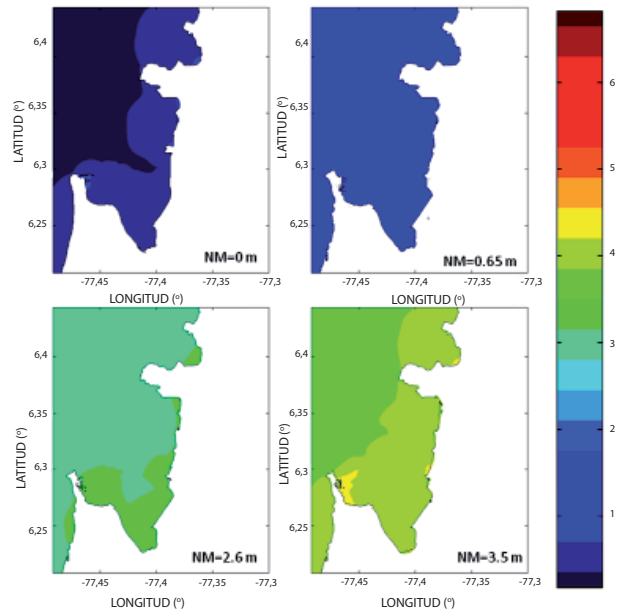


Figura 12. Máximo desplazamiento de la superficie libre generada por la fuente Cabo Corrientes - Arusí para los diferentes niveles de marea.

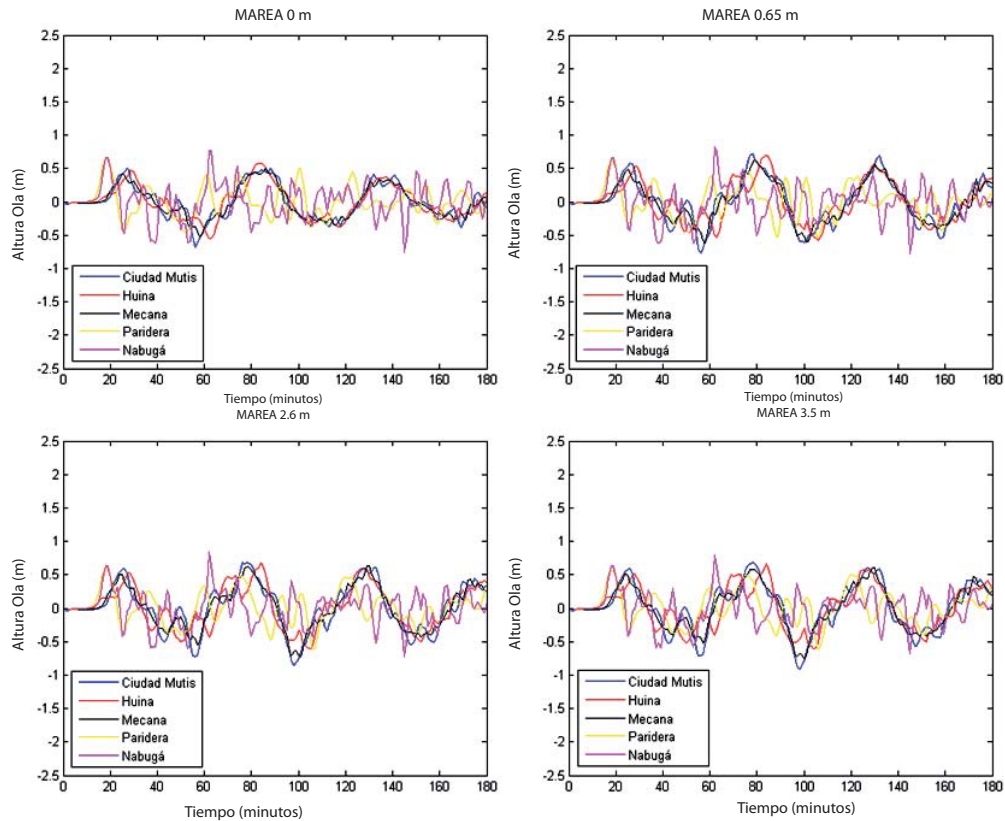


Figura 13. Evolución temporal de la superficie libre para Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Paridera y Nabugá, con los diferentes niveles de marea (fuente Cabo Corrientes- Arusí).

Arusí - Cabo Marzo Source (Zone III)

An event generated by this source may have an impact on Ciudad Mutis and Huina which would be similar to the result obtained in the event of 1906.

Figure 14 shows the maximum displacement of the free surface for different tide levels. The maximum displacement of the free surface is approximately 5 m for Ciudad Mutis, Mecana, and it is about 6 m to Huina, Paridera and Nabugá.

In figure 15 shows the time evolution of the free surface for different points of evaluation. Four main wave trains can be observed for Ciudad Mutis, Huina and Mecana, as they included in a small bay formed by Punta Solano and Punta Huaca, which causes the energy of the wave, the bathymetry and morphology the coast to generate these three wave trains. The maximum height reached is approximately 2 m at a tide of 3.5, while at a 0 m tide the maximum height would reach about 1.5 m, so that these waves may have a significant impact on the coastal zone of Ciudad Mutis.

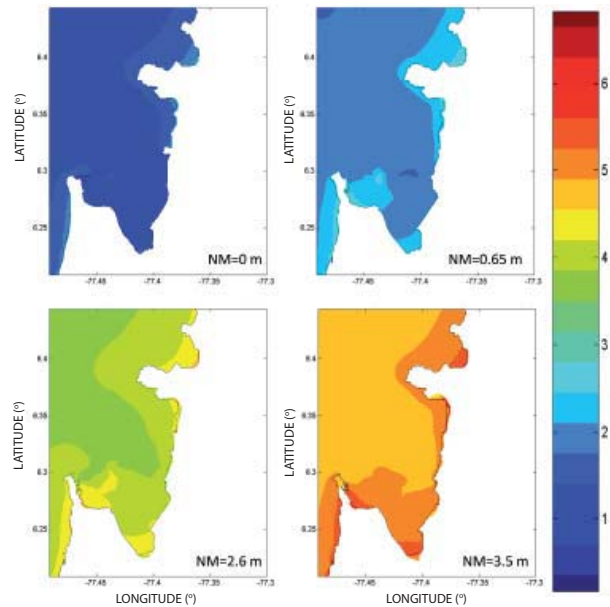


Figure 14. Maximum displacement of the free surface generated by the - Arusí - Cabo Marzo source for different tide levels.

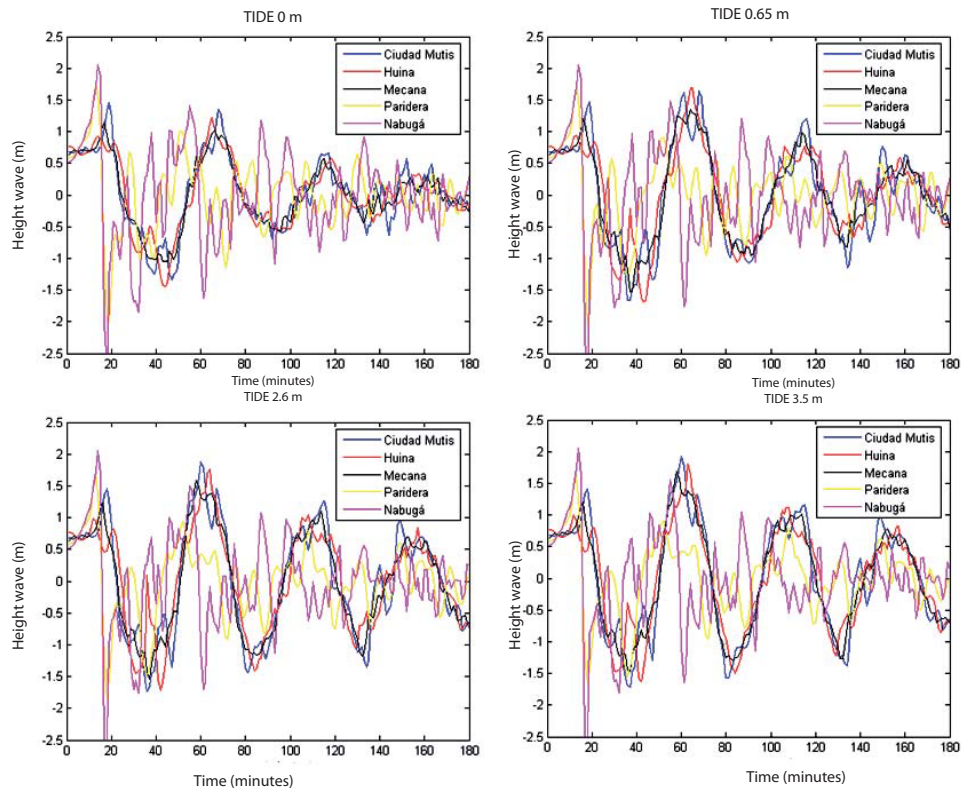


Figure 15. Time evolution of the free surface for Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Paridera and Nabugá with different tidal levels (Arusí- Cabo Marzo source).

Fuente Arusí – Cabo Marzo (Zona III)

En evento generado por esta fuente, puede generar un impacto para Ciudad Mutis y Huina similar al resultado obtenido en el evento de 1906.

En la figura 14 se representa el máximo desplazamiento de la superficie libre para los diferentes niveles de marea. Los máximos desplazamientos de la superficie libre se aproximan a los 5 m para Ciudad Mutis, Mecana; y se aproximan a los 6 m para Huina, Paridera y Nabugá.

En la figura 15 se representa la evolución temporal de la superficie libre para los diferentes puntos de evaluación. Se puede observar cuatro trenes de olas principales para Ciudad Mutis, Huina y Mecana, por encontrarse incluidas en una pequeña bahía que conforman la Punta de Solano y Punta Huaca, lo que produce que la energía de la ola, la batimetría y la morfología de la costa genere estos tres trenes de ola. La máxima altura alcanzada es de aproximadamente 2 m con la marea de 3.5, mientras con la marea de 0 m la máxima altura alcanzada es de aproximadamente 1.5 m, por lo que estas olas pueden afectar considerablemente la zona costera de Ciudad Mutis.

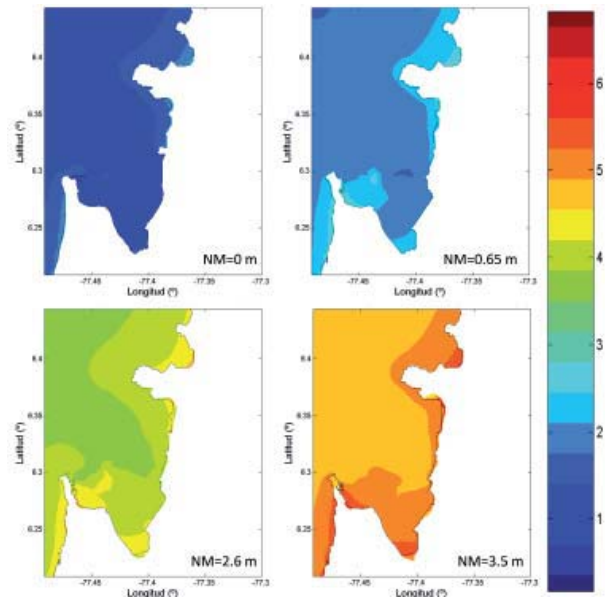


Figura 14. Máximo desplazamiento de la superficie libre generada por la fuente Arusí-Cabo Marzo para los diferentes niveles de marea.

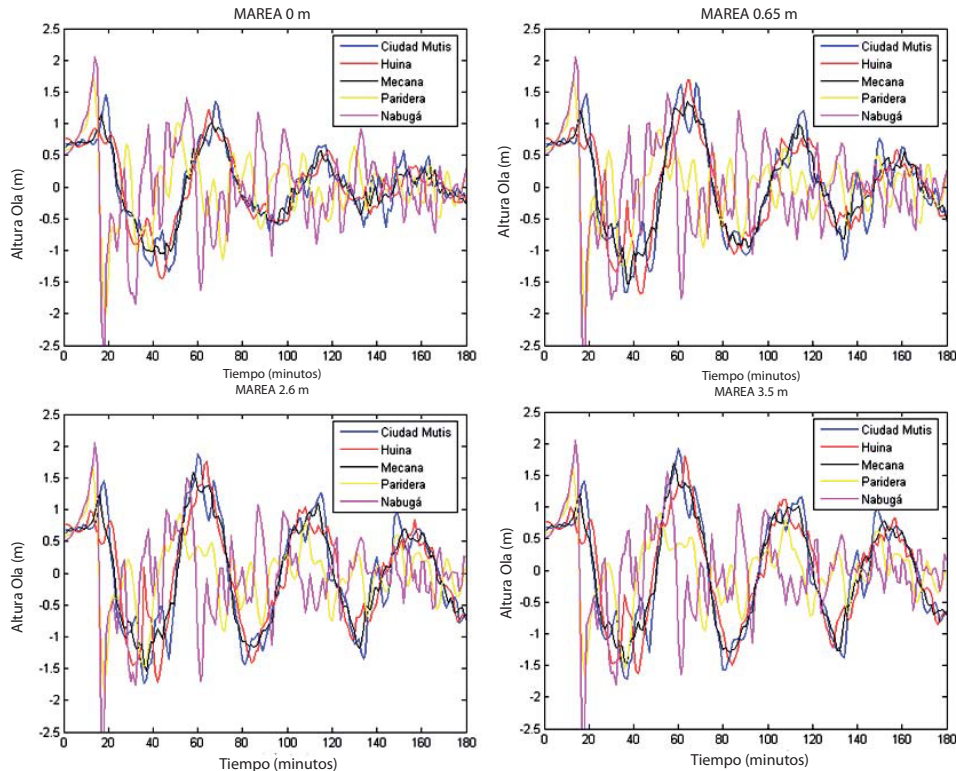


Figura 15. Evolución temporal de la superficie libre para Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Paridera y Nabugá, con los diferentes niveles de marea (fuente Arusí-Cabo Marzo).

Figure 16 presents a superposition of the worst credible scenario as a result of the proposed events, which is the modeling of the event in 1906 with the highest recorded tide (3.5 m), a mapping of current land use in the municipality of Bahía Solano developed by Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC - April 2005, which was supplied by the Municipality of Bahía Solano and used in developing the land use plan. It can be observed in the figure that the most potentially highly affected town in the event of a tsunami with the characteristics described in the numerical simulation of the 1906 event are: Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Huaca and Paridera.

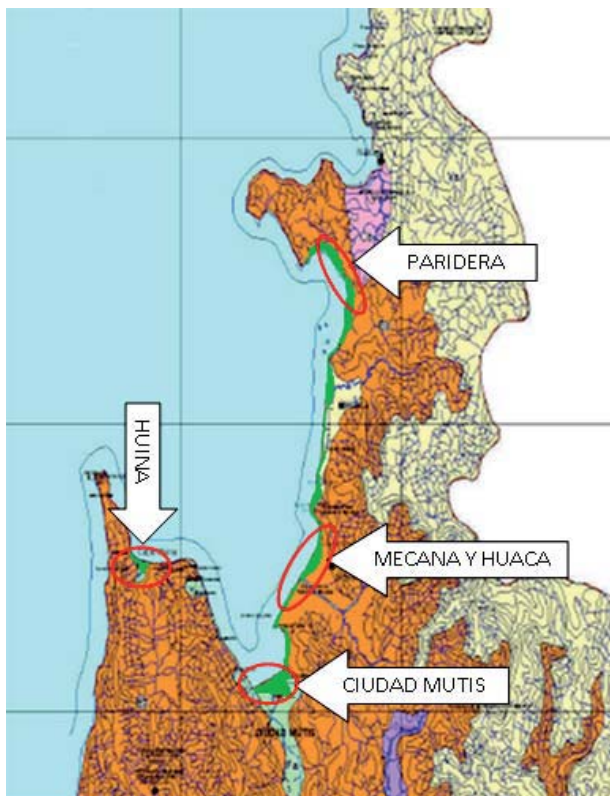


Figure 16. Maximum displacement of the free surface generated by the 1906 source - SL = 3.5 m, superimposed on an IGAC map (overlapping values in green and red indicate the most highly affected towns).

Figure 17 presents a superposition of the worst credible scenario to a map of current land use of Ciudad Mutis prepared by Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC - April 2005, which has been supplied by the Municipality of Bahía Solano and which has been used in the development of the land use plan.

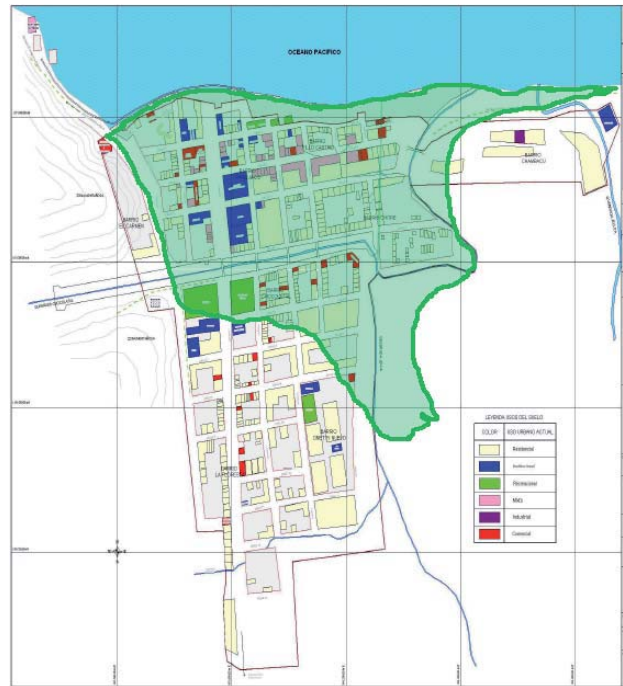


Figure 17. Maximum displacement of the free surface generated by the 1906 source - SL = 3.5 m, superimposed on an IGAC map. The green area shows the affected part in accordance with the results obtained.

Figure 17 shows the potential flood of the Fillo Castro, El Carmen, Panquiaco, Chambacú and Chitre neighborhoods. The Jella and Chocolatal streams which surround these neighborhoods and empty into Bahía de Solano would probably overflow, worsening thus the flooding of the abovementioned neighborhoods. The buildings or structures which are more likely to suffer damages, in the worst case scenario, are those located in the first three town streets. Chambacú neighborhood, formed by stilt – made houses of on mangrove, would probably suffer the most affectation. Chocolatal district may suffer some flooding by the overflowing of the Jella and Chocolatal streams, but it would probably not be directly affected by the impact of the tsunami wave on its structures and buildings.

CONCLUSIONS

- The subduction zone between Colombia and Ecuador has the largest historical seismic activity associated with three major tsunami events. Thus, it becomes the most likely area to present a new tsunamigenic event,

En la figura 16 se superpone el peor escenario creíble como resultado de los eventos propuestos, que es el de la modelación del evento de 1906 con la máxima marea registrada (3.5 m), a una cartografía del uso actual del suelo del municipio de Bahía Solano elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC- en abril de 2005, el cual fue suministrado por la Alcaldía de Bahía Solano y utilizado en el desarrollo del plan de ordenamiento territorial. En la figura se observan que las poblaciones con mayor afectación por un evento de tsunami con las características descritas en la simulación numérica del evento de 1906 son: Ciudad Mutis, Huina, Mecana, Huaca y Paridera.

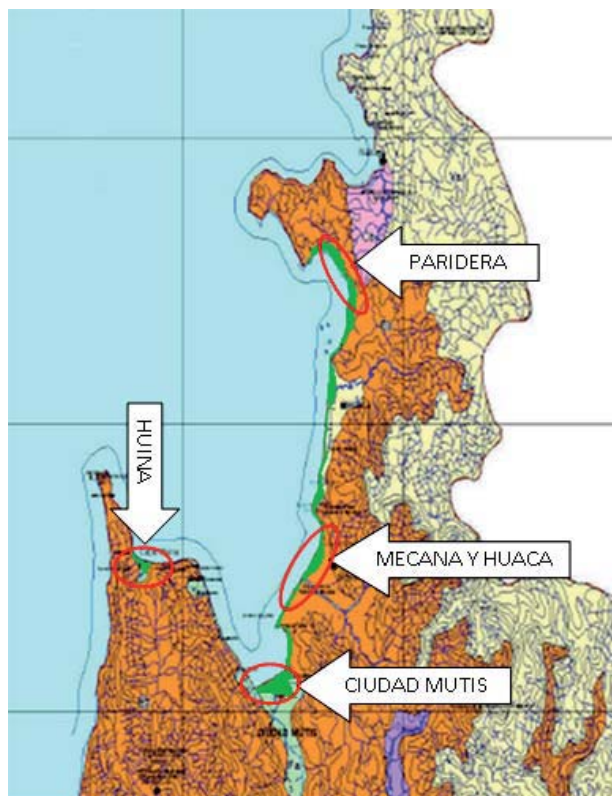


Figura 16. Máximo desplazamiento de la superficie libre generada por la fuente de 1906 para un NM= 3.5 m, superpuesto en una cartografía IGAC (En verde los valores superpuestos y en rojo señaladas las poblaciones más afectadas).

En la figura 17 se superpone el peor escenario creíble a una cartografía del uso actual del suelo de Ciudad Mutis elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC- en abril de 2005, el cual fue suministrado por la Alcaldía de Bahía Solano y utilizado en el desarrollo del plan de ordenamiento territorial.

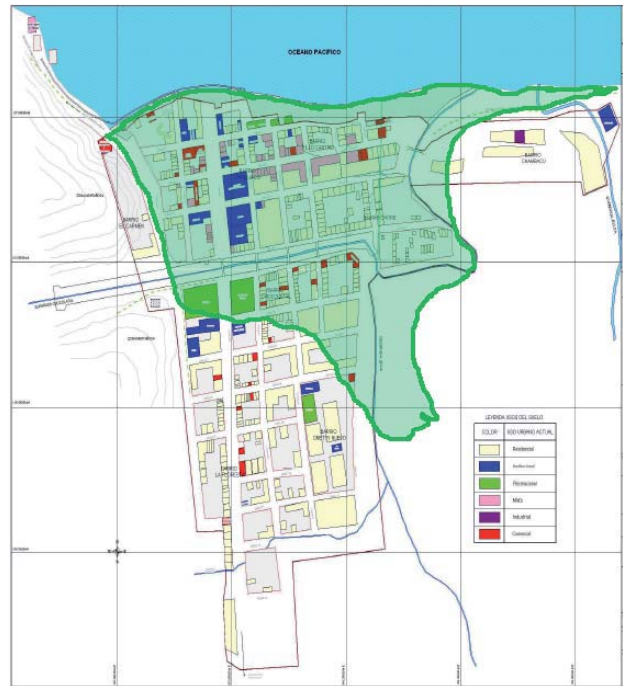


Figura 17. Máximo desplazamiento de la superficie libre generada por la fuente de 1906 para un NM= 3.5 m, superpuesto en una cartografía IGAC. En sombreado verde la zona afectada acuerdo los resultados obtenidos.

En la figura 17 se observa la inundación de los barrios Fillo Castro, El Carmen, Panquiaco, Chambacú y Chitre. Las quebradas Jella y Chocolatal que rodean estos barrios y desembocan en la Bahía de Solano probablemente se desborden ayudando a la inundación de los barrios nombrados anteriormente. Las edificaciones o estructuras que sufrirán una mayor probabilidad de afectación, en el peor escenario posible, son las que se encuentran ubicadas en las tres primeras calles del municipio. El barrio Chambacú formado por viviendas palafíticas sobre mangle probablemente sufrirá grandes afectaciones. El barrio Chocolatal puede sufrir algunas inundaciones por los desbordamientos de las quebradas Jella y Chocolatal, pero probablemente no será afectado directamente por el impacto de la ola de tsunami sobre sus estructuras y edificaciones.

CONCLUSIONES

La zona de subducción colombo-ecuatoriana presenta la mayor actividad sísmica histórica, asociada con tres grandes eventos tsunamigénicos. Por ende, se convierte en la zona con más probabilidad de volver a

affecting the Colombian Pacific Coast and the study area.

The northern area of the Colombian Pacific between Cabo Corrientes and the Gulf of Cupica has a seismic activity which is known to have events up to $M_w = 7.2$. Although at present there are no historical records of destructive tsunami events for the area, the seismic activity of the Bahía Solano fault is to not be neglected.

The effect of sea level in the propagation of the tsunami wave is crucial to assess impact on the coastal zone.

The numerical results in the 1906 case study show that an event like this would have greatest impact on the Gulf of Cupica.

The layout of the Gulf of Cupica, Punta de Solano, all the other morphological accidents and bathymetry of the area, generate large concentration of energy from tsunami waves, thus aggravating the impact of the wave train on the coastal area between Ciudad Mutis and Punta Lana.

The two new sources of generation proposed (on the one hand, a seismic event occurring between Cabo Corrientes and Arusí, and on the other hand, a seismic event occurring between Arusí and Cabo Marzo) are representative for the area, esp. the second source, which could generate an impact similar to that of the 1906 event.

Based on the results presented in this study, it is necessary to establish the evacuation zones in case of a tsunamigenic event for the towns appertaining to Bahía de Cupica, especially Ciudad Mutis, the municipal capital of Bahía Solano.

Based on the results presented in this study, it is recommended to study the most effective mechanism for a warning system in case of a tsunami event; for an event occurring in the subduction zone there is 40 – minute's time for the first train of waves to arrive, and just over 20 minutes in case of an event in the northern zone.

Studying in detail the resonant effects that occur in tsunami waves due to the configuration of the Gulf of Cupica.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to the Center for Oceanographic Research and Management (CIOH – from its original Spanish language initials - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas), the Pacific Centre for Pollution Control (CCCCP), the Agustín Codazzi Geographical Institute (IGAC) and the “Almirante Padilla” Naval Academy, for the institutional, academic and logistic support they provided for the development of this study.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- [1] Otero L. Simulación Numérica de Tsunamis en el Litoral Pacífico Colombiano: Bahía de Tumaco (Numerical Simulation of Tsunamis in the Colombian Pacific Coast: Bahía de Tumaco). Master's thesis to obtain the title of Msc. Science and Technology for the Management of the Coast 2003. Santander, Spain.
- [2,3] United States Geological Survey. Summary, scientific and technical information of Northern Sumatra earthquake [online]. 2004 Dec 26 [quoted 2010 March 22]; available online at: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2004/us2004slav/#summary> http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2004/eq_041226/neic_slav_hrv.html.
- [4] Kelleher J. Rupture zones of large South America earthquakes and some predictions. *J. Geophys. Res.*, 1972; 77: 2987-2103.
- [5] Kanamori H, McNally K. Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador – Colombia coast. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1982; 72: 1241 – 1253.
- [6] Quiceno A, Ortiz M. Evaluación del Impacto de Tsunamis en el Litoral Pacífico Colombiano (Región de Tumaco), Tsunami Impact Assessment in the Colombian Pacific Coast (region of Tumaco), CCCP Science Bulletin 2001, No. 8: 5-14.
- [7] Caballero L, Ortiz M. Evaluación del impacto de tsunamis en el Litoral Pacífico Colombiano. (Assessing the impact of tsunamis on the Pacific coast of Colombia. Part II (Buenaventura region)). CCCP Science Bulletin 2003, (9): 45-57.
- [8] Cardona Y. Análisis del arribo de ondas de tsunami a las poblaciones de la Bahía de Tumaco a través de señales sintéticas. (Analysis of tsunami wave arrival to the people

presentar un evento tsunamigénico que afecte la Costa Pacífica Colombiana y el área de estudio.

La zona norte del Pacífico Colombiano comprendida entre Cabo Corrientes y el Golfo de Cúpica presenta una actividad sísmica conocida con eventos de hasta una $M_w=7.2$. Aunque en la actualidad no se cuente con registros históricos de eventos tsunamigénicos destructivos para la zona, no se debe desconocer la actividad sísmica de la falla de Bahía Solano.

El efecto del nivel del mar en la propagación de la onda de tsunami es determinante para evaluar su impacto en la zona costera.

Los resultados numéricos en la aproximación de 1906 muestran que un evento como éste genera el mayor impacto en el Golfo de Cúpica.

La configuración del Golfo de Cúpica, la Punta de Solano, los demás accidentes morfológicos y la batimetría de la zona, generan gran concentración de energía de las ondas de tsunami, agravando el impacto de la onda en la zona costera comprendida entre Ciudad Mutis y Punta Lana.

Las dos nuevas fuentes de generación propuestas: la primera, un evento sísmico que se produzca entre Cabo Corrientes y Arusí y, la segunda, un evento sísmico que se produzca entre Arusí y Cabo Marzo, son representativas para la zona y en especial la segunda, la cual puede generar un impacto parecido al evento de 1906.

Es necesario establecer con base en los resultados presentados en este trabajo, las zonas de evacuación ante un evento tsunamigénico para los corregimientos de la Bahía de Cúpica, en especial de la cabecera municipal de Bahía Solano: Ciudad Mutis.

Con base en los resultados del presente trabajo se recomienda estudiar el mecanismo más eficaz para un sistema de alerta en caso de un evento de tsunami, ya que para un evento que ocurra en la zona de subducción se cuenta hasta con 40 minutos para el primer tren de olas y en el caso de un evento en la zona norte con más de 20 minutos.

Estudiar con mayor detalle los efectos resonantes que se producen en las ondas de tsunami debido a la configuración del Golfo de Cúpica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), al Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y a la Escuela Naval "Almirante Padilla", por el apoyo institucional, académico y logístico brindado para desarrollar el presente estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Otero L. Simulación Numérica de Tsunamis en el Litoral Pacífico Colombiano: Bahía de Tumaco. Universidad de Cantabria. Tesina de Máster para acceder al título de Msc. Ciencias y Tecnologías para la Gestión de la Costa 2003. Santander, España.
- [2,3] United States Geological Survey. Summary, scientific and technical information of Northern Sumatra earthquake [en línea]. 2004 Dic 26 [citado 2010 Marzo 22]; disponible en internet en:
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2004/us2004slav/#summary> http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2004/eq_041226/neic_slav_hrv.html.
- [4] Kelleher J. Rupture zones of large South America earthquakes and some predictions. *J. Geophys. Res.*, 1972; 77: 2987-2103.
- [5] Kanamori H, McNally K. Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador – Colombia coast. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1982; 72: 1241 – 1253.
- [6] Quiceno A, Ortiz M. Evaluación del Impacto de Tsunamis en el Litoral Pacífico Colombiano (Región de Tumaco), *Boletín Científico CCCP* 2001; No 8: 5-14.
- [7] Caballero L, Ortiz M. Evaluación del impacto de tsunamis en el Litoral Pacífico Colombiano. Parte II (región de Buenaventura). *Boletín Científico CCCP* 2003; (9): 45-57.
- [8] Cardona Y. Análisis del arribo de ondas de tsunami a las poblaciones de la Bahía de Tumaco a través de señales sintéticas. *Boletín Científico CCCP* 2004; (11): 42-49.
- [9] Cardona Y, Toro F, Vélez J, Otero L. 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* 2007; (14): 19-30.

- of Bahía de Tumaco through synthetic signals). CCCP Science Bulletin 2004, (11): 42-49.
- [9] Cardona Y, Toro F, Vélez J, Otero L. 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 (Estimation of hazard of flood generated by tsunami waves, considering the height and speed of the overflowing water wall for the municipality of Tumaco). CCCP Science Bulletin 2007, (14): 19-30.
- [10] Restrepo J. y Otero L. Modelación numérica de eventos tsunamigénicos en la Cuenca Pacífica Colombiana - Bahía de Buenaventura (Numerical modeling of events in the Pacific Basin tsunamis Colombia – Bahía de Buenaventura). Rev. Acad. Colomb. Cienc. 2007, 31 (120): 363-377.
- [11] Bastidas M. Estimación de riesgo por tsunami de origen cercano en jurisdicción del municipio de Buenaventura (Estimation of tsunami risk in home near the municipality of Buenaventura). Pacific Centre for Pollution Control Tumaco (Nariño), 2008.
- [12] National Bureau of Statistics - DANE. Bogota DC, Colombia. Retrieved on March 20, 2009. Available online at: <http://www.bahiasolano-choco.gov.co/apc-aa-files/63373531323266376665336630306534/bahiasolano.pdf>.
- [13] Gutsher M, Malavielle J, Lallemand S, and Collot J-Y. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie ridge collision. Earth and Planetary Science letters 1999;168, Elsevier: 255-270.
- [14] Mendoza C, Dewey J. Seismicity associated with the great Colombia-Ecuador earthquakes of 1942, 1958 and 1979: Implications for barrier models of earthquake rupture. Bull. Seis. Soc. Am. 1984; 74 (2): 577-593.
- [16] Collot J-Y, et Al. Are rupture zone limits of great subduction earthquakes controlled by upper plate structures? Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the northern Ecuador–southwest Colombia margin. Journal of Geophysical Research 2004; 109, B11103, doi:10.1029/2004JB003060.
- [17] Paris G, Machette MN, Dart RL, Haller KM. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-0284, 2000.
- [18] Taboada A, Dimaté C, Fuanzalinda A. Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción (SEISMOTECTONICS of Colombia: active continental deformation and subduction). Earth Physics No 10, 1998, 111-147.
- [19] Wells D, Coppersmith K. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacements. Bull Seism. Soc. Am. 1994; (84): 974-1002.
- [20] Liu, P.L-F et Al. Numerical simulation of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii. Recent Developments in Tsunami Research, Netherlands: Kluwer Academic Publishers 1994, 99-115.
- [21] George, D.L. Finite volume methods and adaptive refinement for tsunami propagation and inundation. PhD thesis, University of Washington, 2006.
- [22] Synolakis CE, Bernard EN, Titov VV, Kano Lu U, Gonzalez FI. Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models. NOAA Tech. Memo. OAR PMEL-135, NOAA/Pacific Marine environment Laboratory, Seattle, WA, 2007, 55 pp.
- [23] Otero L. Metodología para evaluar la peligrosidad debido a tsunamis en zonas costeras. (Methodology for evaluating the hazards due to tsunamis in coastal areas). University of Cantabria. School of Civil Engineering. Doctoral Thesis 2008. Santander, Spain.

- [10] Restrepo J. y Otero L. Modelación numérica de eventos tsunamigénicos en la Cuenca Pacífica Colombiana - Bahía de Buenaventura. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 2007; 31(120): 363-377.
- [11] Bastidas M. Estimación de riesgo por tsunami de origen cercano en jurisdicción del municipio de Buenaventura. Centro Control Contaminación del Pacífico Tumaco (Nariño), 2008.
- [12] Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Bogotá D.C., Colombia. Citado el 20 de marzo de 2009. Disponible en internet en: <http://www.bahiasolano-choco.gov.co/apc-aa-files/63373531323266376665336630306534/bahiasolano.pdf>.
- [13] Gutsher M, Malavielle J, Lallemand S, and Collot J-Y. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie ridge collision. *Earth and Planetary Science letters* 1999;168, Elsevier: 255-270.
- [14] Mendoza C, Dewey J. Seismicity associated with the great Colombia-Ecuador earthquakes of 1942, 1958 and 1979: Implications for barrier models of earthquake rupture. *Bull. Seis. Soc. Am.* 1984; 74 (2): 577-593.
- [15] Otero L, González E. Evaluación del Efecto de la Isla Barrera el Guamo Frente a la acción de Tsunamis en Tumaco. *Boletín Científico CCCP* 2005; (12): 49-61.
- [16] Collot J-Y, et Al. Are rupture zone limits of great subduction earthquakes controlled by upper plate structures? Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the northern Ecuador-southwest Colombia margin. *Journal of Geophysical Research* 2004; 109, B11103, doi:10.1029/2004JB003060.
- [17] Paris G, Machette MN, Dart RL, Haller KM. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-0284, 2000.
- [18] Taboada A, Dimaté C, Fuanzalinda A. Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. *Física de la Tierra* No 10, 1998; 111-147.
- [19] Wells D, Coppersmith K. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacements. *Bull Seism. Soc. Am.* 1994; (84): 974-1002.
- [20] Liu, P.L-F et Al. Numerical simulation of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii. Recent Developments in Tsunami Research, Netherlands: Kluwer Academic Publishers 1994, 99-115.
- [21] George, D.L. Finite volumen methods and adaptive refinement for tsunami propagation and inundation. PhD thesis, University of Washington, 2006.
- [22] Synolakis CE, Bernard EN, Titov VV, Kano Lu U, Gonzalez FI. Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models. NOAA Tech. Memo. OAR PMEL-135, NOAA/Pacific Marine Environment Laboratory, Seattle, WA, 2007, 55 pp.
- [23] Otero L. Metodología para evaluar la peligrosidad debido a tsunamis en zonas costeras. Universidad de Cantabria. Escuela Técnica Superior de Caminos Canales y puertos. Tesis Doctoral 2008. Santander, España.