

Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar

Melvin A. Lizano¹ A y Omar G. Lizano R²

¹ Posgrado en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Universidad Nacional y Universidad de Costa Rica. Escuela de Geografía de UCR y Escuela de Ciencias Geográficas de UNA. Correo. Meliza@ice.go.cr

² Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, 2060 San José, Costa Rica. Fax (506) 2511-2703. Correo Electrónico. omar.lizano@ucr.ac.cr

Resumen

Se analizan cuatro fenómenos que pueden aumentar el nivel del mar, como lo son: el cambio climático, el fenómeno de El Niño, apilamiento de oleaje y mareas astronómicas. Este estudio se realizó a partir de modelos, observaciones y mediciones efectuadas en campo, que presentan un nivel del mar para cada fenómeno que pueden ser superpuestos. Se elaboran escenarios reales o hipotéticos para simular el comportamiento del nivel del mar en los próximos 100 años en la punta de Puntarenas. Se estudian los niveles de mareas astronómicas a partir de predicciones mareales. El aumento del nivel del mar en los próximos años por calentamiento global es según los escenarios del IPCC (2007, 21), y observaciones hechas durante el fenómeno de El Niño de 1997-98 en Costa Rica, se usan para crear las distintas combinaciones y generar los niveles mareográficos. Los resultados muestran los niveles de inundación en la Ciudad de Puntarenas en los próximos años ante estos eventos. Una combinación hipotética de niveles mareográficos extremos, indica que Puntarenas podría ser totalmente inundada en algún momento. Este estudio pretende alertar a las instituciones gubernamentales sobre estos escenarios en Puntarenas para que tomen las decisiones correspondientes ante el inminente cambio del nivel del mar. Se proponen combinaciones de nivel del mar, de tal forma que otros componentes no incluidos en este estudio, como tsunamis, puedan ser simulados también, y ayude en la toma de decisiones ante estos posibles eventos.

Palabras claves: nivel de mareas, escenarios, ENOS, apilamiento, cambio climático, modelos, topografía y batimetría.

Abstract

Four phenomena are analyzed that can enlarge the sea level, like climatic change, the El Niño phenomenon, wave setup and astronomical tides. This study was carried out from models, observations and measurements performed in field presenting a sea level for each phenomenon that can be superimposed. It's use real or hypothetical settings to simulate the behavior of the sea level in the next 100 years in the tip of Puntarenas. The astronomical tide levels are based on tidal predictions. The increase of the sea level in the next years by global warning is according to the settings of the IPCC (2007, 21), and observations made during the El Niño phenomenon of 1997-98 in Costa Rica, are used to create the different combinations and generate the mareographic levels. The results show the possible flood levels in Puntarenas City in the next years. A hypothetical combination of extreme mareographic levels shows that Puntarenas could be flooded completely in some moment. This study intends to alert to the governmental institutions on these settings in Puntarenas so that they take the corresponding decisions in an imminent sea level change. Combinations of sea level are proposed in such a way that other mareographic components not include in this study, like tsunamis, can be simulated also and help to takes decisions before these possible events.

Key words: tidal level, ENOS, wave setup, climate change, models, topography and batimetry.

Introducción.

A partir de los años 1900 y hasta la actualidad, el mundo ha experimentado cambios en sus sistemas terrestres, lo cual ha reflejado la fragilidad del planeta y de los seres que lo habitan (PNUMA, 2007, 120). El clima mundial está cambiando a un paso acelerado, según la comunidad científica internacional. Lo anterior se refleja con la retirada de los glaciares, la fracturación de las grandes plataformas de hielo, el aumento del nivel del mar y el derretimiento del hielo permanente (PNUMA, 2007, 125). Todo esto es una influencia directa del aumento de la temperatura, expresado en el informe escrito por el IPCC (2007, 2), donde se apunta que de los 12 últimos años (1995-2006), 11 figuran entre los más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). La tendencia lineal a 100 años (1906-2005), cifrada en 0,74°C (entre 0,56°C y 0,92°C) es superior a la tendencia correspondiente de 0,6°C (entre 0,4°C y 0,8°C) (1901-2000) de acuerdo con el Tercer Informe de Evaluación (IPCC, 2001, 5). A la vez, el documento indica que este incremento de la temperatura está distribuido por todo el planeta y es más acentuado en las latitudes altas que en los trópicos.

La extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en 2,7% (entre 2,1 y 3,3%) por decenio, con disminuciones estivales aun más acentuadas de 7,4% (entre 5,0 y 9,8%) por decenio (IPCC, 2007, 5). En promedio, los glaciares de montaña y la cubierta de nieve están decreciendo de manera acelerada, cambio que se ha manifestado en los últimos decenios, a tal punto que la cubierta de hielo en el mar Ártico está disminuyendo 8,9% por década en verano, y es posible que para el año 2100, el Océano Ártico este completamente libre de hielo en la estación estival (Lambrechts, 2007, 4). Como lo indica Lambrechts (2007, 4): *“La extensión de la capa de nieve media mensual en el Hemisferio Norte ha disminuido a un ritmo de 1,3% por decenio en los últimos 40 años, registrándose las mayores pérdidas en la primavera y el verano, lo que supone reducciones en la capa de nieve”*.

A escala global se prevé la inundación de miles de kilómetros cuadrados de humedales costeros y tierras bajas (Bedia, 2004, 1). También es previsible el retroceso de playas y la ruptura de infraestructuras litorales de protección, la salinidad de acuíferos y la pérdida de tierras productivas para la agricultura y la ganadería (Bedia, 2004, 1). Los patrones de erosión y sedimentación litorales se verán modificados y afectarán instalaciones portuarias, enclaves turísticos y ecosistemas de especial valor, entre otras zonas sensibles (Van der Meulen et al., 1991, 106). Las consecuencias previsibles son el retroceso por los cambios en la dinámica litoral, como por la proliferación de estructuras de protección que alterará el ambiente costero en general (Bedia, 2004, 1).

Asimismo, se conoce del último modelo climático, elaborado por Otto-Bliesner et al. (2006, 1751) que concuerda con datos obtenidos de registros paleoclimáticos de testigos de hielo, polen fósil, sedimentos marinos y marcas químicas utilizados para comprobar la precisión del modelo. Se efectuó un cálculo del aumento para el año 2100, el cual indica que las costas del Sur, Suroeste y Surestes de Estado Unidos, se verán seriamente afectadas, pues se registra un aumento aproximado de 6 metros del nivel del mar. Ciudades como Nueva Orleans desaparecerán para esa fecha, al igual que ciertas zonas de la Florida, como los cayos (Otto-Bliesner et al., 2006, 1752).

Nuestro país no escapa ante tal situación y principalmente, a lo que es el aumento del nivel de los océanos (Lizano, 1997, 172; Lizano y Salas, 2001, 172), debido a que al estar en un istmo y tener costas en ambas vertientes (Pacífica y Caribe) lo hace vulnerable ante futuros eventos de este tipo. Como lo indica Díaz (1999, 5), Costa Rica tiene más de 1100 Km de línea de costa en el Océano Pacífico y más de 200 Km en el Mar Caribe. Patrones de erosión desde leves, moderados y hasta severos ya se está viendo en las costas de Costa Rica, como lo señala Lizano (en preparación), tanto en el Pacífico, como en el Caribe.

Para el caso de Costa Rica, se cuenta con el estudio efectuado por Díaz (1999), el cual determinó las zonas de riesgo ante un ascenso del nivel del mar: Punta Morales-Tárcoles. En el estudio Díaz utilizó la técnica AVVA (Análisis de Vulnerabilidad Asistido por Video-grabación Aérea, propuesta por Leatherman et al. (1995), y efectuó una clasificación del frente costero de acuerdo con su vulnerabilidad ante la acción de las olas o de los cambios del nivel del mar, y combinó ese método con el reconocimiento terrestre, el estudio estereoscópico de las aerofotos para trazar sobre ellas, los límites de regresión e inundación (transgresión). Es de resaltar que ese estudio se realizó con unos pocos datos topográficos aproximados alrededor de la Ciudad de Puntarenas, y sobre los cuales se sobrepusieron los escenarios del nivel del mar por calentamiento solamente. Nadie ha realizado escenarios de nivel del mar relativos a las demás componentes mareográficas, y más aún, refiriendo estos niveles al nivel "0" (cero) del mar o promedio de sicigias (Lizano, 2006, 53; 2009, 19). Además, se realizan mediciones topográficas con resolución de centímetros, para generar modelos de elevación digital. Hitos o BM de nivelación de referencia de la Ciudad de Puntarenas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), son usados para proyectar todos los datos topográficos y batimétricos. Esta metodología, que se aplica por primera vez en Costa Rica, permitirá obtener resultados confiables y precisos, de acuerdo con los criterios oceanográficos establecidos.

Metodología

El levantamiento topográfico de la aguja de Puntarenas (lengua de 3.5 Km de largo) se realizó con un GPS métrico, perteneciente a la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica. Los puntos se corrigieron con base en una estación total para tener calidad centimétrica de los detalles del terreno. Posteriormente estos datos fueron utilizados para la generación del Modelo de Elevación Digital (MED).

Con los datos obtenidos en el levantamiento de campo y los datos facilitados por el IGN de la carta náutica de Puntarenas, y los datos de topografía de la Unidad Ejecutora Regularización de Catastro y Registro (UERCR), se procedió a la tarea de unificar los niveles de referencia batimétricos y topográficos, de manera que se tuviera en una sola capa para realizar la modelización. Esta información puntual se muestra en la Fig. 1, donde están representados aproximadamente 1 079 000 datos puntuales. La gran densidad de puntos en tierra es tal que cubre por completa el espacio terrestre mostrado en la Fig.

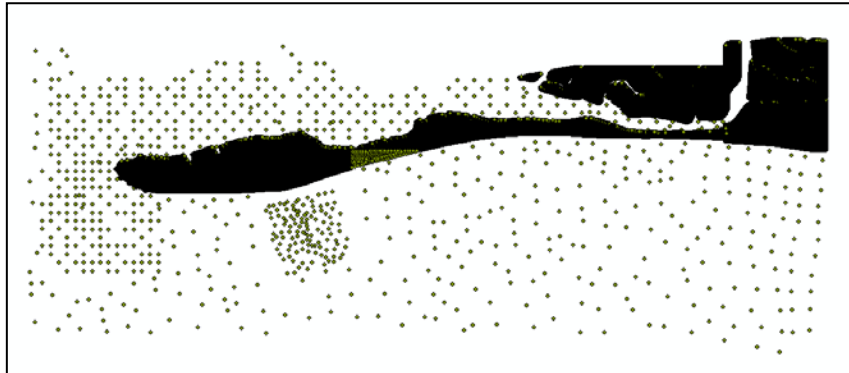


Figura 1. Datos Batimétricos-Topográficos de la punta de Puntarenas.

Este nivel 0 del mar (nivel de sicigias) al que se refirieron los datos de una tabla de mareas, fue establecido en un muelle del estero de Puntarenas para ajustar los datos topográficos a los datos batimétricos de la carta náutica. Se estableció un promedio entre el valor de los datos dados por el UERCR, y los obtenidos en campo que sí tienen el nivel de referencia al 0 de la marea. La altura promedio obtenida a partir del promedio de los 543 puntos tomados en campo es de 2.9833 metros. En tanto, comparando los puntos anteriores con los dados por la UERCR, indica una altura promedio de 3.8226 metros. La diferencia absoluta entre cada uno de esos puntos es de 84.29 cm, valor que se restó a los datos topográficos, con el fin de homologarlos al nivel "0" del mar, que corresponde al promedio de sicigias (Lizano, 2006, 53; 2009, 19).

Para trabajar la información de mareas astronómicas se utilizó el software para PC llamado Tidal & Currents (Lizano, 2006, 53), cuyas predicciones incluidas en el programa, van desde el año 1901 hasta el año 2099.

Los distintos niveles del mar se modelaron utilizando un software de Sistema de Información Geográfica (SIG), asumiendo un aumento del nivel del mar entre 30, 100, 150 y 200 cm promediados, según los criterios del IPCC (2007, 21) como se muestra en la Tabla 1. Para el caso de estudio, al nivel promedio de la mareas máximas para el Pacífico Central de Costa Rica (Lizano, 2006, 56) se le sumará cada una de las variables mencionadas.

Tabla 1

Escenarios de aumento del nivel del mar para la ciudad de Puntarenas por cambio climático

No.	Altura (cm)	Período IPCC 2007 (años)
1	30	30
2	100	50-60
3	150	90
4	200	100

Aparte de la modelización con los datos de mareas, se utilizaron observaciones puntuales en Puntarenas para ajustar los datos de topografía al nivel "0" del mar o nivel de sicigias. También se utilizaron observaciones del aumento del nivel de los océanos en periodos de fenómeno de El Niño (Lizano, 1997, 172). Como lo señala Lizano (1997, 174), se sabe que el calentamiento del océano produjo una elevación del nivel del mar por expansión térmica de 30 cm en promedio para El Niño de 1987, y un máximo de 60 cm medido en el año para ese fenómeno.

El apilamiento de agua sobre la costa, producto del rompimiento de oleaje se calcula de acuerdo con la fórmula propuesta por Sorensen (1978, 26): $S_w = 0.15 H_b$, donde S_w es el aumento del nivel del mar por rompimiento de las olas y H_b es la altura de la ola al romper. Los valores de H_b de Lizano (2007, 46, 47) fueron utilizados en este estudio para calcular este nivel mareográfico.

Después de obtener los datos del MED, se utilizaron las proyecciones del aumento del nivel del mar por cambio climático, los datos de las mareas, y el apilamiento del agua por oleaje, para elaborar los distintos escenarios del nivel de mar en Puntarenas.

Resultados

La altura promedio de toda la aguja es de 1,7811 metros, referidos al nivel 0 del mar, lo cual indica que Puntarenas es una zona sumamente vulnerable a fenómenos meteorológicos y oceanográficos. Según (Díaz, 1999, 28), la altura de la lengua no sobrepasa los 4 m. Con estos datos se encontró que la máxima altura de Puntarenas es de 6.13 metros a partir del nivel "0", punto localizado en el área terrestre del poblado de Chacarita. Para el caso de la aguja de Puntarenas, la máxima elevación medida es de 5.8471 m (sobre la línea férrea en Chacarita). Las mayores elevaciones de la aguja se dan sobre toda la longitud de la línea férrea alcanzando una elevación máxima de 4.3223 m cerca de angostura (Fig. 3).

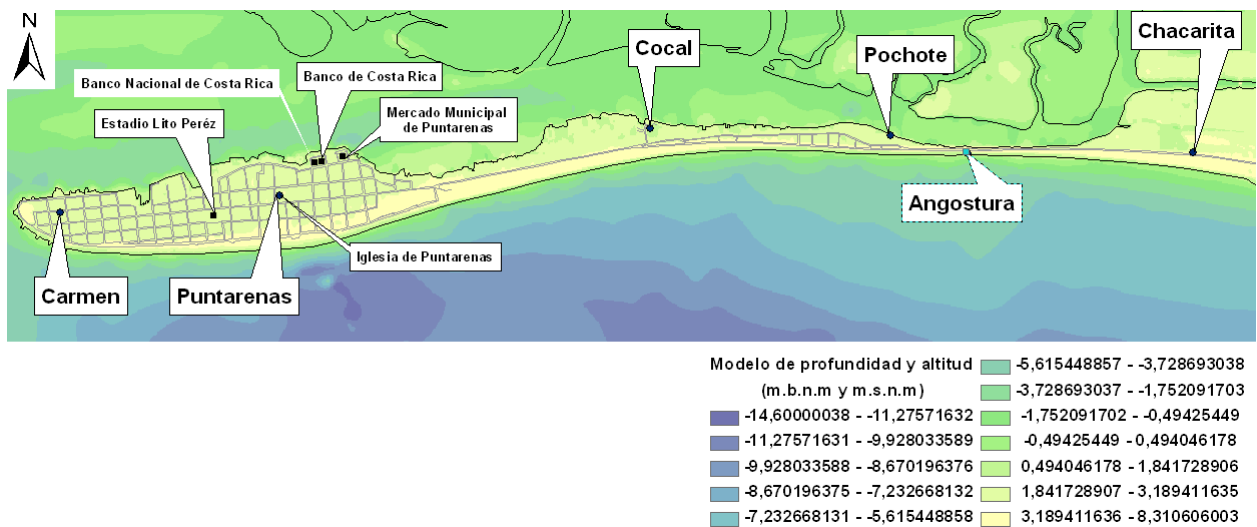


Fig. 3. Contornos de profundidad y altura (metros) para la punta de Puntarenas.

El Modelo de Elevación Digital (MED) creado con los datos topo-batimétricos se muestra en la siguiente figura:

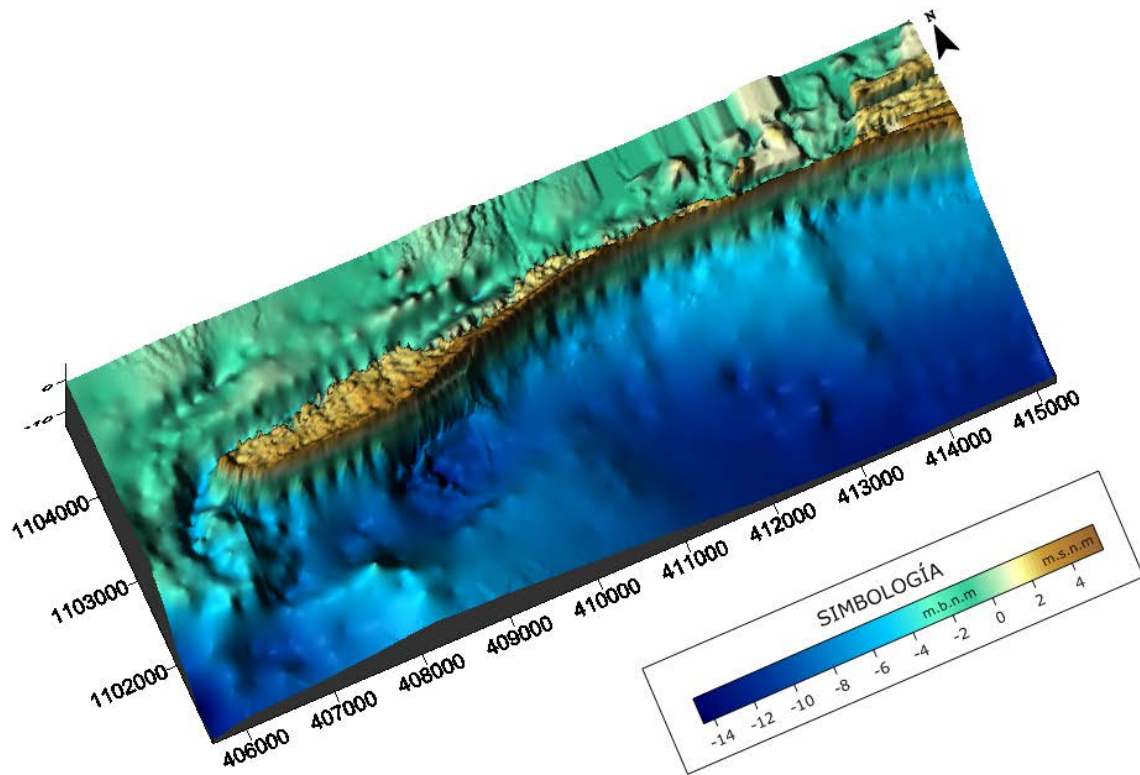


Fig. 4. Modelo de Elevación Digital (MED) de la punta de Puntarenas. Profundidades y alturas en metros.

1. Apilamiento del oleaje:

Lizano (2007, 51) menciona que el oleaje promedio en el Pacífico es de componente suroeste, lo que indica que la predominancia del oleaje remoto que llega a nuestras costas, proviene principalmente del Pacífico Sur de nuestro planeta.

Utilizando una altura significativa máxima de ola de 2.81 m y una altura significativa promedio de ola de 1.33 m (Lizano, 2007, 46), se obtienen las correspondientes alturas de apilamiento de oleaje para el caso de la Ciudad de Puntarenas. Siguiendo el criterio de Kamphuis (2000, 184):

$$H_{\max} = 1.8 * H_{1/3} = 2.81 * 1.8 = 5.05 \text{ m.}$$

De manera que el nivel de apilamiento de ola (Sorensen, 1978, 26) máximo posible para Puntarenas es de:

$$S_w = 0.15 * 5.05 \text{ m} = 0.75 \text{ cm}$$

Y utilizando la altura promedio:

$$S_w = 0.15 * 1.33 \text{ m} = 0.20 \text{ cm}$$

Los distintos niveles mareográficos de interés elaborados para crear escenarios según los resultados anteriores, se muestran en la tabla siguiente:

3. Mareas máximas:

A partir de los datos anteriores se puede definir que una marea máxima promedio, ronda el valor de 308,70 cm (promedio hecho con las predicciones de mareas entre el 2010 y el 2009), lo que equivaldría a 309 cm (Figura 3). Se sabe que en Puntarenas una marea astronómica mayor de 3 m, comienza a inundar regiones por el estero de la punta como el Cocal y Barrio El Carmen, como lo demuestra la Fig. 5 (región coloreada; el blanco significa no inundada). Según el software Tides & Currents for Windows (Lizano, 2006, 53), la mayor marea astronómica para Puntarenas es de 329 cm, que ocurre en promedio cada 4.65 años. Estos niveles generan inundaciones en las poblaciones cercanas al estero como el Cocal, Barrio del Carmen, Pochote entre otros lugares de la ciudad, como muestra la Fig. 3.

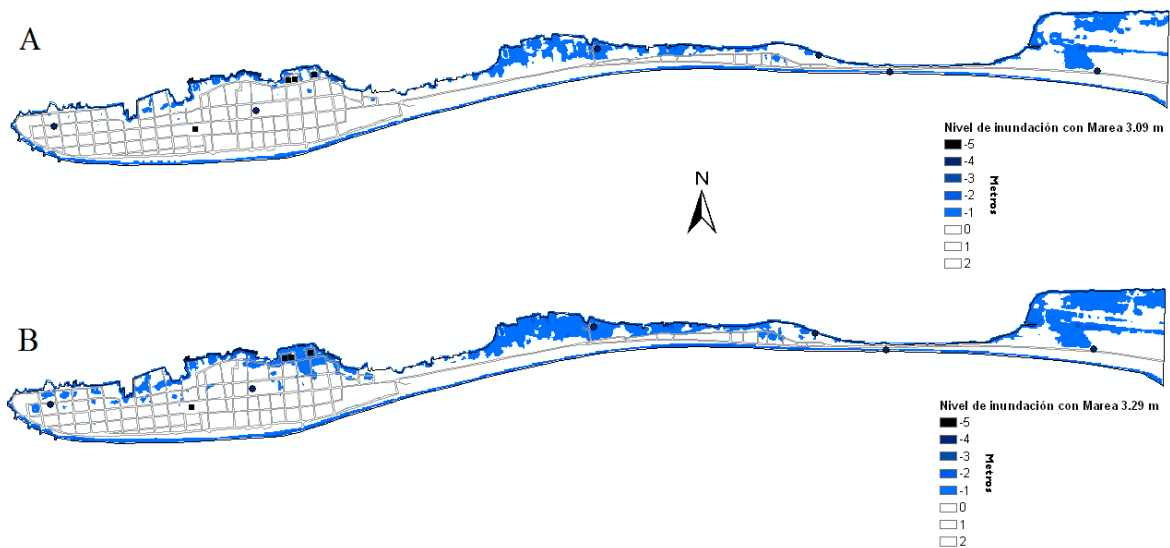


Figura 5. Nivel de inundación para la punta de Puntarenas, A: Marea astronómica máxima Promedio de 309 cm, y B: marea astronómica máxima de 329 cm.

Múltiples escenarios se podrían construir para Puntarenas a partir de los diferentes niveles de marea astronómica: nivel "0", nivel promedio (140 cm), etc., con de las distintas combinaciones de las componentes mareográficas estudiadas. Mas sin embargo, algunos no tendrían alturas importantes que alcancen niveles de inundación en la punta. Lo importante entonces, son aquellos niveles máximos superpuestos, que si tienen potencial de inundación en la punta. Las combinaciones seleccionadas de estos niveles se resumen en la Tabla 2 siguiente:

Tabla 2
Niveles mareográficos utilizados como posibles escenarios máximos.

No. escenario	Característica de escenario	Altura (centímetros)
1	Marea Astronómica de Inundación (MAI) en Puntarenas, o escenario 2 + un fenómeno de La Niña	309
2	Marea Astronómica Máxima (MAM), o escenario no. 1 + Apilamiento Promedio de Oleaje (APO)	329
3	Escenario 1 + un fenómeno de El Niño intenso, (ENI) + un APO, o escenario 2 + un fenómeno de El Niño Intenso (ENI), o un escenario 2 + escenario 1 por Cambio Climático (CC) (Tabla 1)	359
4	Escenario 3 + un APO, o escenario 1 + un Apilamiento Máximo de Oleaje (AMO)	384
5	Escenario 2 + AMO, o un escenario 1 + escenario 2 de CC (Tabla 1) O la escenario 4.04	404
6	Escenario 5 + un escenario 2 de CC, o un escenario 1 con un escenario 4 de CC (Tabla 1)	504
7	Un escenario 2 + un ENI + AMO + escenario 4 de CC (Tabla 1)	634

Durante el fenómeno de El Niño de 1987-1988 el nivel del mar aproximadamente aumentó unos 30 cm por expansión térmica (Lizano, 1997, 174; 2001, 175). Durante setiembre del 2009 se tenía una marea astronómica extraordinaria de 323 cm, lo que sería aproximadamente un escenario no. 3 de la Tabla 2. La Fig. 6, muestra los niveles de inundación en la punta de Puntarenas que pudieron

generarse en esta ocasión. Las observaciones que se hicieran en esa ocasión en la punta de Puntarenas, coinciden con los señalados en la Fig. 6.

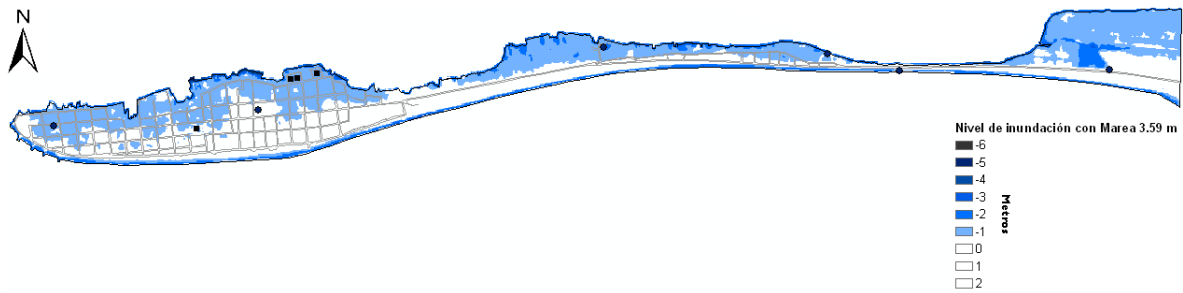
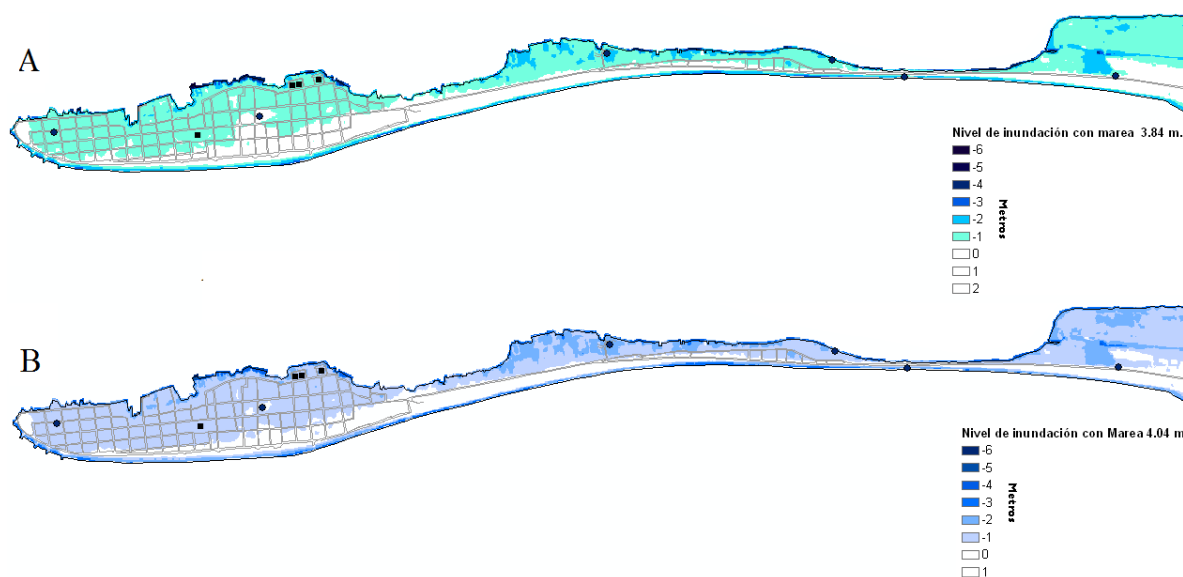


Figura 6. Niveles de inundación en Puntarenas según escenario 3 (359 cm).

En un escenario 3, con un nivel del mar de 359 cm, como muestra la figura anterior, el agua inunda a la punta, como siempre por el estero, y llega al menos hasta el estadio Lito Pérez. En la región del Cocal el agua llega prácticamente a la calle principal.

El resto de escenarios propuestos en la Tabla 2, se muestran en las Figs. 7. Es evidente el como con el aumento del nivel del mar según esos escenarios, mayor inundación se produce en la punta de Puntarenas. En el caso extremo de la Fig. 7-D, en una marea extraordinaria máxima, con un fenómeno de El Niño intenso, un oleaje fuerte y en los próximos 100 años, toda la punta de Puntarenas podría ser inundada.



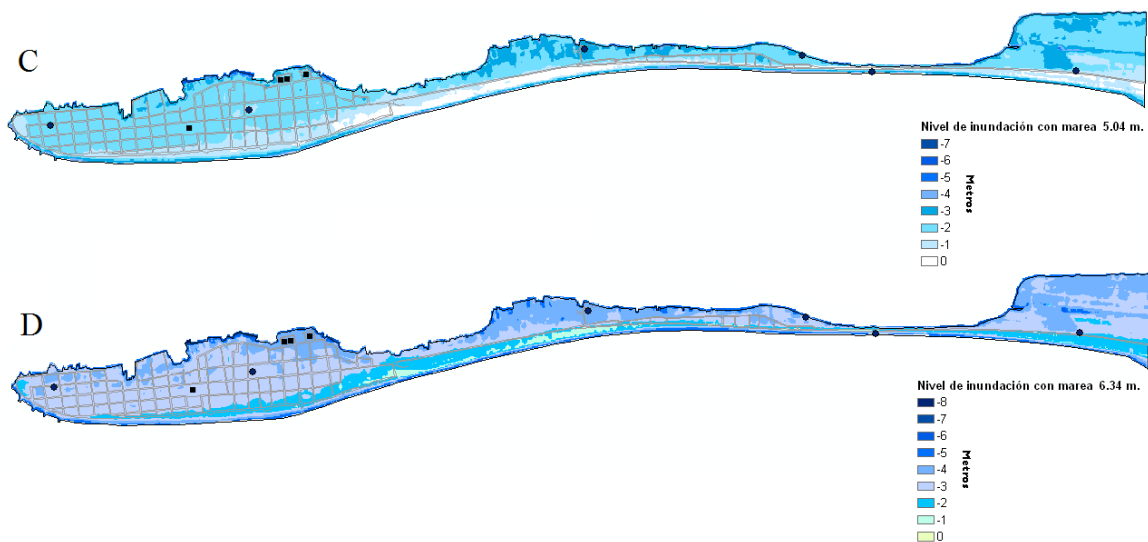


Figura 7. Niveles de inundación en Puntarenas según escenario 4, 5, 6 y 7 (Tabla 2).

Discusión

El ascenso del nivel del mar por cambio climático supondrá un problema en el corto plazo (30 años) (IPCC, 2007, 21). Lo anterior queda reflejado en las estimaciones que muestran un ascenso significativo del nivel del mar, cuya causa directa está asociada con el aumento de la temperatura global, lo cual ha originado y está causando un derretimiento acelerado de los glaciares en muchas partes del mundo, con el consecuente problema de un mayor aporte de agua en todos los océanos (Lizano, 2011). Lo anterior ha generado un aumento creciente del nivel del mar y se mantendrá hacia posteriores años; como se ha valorado en este documento. En consecuencia se debe ir pensando en la forma de mitigar, para prevenir eventos mayores.

Una peculiaridad obtenida a partir de los fenómenos modelados, es que la inundación en la aguja costera, comienza a darse en la parte del estero donde están las menores profundidades, lo cual provoca que durante un ascenso del nivel de marea paulatino o extraordinario, las inundaciones se manifiesten con mayor frecuencia hacia los asentamientos que colindan con el estero. Como lo muestra la Fig. 4, el borde sur de Puntarenas, donde está la línea del tren, es la mayor altura de esta flecha de arena desde Chacarita.

Otro punto por valorar se da a causa de los problemas que acarreará el máximo aumento del nivel del mar (150 cm - 200 cm), pues bajo estos escenarios el incremento no implicará un tipo de marea alta y marea baja. El ascenso del nivel es algo sumatorio y prácticamente hablando, a partir del año 2090 los sectores circundantes al estero estarán inundados. Posterior al año 2100 es muy factible que los sectores donde tradicionalmente se ha inundado por alguna marea máxima u otro

evento poco tradicional, estén completamente inundados bajo una capa de agua que oscilará entre los 40 cm a 100 cm. Esas zonas son los barrios cercanos al estero en los poblados del Carmen, Pochote, Cocal, sector del Mercado Municipal y las áreas aledañas a los Bancos de Costa Rica y Nacional, principalmente.

El aporte en el nivel de marea por el fenómeno de El Niño (ENOS), no es significativo si no hubiera mareas altas, pero como para la ciudad de Puntarenas sí hay mareas altas todos los días, puede ser una variable por tomar con alguna frecuencia. Lo anterior se debe en primer término a la intensidad del fenómeno ENOS, pues como se ha reiterado, ese aumento podría ser significativo en cuanto a los niveles de inundación, si el fenómeno ocurre de manera conjunta con las otras variables.

Otro de los fenómenos que puede conllevar algunos tipos de problemas para las poblaciones, sería el causado por las tormentas lejanas y/o locales, que provocan el apilamiento del oleaje, pues al sumarse con un período de marea alta podría incidir en algunas inundaciones en partes importantes cercanas a la playa de la punta de Puntarenas. Aunque este componente también podría producir un nivel de inundación por la parte del estero, en realidad es solo importante al frente de la punta, por donde justamente rompen las olas. Bajo crecientes aumentos del nivel del mar, el oleaje se constituye en el factor más dinámico y una fuente de energía suficiente para causar impacto costero en la punta, hasta el grado de socavar en algún momento algunos sectores de esta flecha de arena.

Mención aparte merecen las mareas extraordinarias (máximas), como fenómeno astronómico importante que acontece aproximadamente en un período de recurrencia de cada 4.65 años. Es de esperar durante este tipo de fenómenos y de acuerdo con el nivel de marea, una inundación importante, que se podría situar en un rango superior a 3 metros. Esto quiere decir que la flecha costera comienza a inundarse de manera progresiva, a partir de los 3 metros y en relación con el nivel de marea, la inundación puede ser menos o más significativa. Un nivel de marea de 309 cm, ya inunda parte de Puntarenas. Esto ocurrió, por ejemplo en un año de mareas bajas como el 2004 (Lizano, 2011), unas 3 veces. En un año de mareas máximas como el 2002, esto ocurrió unas 23 veces al año. Un suceso reciente fue observado durante los años 1987-88 cuando se dio la unión de dos variables: un fenómeno de El Niño y una marea máxima (Lizano, 1997, 172, 175; 2001, 175; Lizano, 2011), lo cual se puede comparar perfectamente, con los resultados obtenidos en este estudio, y que simuló fielmente lo que se observó en ese evento. El 11 de setiembre del 2010 también se produjo una marea astronómica máxima de 329 cm. Sin embargo, se presentó en evento intenso del fenómeno de La Niña. Comparando el escenario que debió darse y las observaciones que se hicieron de los niveles del mar en Puntarenas para esa ocasión, se

considera que el nivel disminuyó en unos 20 cm, de manera que el escenario fue aproximadamente el escenario 1 de la Tabla 2 y mostrado en la Fig. 3-A.

Por el grado de importancia que tiene este tema, en cercano, mediano y largo plazo, hacia la población de la ciudad de Puntarenas, las autoridades respectivas deberían invertir en equipo tecnológico que permita cuantificar estos escenarios de manera más precisa. Para ello se recomienda instalar un mareógrafo que permita medir y obtener patrones sobre el nivel del mar, con el fin de tener un registro continuo de esas variaciones, lo cual puede ayudar a prevenir y mitigar posibles amenazas, así como otros que puedan ocurrir y que no se encuentran citados en este documento.

Las máximas elevaciones de la ciudad de Puntarenas, se encuentran sobre la línea férrea (Fig. 4), esto refleja el porqué se dice que toda esa zona sobre la que se asienta esa línea, es el rompeolas natural, pues es lo que ha mantenido y mantiene a la ciudad salvaguardada de los fenómenos vistos de manera individual o colectiva (Lizano, 2011).

El panorama se puede tornar difícil si los fenómenos se llegan a mezclar o darse todos juntos para un día como tal, pues implicarían aumentos importantes en el nivel del mar, al punto que podrían ocasionar inundaciones a lo largo de toda la aguja costera, y eventualmente, dar la separación o fraccionamiento de la aguja por sectores a causa de la sumatoria de fenómenos. A partir de lo anterior, las autoridades correspondientes deberían tener algún plan de acción o de emergencia para eventos que produzcan impacto costero, o construir la infraestructura necesaria para proteger la punta, y comenzar a trabajar en la posible reubicación de toda la población.

Es meritorio aclarar que en este estudio se han tratado los distintos niveles mareográficos como una superposición de niveles pasivos simplemente, sin tomar en cuenta que la dinámica de ciertas componentes, como las corrientes y el oleaje, tienen la capacidad de modificar la geomorfología costera en un corto tiempo ante eventos extraordinarios. Esto puede desequilibrar el sistema para siempre antes de lo imaginable si no se toman las medidas respectivas pronto, pues como lo señala Lizano (2011), ya el aumento del nivel del mar es una realidad en nuestras costas.

Un componente que no se incluyó en este estudio, es el aumento del nivel del mar por precipitación. Los residentes de Puntarenas señalan que cuando llueve, el nivel de inundación es mayor.

El otro componente que no se incluyó en este estudio, es el aumento del nivel del mar por un tsunami. El tsunami reciente de Japón (10 de marzo del 2011) produjo un aumento del nivel del mar en Quepos de 18 cm según datos del Centro de Alerta de Maremotos del Pacífico (<http://ptwc.weather.gov>). Hay simulaciones de Ortíz et al. (2001) de tsunamis históricos con ondas

de 3.5 m de altura en Puntarenas. De manera que los escenarios incluidos aquí, también sirven para sobreponer este componente a las condiciones de la marea existente en el momento de arribo de un tsunami, y constituye una herramienta válida para que las autoridades respectivas avalúen las condiciones del nivel del mar ante un evento de este tipo.

Agradecimiento

Este artículo es parte de la tesis de Maestría realizada con el Programa de Posgrado en Maestría en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, a cargo de las Escuelas de Ciencias Geográficas de la UNA y Escuela de Geografía de la UCR. A la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por el apoyo a esta investigación a través del Proyecto No. 808-A9-070 (VI-8453-2008).

Bibliografía

Bedia, J. 2004. Creación de un modelo digital de elevación para la predicción de futuros escenarios de inundación en el estuario del Río Loughor (Sur de Gales). *Proyecto fin de carrera Bachelor (Honours) Environmental Science Wolverhampton University, School of Applied Sciences (U.K.)* <<http://www.joaquinbedia.es/MDT.htm>> (actualizado julio 2004, consultado 6 de abril del 2009).

Diaz, J. 1999. Determinación de las zonas de riesgo ante un ascenso del nivel del mar: Punta Morales-Tárcoles (Informe Final). MINAE-IMN. San José, Costa Rica, 59.

IPCC. 2001. Cambio climático 2001: Informe de síntesis, Resúmenes de los Grupos de Trabajo. IPCC, Ginebra, Suiza, 86.

IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 114.

Kamphuis, J.W. 2000. Introduction to Coastal Engineering and Management. Advanced Series on Ocean Engineering- Volume 16. World Scientific. New Jersey, 437.

Lambrechts, C. 2007. *Global Outlook for Ice & Snow*. Heather Main (lead), UNEP/GRID-Arendal. Noruega, 235.

Lizano, O.G. 1997. Las Mareas Extraordinarias de 1997 en la Costa del Pacífico de Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanogr.*, 4 (2), 169-179.

Lizano, O.G. & Salas, S. 2001. Variaciones geomorfológicas en los últimos 50 años de la Isla Damas, Quepos, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 2, 171-177.

Lizano, O.G. 2006. Algunas Características de las Mareas en la Costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*, 51-64.

Lizano, O.G. 2007. Climatología del viento y el oleaje frente a las costas de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*. Volumen 25 (1 y 2), 43-56

Lizano, O.G. 2010. Batimetría, modelo de elevación digital y sus aplicaciones. *Revista AZIMUTH 10 DIGITAL*, 18-21.

Lizano, O.G. 2011. La dinámica litoral y los procesos de erosión en las playas de Costa Rica. A someter a una revista.

Ortiz, M, Fernández-Arce, M & Rojas, W. 2001. Análisis de riesgo de inundación por tsunamis en Puntarenas, Costa Rica. *Geos.*, 21(2), 108-113.

Otto-Bliesner, J., Marshal, T.S., Overpeck, I.J. & Miller, G.H. 2006. *Simulating Arctic Climate Warmth and Icefield Retreat in the Last Interglaciation. Science*. 311, 1751-1753.

Van der Meulen, F; Witter, J.V. Y S.M Marens. 1991. The use of a GIS in Assessing the Impacts of Sea-Level Rise on Nature Conservation along the Dutch Coast. *Landscape Ecology* 6 (1/2), 105-113