

Torres Rodríguez, V., A. Márquez García, A. Bolongaro Crevenna, J. Chavarria Hernández, G. Expósito Díaz y E. Márquez García, 2010. Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático, p. 325-344. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático

*V. Torres Rodríguez, A. Márquez García, A. Bolongaro Crevenna,
J. Chavarria Hernández, G. Expósito Díaz y E. Márquez García*

RESUMEN

Se realizaron estudios para conocer el desplazamiento de la línea de costa, la determinación de las tasas de erosión y el planteamiento de escenarios para los años 2030, 2050 y 2100 del litoral del estado de Campeche. La zona de estudio comprendió desde la Punta Disciplina hasta la desembocadura del río Champotón. El periodo de estudio comprendió del año 1974 al 2008. Se determinó que la mayor tasa de erosión ocurre punta La Disciplina, con un valor de 17.1 m/año, seguida de Sabancuy con 6.8 m/año. Los sitios con menor tasa de erosión fueron Isla Aguada con 0.2 m/año, Playa Norte con 0.3 m/año y Champotón con 2.4 m/año. Se modelaron las nuevas configuraciones de las líneas de costa para los años 2030, 2050 y 2100, utilizando el modelo AIMES-B2MES del IPCC. Se determinó que se tengan o no políticas para la reducción de emisiones a la atmósfera, el nivel del mar continuará incrementándose en valores de 8 cm para el año 2030, 13.5 cm para 2050, y 33 cm en el 2100, tratándose de un escenario optimista.

Con base en lo anterior se concluyó que la zona más vulnerable es la península de Atasta en donde en un lapso de 20 se años presentarán las primeras inundaciones, (actualmente ya están ocurriendo). Le sigue el borde interior de la laguna de Términos comprendiendo todos los cuerpos lagunares mayores como la laguna de Pom y otras, los cuales quedarán cubiertos por agua hacia el 2050. Por último, la zona de la Isla del Carmen. Isla Aguada y Sabancuy presentarán inundaciones cerca del año 2100.

Palabras claves: erosión costera, vulnerabilidad de costas, elevación del nivel del mar en México

INTRODUCCIÓN

La zona litoral de las regiones costeras es la zona donde se manifiestan los mayores efectos de los procesos marinos. Efectos como el cambio de la morfología de costas, los procesos de erosión y de crecimiento de playas son bastante notorios en diversas escalas geográficas y de tiempo.

La zonal litoral del Golfo de México en su parte Sur ha sido estudiada por varios autores desde diferentes puntos de vista y en diversas épocas, por ejemplo: la sedimentología de las playas de Campeche (Carranza-Edwards, 2001), el retroceso de la línea de costa en el río San Pedro y San Pablo (Ortiz-Pérez, 1992) y cambios morfológicos de la línea de costa por efectos del huracán Roxana.

Varios factores influyen en la conformación de los procesos de dinámica costera. Factores geológicos como el tipo de litología costera, sedimentológicos como los tipos y clasificación de los materiales granulares de las playas, biológicos como la presencia de ecosistemas de manglares, pastos marinos, arrecifes, etc., oceánicos como la distribución de corrientes y naturaleza del oleaje, climáticos como la presencia de eventos hidrometeorológicos extremos y efectos del cambio climático, y antrópicos como la construcción de diversos tipos de obras e intervención humana en la zona costera.

Los cambios morfológicos a lo largo de los litorales se pueden apreciar por la acumulación de arenas formando playas extensas de pendientes suaves, acompañadas de dunas, tómbolos, lengüetas, barreras, o bien, por los procesos de erosión o remoción de las arenas exponiendo sustratos rocosos, formando ca-

vernas, farallones, puntas y playas angostas de pendientes fuertes la mayoría de las veces, con materiales gruesos de arena y gravas.

Los procesos que gobiernan la dinámica litoral como la variación de aporte de sedimentos y los cambios de energía originados por el oleaje y las corrientes marinas causan diferencias en el ancho, pendiente y forma de las playas, los cuales varían durante las diferentes épocas del año, siendo en las épocas de lluvias y nortes cuando los cambios son más intensos, principalmente por la frecuencia e intensidad de los oleajes. Actualmente, el papel de la actividad antropogénica también ha contribuido a modificar la zona litoral, desde el momento que se construyen vías de comunicación, infraestructura energética y petrolera, hoteles, casas, restaurantes, etc. en su parte continental (supraplaya), hasta la construcción de muelles, espigones, escolleras, rompeolas en la parte marina (infraplaya) alterando el transporte litoral y la morfología de la playa.

El marcado dinamismo que caracteriza a los espacios costeros como medios de transición, encuentra quizás su máxima expresión en las playas. Estas formaciones bajas y arenosas, que ponen en relación la zona continental con el medio marino, modifican constantemente su morfología adaptándola a las condiciones hidrodinámicas y de energía con que se ven afectadas (Suárez, 1991). Este fenómeno puede plasmarse en una veloz modificación de la línea de costa y de las formaciones arenosas intramareales, con cambios que, en situaciones favorables, derivan en direcciones claramente dominantes y con dimensiones del orden de

las centenas a miles de metros, en periodos de tiempo relativamente cortos que llegan a solo unas decenas de años.

Si bien existe la percepción de que han ocurrido cambios topográficos importantes en la zona del litoral de Campeche, la cuantificación de los mismos es tarea que solo recientemente se ha empezado a realizar. Aunque en trabajos anteriores se expresan algunas estimaciones de procesos de erosión y acreción en playas de Campeche, con el presente estudio se buscó cuantificar lo más exactamente posible la magnitud de los cambios en la morfología costera, por medio de un estudio integral de tres años de monitoreo que conjunta los resultados de análisis de imágenes satelitales, fotografías aéreas, levantamientos topográficos y batimétricos, análisis granulométricos, descargas fluviales, meteorología y clima marítimo, todo ello soportado por una modelación que permita conocer mejor los procesos que actúan en la playa así como identificar áreas vulnerables y de riesgo a la erosión.

Recientemente se han advertido y confirmado los efectos del cambio climático global y que éstos se derivan de las actividades humanas. Los modelos más recientes presentados durante la Reunión del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) celebrado en París en Febrero de 2007 muestran que el incremento esperado de la temperatura promedio a finales del siglo XXI, con los diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, será de 1.8°C a 4°C. (Considerando la incertidumbre de dichos escenarios, ésta puede variar de 1.1°C a 6.4°C). Por su parte el aumento esperado del nivel del mar, según diferentes escenarios, para fines del siglo XXI podría ser de 18 a 59 cm. Como consecuencia

de lo anterior, los ciclones tropicales y huracanes serán más intensos, con mayor cantidad de lluvia y velocidad del viento. Basados en modelos regionales del clima es muy probable que las ondas de calor sean más frecuentes.

Estudios realizados con la metodología ANIDE (2005) para conocer la dinámica costera en el litoral norte de la zona de ciudad del Carmen (PEP-UAEM, 2008) han confirmado los resultados emitidos del IPCC. Las estadísticas de incremento del nivel del mar muestran un aumento de éste de 12 cm durante los últimos 30 años, lo que se refleja en la intensificación de los procesos erosivos en la zona litoral.

Si se considera que la topografía de la zona litoral del Golfo de México es prácticamente plana, cualquier cambio, por pequeño que sea, en el nivel del mar, involucra una amplia extensión al interior de la zona continental, haciendo vulnerable a todas estas áreas ante los eventos climáticos, hidrológicos y marinos prevaletentes.

La erosión costera ha provocado la reducción de playas, el avance de la línea de costa hacia el continente, la pérdida de playas, la pérdida de ecosistemas (manglares), la destrucción de playas de anidación de tortugas marinas, la intrusión salina, y cambios en la batimetría y morfología costera, entre otros problemas, provocando un impacto en obras civiles como carreteras, líneas eléctricas, casas habitación, e infraestructura petrolera.

Con el fin de detener los procesos de erosión costera se han construido en el área de estudio una serie de obras como son espigones, diques, rompeolas (utilizando principalmente tetrápodos), bloques de piedras y de concreto, tubos geotextiles, etc., Estas obras además de proteger las playas y las obras ci-

viles, han tenido diferentes grados de éxito, también la mayoría de las veces han causado efectos negativos al propiciar un incremento de la erosión.

La pertinencia del estudio se acrecentó con la intensificación inusual de fenómenos hidrometeorológicos como las tormentas tropicales y la formación de huracanes en el Caribe y el Golfo de México, que inciden en la zona del litoral de Campeche. Basta mencionar que solo en el año 2005 se presentaron tres huracanes consecutivos en el lapso de dos meses: Katrina (magnitud 5), Stan (magnitud 2) y Wilma (magnitud 4) que causaron fuertes cambios en la morfología y composición de las playas y costas de las zonas que impactaron.

El presente estudio comprende los principales resultados conocidos del proceso de erosión de la zona costera del estado de Campeche como una contribución a la evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debidos al cambio climático y a fenómenos hidrometeorológicos extremos.

El trabajo se realizó en la costa de los municipios de El Carmen y Champotón, estado de Campeche, concretamente en la zona comprendida entre punta La Disciplina y la desembocadura del río Champotón, la cual comprende un aproximado de 240 kilómetros de longitud (figura 1).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Conocer las tasas de erosión del litoral del estado de Campeche y determinar la vulnerabilidad actual y futura de sus costas ante eventos hidrometeorológicos extremos debidos a la variabilidad y el cambio climático

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer el entorno del cambio climático global y sus efectos en la variación del nivel medio del mar.
- Calcular las tasas de erosión/acreción de costas del estado de Campeche.
- Realizar una prospectiva de las líneas de costa en escenarios de elevación del nivel del mar de 40, 60 y 100 cm.
- Conocer la vulnerabilidad de las costas del estado de Campeche bajo la influencia de eventos hidrometeorológicos extremos.
- Proponer una estrategia de reducción de la vulnerabilidad para las costas del estado de Campeche ante eventos hidrometeorológicos extremos debidos a la variabilidad y el cambio climático.

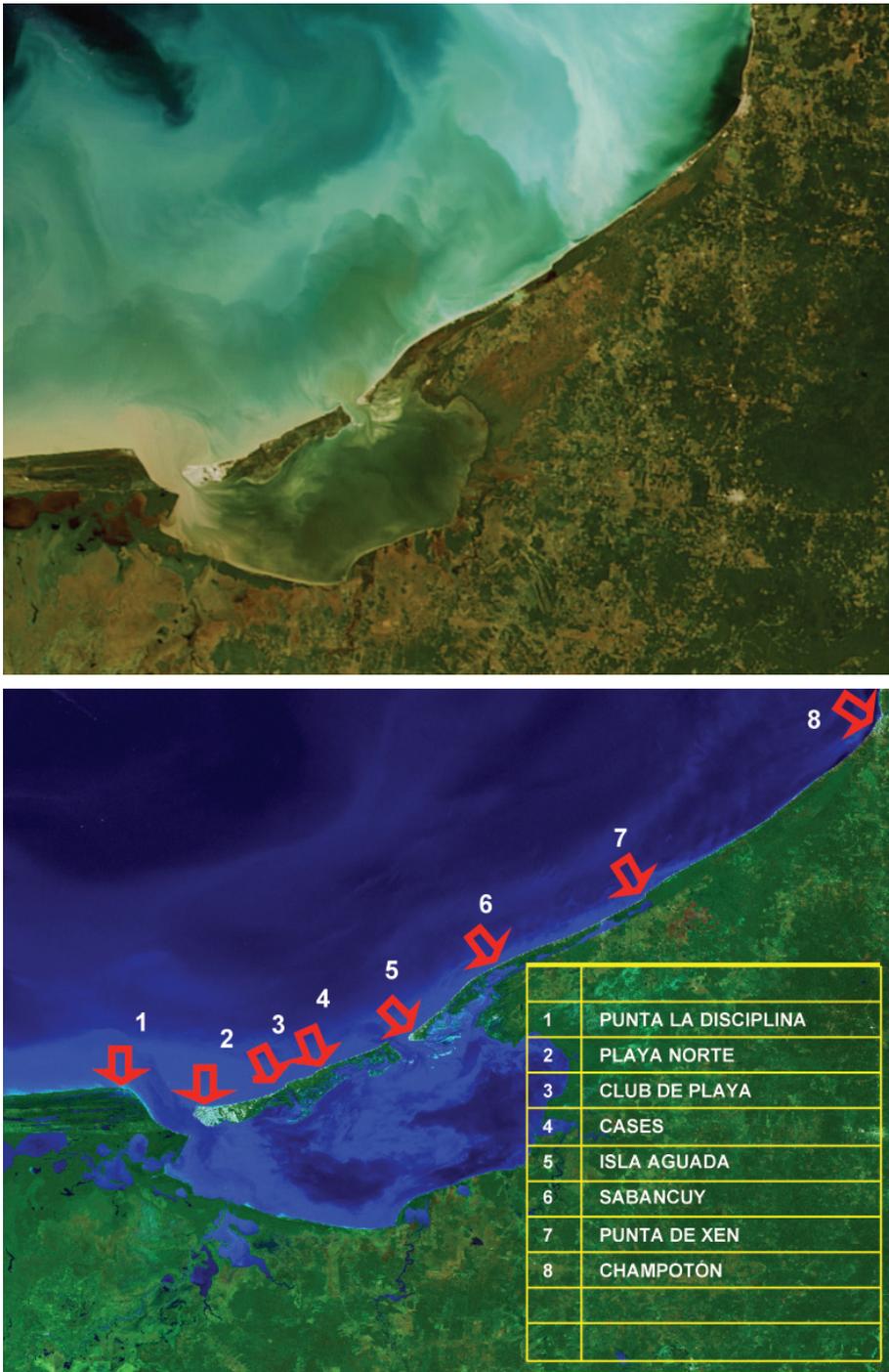


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Arriba: imagen del satélite Terra del 14 de Diciembre de 2008 (Fuente NASA). Abajo, localidades de interés, citadas en este estudio.

METODOLOGÍA

MATERIALES

La reconstrucción histórica de la línea de costa se realizó para el periodo 1974 a 2008 a una escala 1:50 000. Se utilizaron documentos cartográficos de diversa índole: fotografías aéreas, mapas topográficos del INEGI en formato vectorial, ortofotografías del INEGI en formato raster e imágenes de los satélites Landsat 3 (MSS), Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM) e Ikonos, todas ellas en formato raster. En la tabla 1 se muestra un listado del material utilizado.

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA

El estudio comprende la reconstrucción histórica de la línea de costa del periodo 1974-2008, la determinación del desplazamiento de la línea de costa, el cálculo de la tasa de erosión para ese periodo, y la modelación de escenarios de elevación del nivel mar de acuerdo a modelos del IPCC. Las metodologías empleadas fueron las siguientes:

Georreferenciación

Definición de un marco geográfico de referencia común a partir del cual podrán relacionarse datos geográficos, principalmente topográficos de diversas temporadas. En este punto se mencionan la utilización de herramientas informáticas como los sistemas de información geográfica (SIG)¹ y de procesamiento digital de imágenes (PDI)², las cuales facilitan el tratamiento informático de documentos en diversos formatos: raster, vectorial y bases de datos, con facilidades para homogenizar los sistemas de proyección cartográfica.

En el presente caso el SIG se empleó para integrar información digital (raster y vectorial) y convertir formatos de proyecciones en uno común WGS84 (Sistema Geodésico Mundial), mientras que el PDI se empleó para georreferenciar imágenes a partir de puntos de campo (puntos de control) conocidos, así como para realizar mejoramientos digitales para realzar la interfase agua-continente y visualización de la vegetación, parámetros ambos muy útiles para configurar la línea de costa.

Tabla 1. Descripción de la información recopilada.

Material	Tamaño del píxel	Formato	Año	Fuente	Tipo de datos
Cartografía del área	NA	Digital	1995 y 2001	INEGI	Vectorial
Imágenes de Satélite Landsat MSS, TM y ETM; Ikonos	MSS: 57 m TM: 28.5 m, ETM: 14.25 m Ikonos: 1 m	Digital	1974, 1986, 1996, 2008	Diversas	Imagen raster
Ortofotografías	1.5 m	Digital	1994, 1995 y 2001	INEGI	Imagen Raster

¹ Se utilizó el software comercial ARC-GIS, versión 9.2.

² Se utilizó el software comercial Ermapper, versión 7.2.

Todo el material cartográfico y digital utilizado se convirtió a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) para la Zona 15 sobre un esferoide definido por WGS84.

De acuerdo a las normativas del INEGI para la creación de ortofotografías, las utilizadas en el presente estudio tienen una escala 1:20 000 y una resolución de 1.5 metros. Para su elaboración el INEGI empleó técnicas de restitución ortofotogramétrica, con puntos de control de campo durante el vuelo y el empleo de vértices geodésicos de primer orden. Por lo anterior, la cobertura de ortofotografías de INEGI se tomó como marco de referencia geográfico, a partir del cual se georreferenció todo el material cartográfico restante: imágenes de satélite, otras fotografías aéreas y mapas impresos. En la figura 2 se muestra un mosaico de ortofotos INEGI de la zona de trabajo.

En caso de encontrar algún error geodésico, en el proceso de la georreferenciación de todo

el material con respecto al citado del INEGI, tales errores no afectan la detección de los cambios que se presentan en la zona costera, ya que se trata de una operación de diferencia entre áreas. En todo caso se tendría un error sistemático de origen, que se elimina automáticamente toda vez que se están estudiando las diferencias de área en tiempos antes y después de la cobertura del INEGI tomada como base.

Las correcciones geométricas incluidas dentro del procesamiento fueron aplicadas basándose en la ortofotografía digital del INEGI antes descrita, con el objetivo de relacionar las filas y columnas de la matriz original de la imagen con coordenadas geodésicas, logrando así que una imagen digital tenga validez cartográfica (Pinilla, 1995). El método utilizado para la georreferenciación de las imágenes fue el presentado en el módulo *georeferencing* de ArcMap (ArcGis 9.2). En este método se utiliza la rectificación de

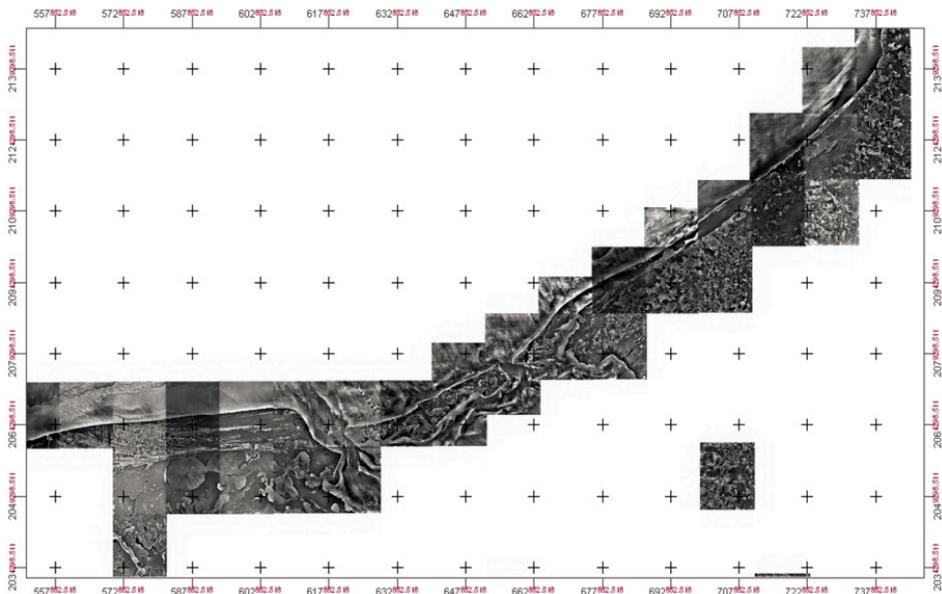


Figura 2. Mosaico ortofotográfico de las costas de Campeche del periodo 1994-2002.

imagen contra imagen (*Image to image rectification*), el cual se basa en la deconvolución cúbica para rectificar una imagen a partir de otra usando puntos de control (GCP). El valor del error medio cuadrático (RMS) se mantuvo entre los límites 0.5 y 1.2, lo que significa un error menor de un píxel.

Líneas de costa

A partir las imágenes georreferenciadas se obtuvieron las líneas de costa por interpretación directa y vectorización en pantalla. No se emplearon métodos automáticos de detección de bordes dada la precisión que se deseaba obtener y la posible extracción de objetos geomorfológicos no deseables de las imágenes. Se midió la longitud de la costa resultante siguiendo todos sus contornos.

El trabajo de delineamiento de la línea de costa se realizó considerando la línea intermaral interpretada de cada una de las imágenes satelitales y de las ortofotografías. Debido a la variedad y calidad de las resoluciones espaciales de cada imagen utilizada, la precisión cartográfica de cada tipo de imagen varía. En la tabla 2 se muestran las escalas prácticas de trabajo de cada tipo de imagen.

Cálculos de tasas de erosión

La estimación de la tasa de erosión se realizó mediante el método de cálculo de áreas de referencia. Para cada imagen de un año determinado se marcó un polígono de referencia y se calcularon el área continental (m²) y la longitud de la línea de costa (m) (figura 3). Con fines de homogenización del análisis, todos los polígonos tuvieron un ancho aproximado de 10 km.

Para conocer la tasa de erosión costera (TEC) se calculó el desplazamiento de la línea de costa (DLC) durante los periodos de observación de dos imágenes digitales de dos fechas diferentes (Año 1 y Año 2, i.e 1974, 1986). Se utilizaron las siguientes ecuaciones (ANIDE, 2005):

$$DLC (m) = \frac{(\text{Área Cont}_2 - \text{Área Cont}_1)}{\text{Long. Costa}_2} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$TEC (m/año) = \frac{DLC}{\text{Año}_2 - \text{Año}_1} \quad (\text{Ec. 2})$$

La utilización del método de áreas de referencia nos proporciona el valor promedio de desplazamiento de la línea de costa de toda la longitud de costa comprendida dentro del po-

Tabla 2. Escalas prácticas de aplicación para diversos tipos de imágenes.

Tipo de Sensor	Escala de aplicación
MSS	100 000
TM3, TM5	50 000
TM7, ASTER	25 000
Ortofotografía 1:20,000	5 000
QUICKBIRD E IKONOS	5 000

ETM: Enhanced Thematic Mapper, MSS: Multispectral Sensor Landsat., TM: Mapeador temático.

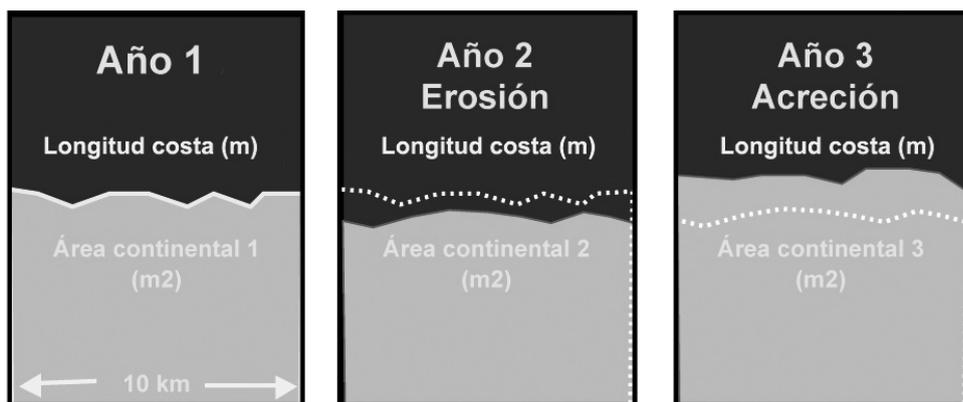


Figura 3. Áreas de referencia para el cálculo de tasas de erosión (ANIDE, 2005).

lígono. Lo anterior permite cuantificar regionalmente el fenómeno de erosión/acreción eliminando valores puntuales. La secuencia de operaciones entre áreas da un resultado con signo menos para la erosión, mismo que se empleará para denotar la presencia de este fenómeno; el caso contrario, la acreción, tendrá signo positivo.

Cambio climático y elevación del nivel del mar

La elevación del nivel del mar es el impacto antropogénico más importante asociado con el cambio climático. Para el presente trabajo se utilizó el modelo MAGICC 5.3 (*Model for assessment of greenhouse-gas induced climate change*) elaborado por The National Center for Atmospheric Research (NCAR) (Wigley, 2009) el cual es un conjunto de modelos acoplados que contiene los efectos de ciclo de gases, clima y fusión de hielo. El modelo permite determinar las consecuencias en la temperatura media global y en el nivel medio del mar debidas a las emisiones de gases de efecto invernadero y del SO_2 . El modelo permite comparar las implicaciones de escena-

rios donde se aplican o no políticas de control de emisiones (Wigley@ucar.edu).

Se realizaron simulaciones para obtener valores de temperatura y nivel medio del mar en escenarios A1-B2. El escenario A1 considera un mundo futuro con rápido crecimiento económico, con una población global cuyo pico se encuentra a la mitad del siglo XXI y declina a partir de ahí; se caracteriza por una rápida introducción de nuevas y más eficientes tecnologías. El escenario B2 considera un mundo con énfasis en las soluciones locales a la sustentabilidad económica, social y ambiental, con continuo incremento de la población y un desarrollo económico intermedio. (IPCC, 2001)

En el programa MAGICC se emplearon los escenarios A1B-A1M como escenario de referencia, y el B2-MES como escenario de políticas aplicadas. El periodo de modelación fue 1990-2100. Los resultados de este escenario se compararon contra las mediciones históricas de nivel del mar de la estación El Carmen (Zavala, 2009), de la cual se tienen 34 años de registros corregidos (1956-1990).

Por otra parte, se modeló la conformación de las costas de Campeche para escenarios de elevación del nivel del mar de 40, 60 y 100 centímetros. Como nivel cero de referencia se tomó el nivel del mar de la cartografía del INEGI y se interpolaron las curvas de nivel de las elevaciones 40, 60 y 100 cm utilizando como datos conocidos los generados por el modelo de elevación del nivel del mar propuesto por Weiss y Overpeck (en preparación) publicados por la Universidad de Arizona. El modelo Weiss y Overpack (*op. cit.*) fue elaborado a partir del reprocesamiento de los datos de radar obtenidos durante la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, NASA) realizada a bordo del transbordador Endeavour en el año 2000. Dichos autores realizaron

correcciones de la respuesta de radar al agua, delinearon las líneas de costa y cuerpos de agua y afinaron el control topográfico. Como resultado obtuvieron modelos de elevación del nivel del mar para 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 14 metros que interpretaron como los escenarios de inundación para esas mismas cotas, ya que se trata de terrenos colindantes con el mar con continuidad topográfica entre ellos. A partir de este modelo, interpolamos por el método del inverso del cuadrado de la distancia para obtener las cotas correspondientes a 40, 60 y 100 cm. También se ubicaron algunos vértices geodésicos del INEGI y bancos de nivel del propio proyecto para corregir las elevaciones del terreno y producir así una interpolación más robusta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA LÍNEA DE COSTA

Prácticamente todo el litoral de Campeche se encuentra en proceso de erosión, incluyendo la zona de Playa Norte de la Isla del Carmen en la que aparentemente existen terrenos ganados al mar.

El proceso de erosión dominante se alterna con episodios de acreción en algunas playas. La dinámica costera obedece a los ciclos climáticos de la región. Así durante la temporada de secas generalmente se estabilizan las playas, para reiniciar el proceso de erosión durante las lluvias y nortes. Pero es precisamente en la temporada de nortes en la que ocurren los episodios de erosión más severos, con eventos de avance de la línea de costa de hasta 14 metros en un solo evento.

En la tabla 3 se muestra un resumen del avance de la línea de costa durante el periodo 1974 a 2008 determinado a partir de la vectorización de imágenes satelitales y de fotografías aéreas georreferenciadas. La numeración de los sitios es de oriente a poniente, por lo cual puede observarse que el fenómeno de erosión es más intenso en la zona poniente que en la oriente. El máximo avance neto de la línea de costa en el periodo mencionado fue de 581.9 metros en la localidad de Punta Disciplina (al poniente), mientras que el menor avance se ubicó en la Isla Aguada (al oriente) con solo 5.7 metros de avance de la línea de costa hacia el interior del continente.

Cabe mencionar que los valores descritos en la tabla 3 son valores netos calculados del periodo de años señalado en la misma tabla en una franja de aproximadamente 10 kilómetros.

Tabla 3. Desplazamiento neto de la línea de costa en localidades del estado de Campeche durante el periodo 1974 a 2008.

Id	Sitio	Periodo	Intervalo (años)	Desplazamiento Total (m)
1	Punta la Disciplina	1974-2008	34	-581.9
2	Playa Norte	1974-2005	31	-8.1
3	Club de playa	1974-2007	33	-171
4	CASES	1974-2007	33	-117.7
5	Isla Aguada	1974-2005	31	-5.7
6	Sabancuy	1974-2005	31	-211.2
7	Punata de Xen	1974-2002	28	-124.6
8	Champton	1974-2006	32	-77.2

tros.. No obstante se detectaron valores puntuales de desplazamiento de la línea de costa de hasta 735 metros en la Punta Disciplina para el periodo 1974-1986.

Localidades con erosión continua (Transgresión marina)

El proceso de erosión más importante detectado en la zona de estudio es el de erosión continua el cual es una constante a largo de toda la costa. En términos oceanográficos este proceso está asociado al fenómeno de “transgresión” caracterizado por el avance de la línea de costa hacia el continente generalmente ligado a la elevación del nivel del mar o a subsidencia del terreno

El proceso más drástico de erosión costera se ubica a todo lo largo de la denominada “península” de Atasta. La península está conformada por series de cordones deltáicos antiguos orientados en dirección este-oeste, a lo largo de los cuales se han desarrollado pequeños lomeríos intercalados con franjas de inundación. Con esta misma orientación se presentan los grandes cuerpos de agua interior como las lagunas de Pom y Atasta. Esta fisiografía configura al sitio como una gran

zona de humedales alargados en dirección este-oeste intercomunicados por pequeños cuerpos de agua norte-sur.

En la figura 4 se ilustra la fisiografía antes descrita, así como la localización de las líneas de costa obtenidas de imágenes satelitales del periodo 1974-2008. Puede observarse de esta reconstrucción que la franja erosionada se va ampliando progresivamente hacia el Este, siguiendo la morfología de antiguos cordones deltáicos que conforman el litoral actual.

La morfología de cordones intercalados con cuerpos de agua (también alargados) hace que el proceso de erosión ocurra en forma de grandes pulsaciones, esto es, que cuando la erosión costera destruye una de las franjas de terreno positivo formadas por tales cordones, se incorpora de un solo golpe la franja colindante de agua que estaba detrás del cordón al cuerpo de agua oceánico. Por esta razón el avance erosivo es prácticamente del doble.

De acuerdo con el estado de erosión de la península de Atasta en el año 2008, en su extremo oriente (Punta Disciplina) la vulnerabilidad del sitio es extrema, toda vez que la franja actual en proceso de erosión tiene menos de 290 metros con respecto a la laguna inmediata al sur, la cual al desaparecer generaría

la pérdida inmediata de este cuerpo lagunar. Sabiendo que la tasa de erosión es de 17.1 m/año, la integridad de este cuerpo lagunar es prácticamente nula. En la figura 5 se ilustra el estado de intensa erosión en la zona de Punta Disciplina.

La parte central de la Isla del Carmen presenta zonas de erosión como en el CASES y

Club de Playa. En ambas localidades se han detectado desplazamientos de la línea de costa del orden de 117 y 171 metros, respectivamente, para el periodo 1976-2008. En las figuras 6 y 7 se ilustran estos sitios. Obsérvese en el sitio CASES la proximidad de la carretera a la costa.

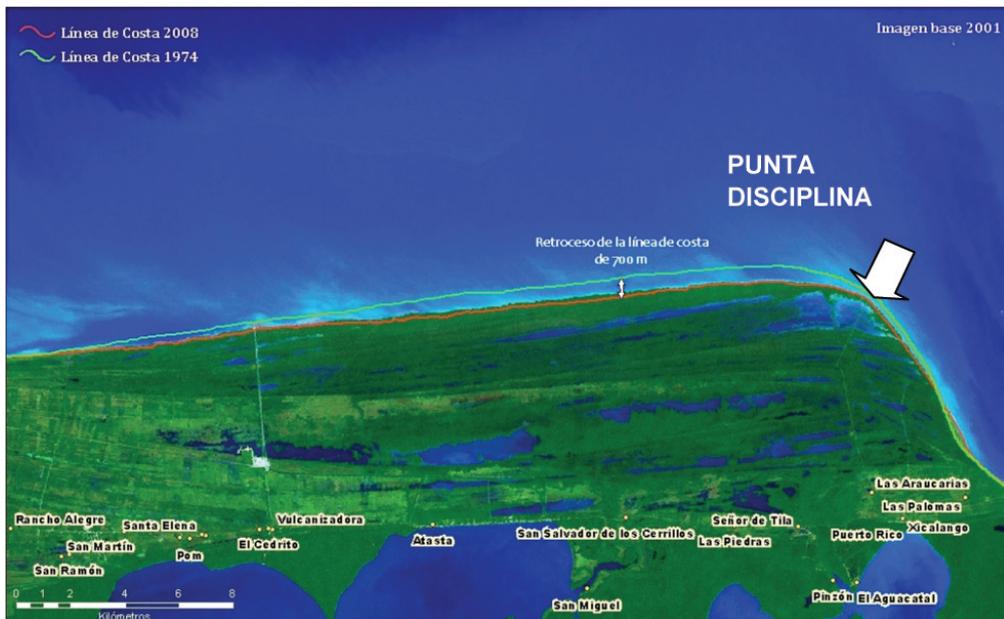


Figura 4. Reconstrucción de la línea de costa de 1974 y su ubicación con respecto a la costa de 2008 de la Península de Atasta. Véase la ubicación de Punta Disciplina, discutida en el texto.



Figura 5. Erosión en Punta Disciplina, Campeche. El ancho actual de la barra de arena es de 290 metros.



Figura 6. Determinación de procesos erosivos en la localidad CASES, Isla del Carmen, Campeche. Periodo 1984-2004.



Figura 7. Procesos de acreción y erosión en la localidad de Club de Playa.

Localidades con fluctuación erosión - depósito

Un análisis detallado de la evolución de la línea de costa en el sector de Ciudad del Carmen, muestra que no obstante que el proceso de erosión es el dominante, la línea de costa ha presentado fluctuaciones erosión – acreción durante el periodo de análisis (1974-2008).

En la figura 8 se han reconstruido las líneas de costa de los años 1974, 1986, 1996, 2005

y 2008. El último año corresponde a la de la imagen de la figura. Obsérvense dos grandes diferencias entre los patrones de cambio de línea de costa de la denominada Playa Norte (ubicada al oeste de la Isla del Carmen) con respecto a la porción central ilustrada en la imagen. Así mientras en la zona oeste ocurrió un proceso de acreción entre 1974 y 2001 que agregó más de 360 metros de nuevo litoral, en la zona este la erosión ha sido prácticamente



Figura 8. Diversas visualizaciones del proceso de acreción/erosión en Playa Norte, Isla del Carmen para el periodo 1974-2008. La imagen (Ikonos) corresponde al año 2008. Detalle de la lengüeta de sedimentos. En color azul su extensión en el año 2001. Detalle de los procesos de acreción (verde) y de erosión (rojo).

constante. También es bueno mencionar que desde 2001 el estado hidrodinámico de la sección oeste de la Isla del Carmen es de erosión, y que los terrenos “ganados al mar” ya no lo serán, pues serán erosionados en las siguientes décadas. Además se sabe que en esta zona se extrae material granular mediante dragas, lo que acelerará el proceso erosivo aún más. Hasta la fecha (2008), el retroceso de la lengüeta ganada al mar es de unos 240 metros.

TASA DE EROSIÓN

Cuando se calcula el desplazamiento de la línea de costa por unidad de tiempo, se obtiene la tasa de erosión (tabla 4). Las tasas de erosión de diferentes localidades en el estado de Campeche difieren ligeramente de las magnitudes netas de desplazamiento de la línea de costa descritas en el inciso anterior. Así, por

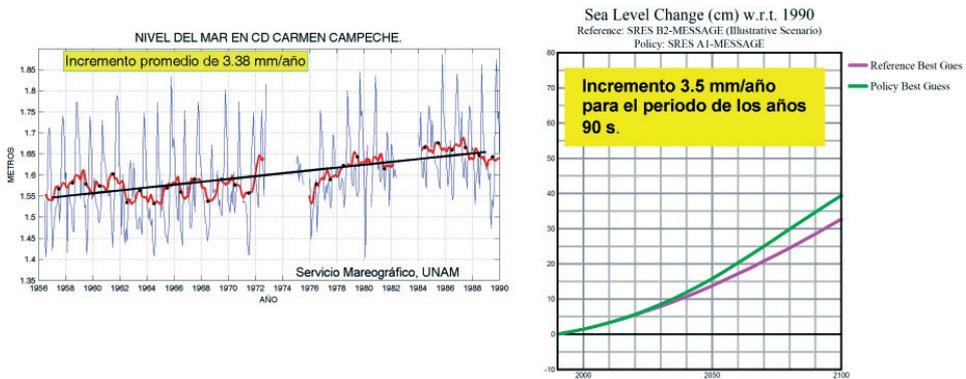
ejemplo, el sitio con mayor tasa de erosión corresponde a la zona de punta La Disciplina con 17.1 m/año, mientras que el de menor erosión se ubica en la Isla Aguada con solo 0.2 m/año. Lo anterior se visualiza mejor en forma de la gráfica de la figura 9 en la que nuevamente se observa la mayor incidencia de erosión en el poniente del litoral.

CAMBIO CLIMÁTICO Y ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

La elevación del nivel del mar es probablemente el impacto antropogénico más importante del cambio climático en este siglo (Grinsted, *et al.*, 2009). El enfoque utilizado por el IPCC (Meehl *et al.*, 2007) para estimar la elevación futura del nivel del mar ha sido la de modelar sus dos principales componentes: la expansión térmica y la fusión del hielo.

Tabla 4. Tasa de erosión costera en el estado de Campeche, periodo 1974 a 2008.

Id	Sitio	Periodo	Intervalo (años)	Tasa de erosión (m/año)
1	Punta la Disciplina	1974-2008	34	17.1
2	Playa Norte	1974-2005	31	0.3
3	Club de Playa	1974-2007	33	5.2
4	CASES	1974-2007	33	3.6
5	Isla Aguada	1974-2005	31	0.2
6	Sabancuy	1974-2005	31	6.8
7	Punta de Xen	1974-2002	28	4.4
8	Champotón	1974-2006	32	2.4

**Figura 9.** Elevación del nivel del mar medido en la Estación Carmen (Campeche) y modelado mediante el programa MAGICC (2009).

No obstante que en el Cuarto Reporte de IPCC se estimó que el nivel del mar se elevaría entre 18 a 59 cm para el 2100 (Meehl *et al.*, 2007), estas cifras han cambiado rápidamente. Por ejemplo, las mediciones de nivel del mar en la Estación Carmen, recopiladas y depuradas por Zavala (2009) muestran que el nivel del mar ha ascendido a una velocidad de 3.38 mm/año (figura 9). En el lapso de 34 años entre 1956 a 1990 el nivel del mar en Ciudad del Carmen se elevó 11.42 cm, valor que coincide con el pronosticado mediante el modelo MAGICC (2009), el cual muestra valores de elevación del nivel del mar para esta época de 3.5 mm/año.

Dentro de los escenarios estudiados A1B-AIM y B2-MES se calcularon las elevaciones posibles del nivel del mar para los años 2030, 2050 y 2100 (tabla 5). Se observa, que se tengan o no políticas para la reducción de emisiones a la atmósfera, el nivel del mar continuará incrementándose en valores de 8 cm para el año 2030, 3.5 cm para 2050, y 33 cm en el 2100, tratándose de un escenario optimista.

Hasta este punto queda demostrado que el nivel del mar ascenderá, independientemente de las políticas de control de emisiones que se apliquen. La pregunta es ¿Cómo será la nueva configuración de las costas de Campeche, si el nivel medio del mar asciende 40, 60, 80 ó

Tabla 5. Elevación del nivel medio del mar en cm.

Año	Escenario A1B-AIM	Escenario B2-MES
2030	8.0	8.5
2050	13.5	15.7
2100	33.0	39.2

100 centímetros?, valores que son posibles de acuerdo a los cálculos del modelo MAGICC, validado con los datos de Ciudad El Carmen.

Para responder esta pregunta se realizaron interpolaciones a partir de los datos de elevación del nivel del mar obtenidos por Weiss y Overpeck de los datos de radar del levantamiento de la topografía mundial realizado por la NASA en 2001, datos geodésicos del INEGI y de bancos de nivel levantados durante el presente trabajo. Aplicando un algoritmo de curvatura por mínimos cuadrados se

obtuvieron las isolíneas de las elevaciones de 40, 60, 80 y 100 cm. El resultado se muestra en la figura 10.

El modelo de elevación del nivel del mar obtenido muestra que la región comprendida por la Laguna de Términos sufrirá severas inundaciones, conformándose una bahía si se incrementa el nivel medio del mar en solo 40 cm. Igualmente toda la franja litoral quedaría cubierta. Este escenario será posible para el año 2100 fecha en que el nivel del mar alcanzará dicha elevación.

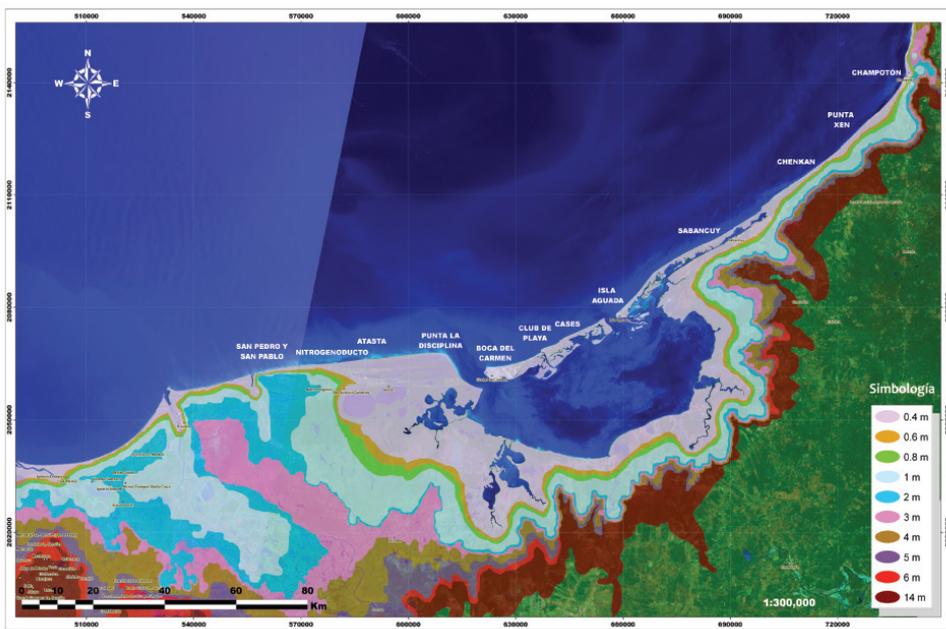


Figura 10. Configuración de las posibles líneas de costa en el estado de Campeche por ascenso del nivel en intervalos de 40, 60 y 100 cm, y 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 14 metros.

VULNERABILIDAD

Si bien el proceso de transgresión marina es un proceso que viene desde hace varios millones de años, la respuesta del material continental que está siendo erosionado puede o no favorecer la formación de nuevas playas. Por ejemplo en la zona oriente de Campeche hay litologías más consolidadas y más resistentes a la erosión que las de la zona poniente del mismo estado.

Por otra parte, el proceso de erosión y generación de playas depende fuertemente de la aportación de sedimentos provenientes del continente a través de las descargas fluviales. La formación de los ambientes lagunares bordeados de islas barrera como los actuales se deben a la presencia de descargas de ríos como el Champotón, San Pedro y San Pablo y el Grijalva-Usumacinta. Los rasgos morfológicos a gran escala de esta región muestran la erosión progradante de los deltas formados por estos ríos y la formación simultánea de las islas barrera gracias a la distribución de los sedimentos fluviales por las corrientes oceánicas y litorales. Con la modificación antrópica de los volúmenes de descarga de tales ríos, se ha roto el aporte de sedimentos desde el continente, rompiéndose a su vez el equilibrio continente-oceano del aporte de sedimentos, incrementándose el efecto erosivo de las corrientes marina y litoral.

El ambiente erosivo regional de Campeche pone en situación de vulnerabilidad a todo el sistema lagunar-isla barrera ya que éstas últimas ya no están recibiendo los sedimentos fluvio-deltáicos que recibían en décadas anteriores, dependiendo actualmente en su mayor parte por los detritos biogénicos locales. La pérdida de una fracción importante de sedi-

mentos de origen continental ocasiona cambios en la condición sedimentaria (espesor de capas, compactación, contenido arcilloso, etc.) y en las condiciones biológicas por la disponibilidad y tipo de nutrientes contenidos diferencialmente en los detritos oceánicos y continentales; esto ocasionará el desplazamiento o la adaptación de especies a la nueva condición del tipo de sedimentos. Por ejemplo, la presencia de pastos marinos.

Veamos ahora uno de los puntos más críticos. ¿Cuál será la morfología costera en los años 2030, 2050 y 2100 asumiendo que el nivel del mar se elevará inexorablemente?

A partir de la gráfica de elevación de nivel del mar (figura 10) se calcularon mediante un interpolador GIS las cotas que corresponden a las elevaciones 8, 13 y 33 cm, que corresponden a las elevaciones del nivel medio del mar para los años 2030, 2050 y 2100, respectivamente (figura 11).

Puede observarse que la zona más vulnerable es la península de Atasta la que en un lapso de 20 años presentarán las primeras inundaciones. Le sigue el borde interior de la laguna de Términos comprendiendo todos los cuerpos lagunares mayores como la laguna de Pom y otras, los cuales quedarán cubiertos por agua hacia el 2050. Por último, las zonas de la Isla del Carmen, Isla Aguada y Sabancuy presentarán inundaciones cerca del año 2100.

El escenario presentado es preliminar. La resolución espacial de varias fuentes de información podría acarrear errores en cadena, tales como: la resolución espacial de las imágenes de 1974 las cuales corresponden al satélite Landsat 3 (MSS) el cual tiene una resolución espacial de 59 m; la resolución original del levantamiento topográfico mundial (STRM), la

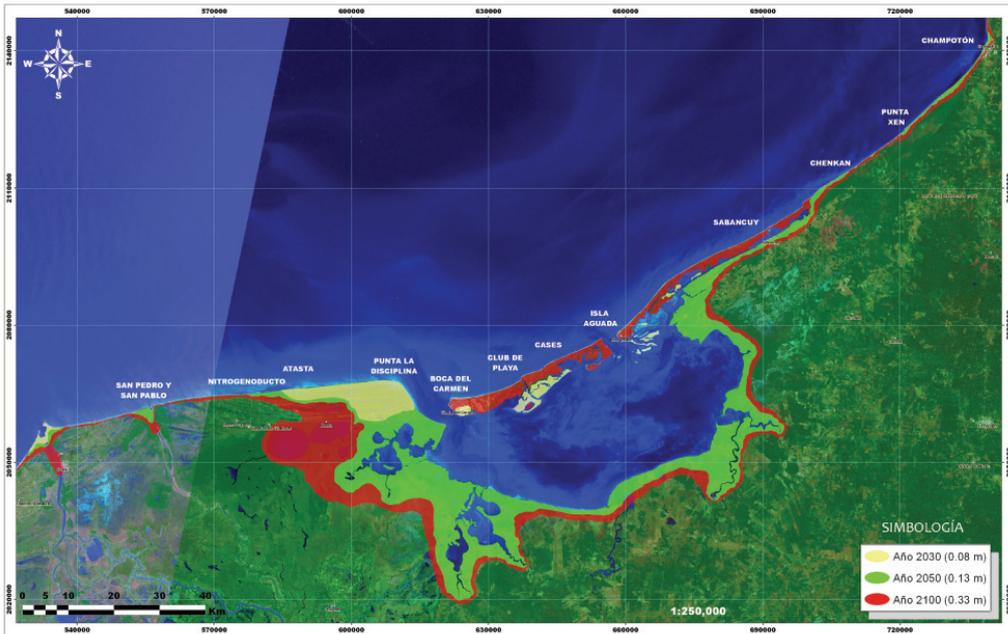


Figura 11. Modelo de elevación del nivel del mar del litoral de Campeche para los años 2030, 2050 y 2100.

cual fue originalmente de 16 metros, aunque fue corregida por Weiss y Overpack hasta alcanzar un metro en altura. Se dispuso pocos

vértices geodésicos, aunque todos se incluyeron en las interpolaciones, especialmente en la Isla del Carmen y zona de Sabancuy.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Todo el litoral de Campeche está sujeto a erosión.
2. Las tasas de erosión son mayores en la zona poniente del litoral (península de Atasta) que en la zona oriente (Isla del Carmen, Sabancuy y Champotón).
3. Las tasas anuales de erosión van de los 17.1 metros en el poniente a 0.2 metros en el oriente.
4. El nivel del mar se elevará de 8 a 33 cm en el periodo 2030-2100.
5. El proceso de erosión costera se magnifica por la retención de sedimentos provenientes de los ríos que antes descargaban totalmente en el Golfo de México y parte de los cuales están represados.
6. Las costas de Campeche para los años 2030, 2050 y 2100 se erosionarán e inundarán, empezando por la península de Atasta, siguiendo con el interior de la laguna de Términos y culminando con la Isla del Carmen.

OPCIONES DE ADAPTACIÓN

1. No se ha realizado un levantamiento a detalle de la línea de costa ni de la topografía con resolución altimétrica de centímetros. Se propone un levantamiento regional mediante LIDAR, técnica muy adecuada para la fisiografía de la región, con abundantes humedales y baja topografía.
2. Actualizar el modelo de elevación del nivel del mar en el Estado de Campeche acorde al levantamiento altimétrico anterior.
3. Realizar estudios de dinámica costera específicos en cada localidad vulnerable de importancia social, económica y

de infraestructura, tales como: Ciudad del Carmen, Champotón, Isla Aguada, Nitrogenoducto y Planta Atasta. Solo a partir del estudio de cada caso se podrán emitir las recomendaciones de mitigación, prevención y/o protección o abandono de sitios.

4. Realizar un levantamiento con radar de apertura sintética en la modalidad de interferometría (InSar) para conocer si existen hundimientos, levantamientos o basculamiento del terreno, y de esta manera conocer si existe el efecto de la subsidencia en el balance neto de elevación del nivel del mar.

LITERATURA CITADA

- ANIDE, 2005. Metodología para la determinación de erosión costera. Informe UO-IT-01. Cuernavaca, Morelos 120 p. (Citado con autorización del propietario de la tecnología).
- Carranza Edwards A., 2001. Grain Size Sorting in Modern Beach Sands. *Journal of Coastal Research*, 17 (1): 38-52.
- IPCC, 2001. Special Report on Emissions Scenarios.
- MAGICC, 2009. Model for the Assessment of Greenhouse-gas induced Climate Change (MAGICC 5.3). NCAR, Boulder, Colorado.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007. Global Climate Projections. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Ortiz-Pérez, M. A., 1992. Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche, Tabasco. *Investigaciones Geográficas. Boletín Instituto de Geografía*, 25: 7-23.
- PEP-UAEM, 2008. Estudio de la Dinámica Costera del litoral norte del municipio del Carmen, Campeche. 522 p.
- Pinilla, C., 1995. Elementos de teledetección, En: H. Karszenbaum, A. Gagliardini, A. Dogliotti A. y J. Bava. *Teleobservación Satelital de ambientes costeros: conceptos básicos y sus aplicaciones*. Universidad Nacional de la República.
- Suárez C., 1991. Modificaciones naturales y artificiales en las lagunas de Unare y Piritu y sus efectos ambientales. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Instituto Pedagógico de Caracas. .

Weiss y Overpeck, en preparación. Climate Change and Sea Level. Department of Geosciences. University of Arizona. .

Wigley T.M.I., M. Salmon, M. Hulme, y S.C.B. Raper, 2009. Model for the Assessment of Greenhouse-gas induced Climate Change (MAGICC 5.3). NCAR, Boulder, Colorado.

Zavala, J., 2009. Variaciones del nivel del mar en estaciones mareográficas del Golfo de México. Servicio Mareográfico Nacional, UNAM.