

Impactos del incremento en el nivel medio del mar en la zona costera del Estado de Campeche, México

AGRADECIMIENTOS

Este reporte es el resultado de un esfuerzo de colaboración entre el Banco Mundial y el Gobierno de Campeche, con el apoyo de la Secretaría de Medio Ambiente y Aprovechamiento Sustentable de Campeche. En este sentido, se agradece a la Secretaria del ramo Dra. Evelia Rivera Arriaga, el apoyo brindado para la realización de este trabajo y el taller organizado en la Ciudad de Campeche. Así mismo, se agradece a la Universidad Autónoma de Campeche, en especial al director del centro EPOMEX, MSc. Guillermo Villalobos, por las facilidades otorgadas para las actividades descritas en este trabajo.

Se extiende un especial agradecimiento a los funcionarios del Banco Mundial, quienes fueron pieza clave para la culminación exitosa de las actividades y trabajos asociados a este reporte, en particular a Richard Damania, Daniel Mira-Salama, Alberto Rojas, César Herrera Toledo y Paula Posas.

RESPONSABILIDAD

La elaboración del documento estuvo a cargo de Adrián Pedrozo Acuña, con la valiosa colaboración de Miguel Ángel Laverde Barajas. Los resultados, interpretaciones y conclusiones contenidas en este reporte son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista de los Directores Ejecutivos del Banco Mundial o del Gobierno del Estado de Campeche.

PRESENTACIÓN

Nunca como ahora, la humanidad había enfrentado aspectos de supervivencia con tal nivel de incertidumbre. El desmesurado incremento en conductas y patrones productivos y de consumo ambientalmente agresivos se ha traducido en aumentos de fenómenos de contaminación en todas sus modalidades, es decir, en agua, aire, y suelos, así como en la degradación de la calidad en amplias zonas de nuestro planeta, involucrando en este proceso de deterioro, ecosistemas de gran importancia para el mantenimiento y permanencia de la vida.

Estamos aprendiendo que el planeta y sus sistemas vitales tienen límites y que trascendiendo éstos no hay vuelta atrás. El clima se ha afectado de tal forma que está cambiando y con ello también lo hace la faz de la Tierra. Los ecosistemas y la vida misma son moduladas por una serie de elementos tales como la lluvia y la temperatura que al alterar sus patrones normales, modifican su expresión en cada región del planeta.

Una de las zonas con mayor vulnerabilidad frente a un clima cambiante y sus efectos es la zona costera. El aumento en la frecuencia y la intensidad en que se han presentado las tormentas y fenómenos naturales asociados, el implacable avance de la erosión resulta en la pérdida de terrenos frente al mar, así como de infraestructura. Esto trae consecuencias importantes en cuanto al aumento en las zonas de inundación debido al incremento del nivel medio del mar, poblaciones desplazadas, pérdida de líneas vitales de comunicación como carreteras, tendido eléctrico y líneas telefónicas, además de la salinización de suelos y agua subterránea con la consecuente pérdida de su potencial productivo y la irreparable pérdida de biodiversidad.

Campeche es uno de los estados con más alto riesgo y vulnerabilidad del Golfo de México ante estas amenazas, por tal motivo el Gobierno del Estado trabaja en estrategias y acciones que permitan la mitigación y adaptación a los efectos producidos por el Cambio Climático. En este tenor, es que el Gobierno del Estado de Campeche a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Aprovechamiento Sustentable le solicitó al Banco Mundial su apoyo para identificar y diagnosticar el efecto del Cambio Climático en las zonas costeras del Estado.

Como gobierno responsable, es necesario dar siempre un paso adelante ante cualquier eventualidad que ponga en riesgo la integridad de los campechanos. Por ello se trabajó en conjunto con el Banco Mundial para obtener este diagnóstico que permitirá avanzar en el diseño del Programa de Acción para la mitigación y adaptación a los efectos del Cambio Climático. Este documento es toral en la propuesta de instrumentos de política pública que permitirá la transversalización del tema climático y que coadyuvará a proporcionar medidas enfocadas a problemas particulares, vislumbradas en el análisis de escenarios con mayor variabilidad climatológica.

Es pues este instrumento, el resultado de una visión de integralidad y coadyuvancia entre el Gobierno del Estado de Campeche y el Banco Mundial, para la organización y estructuración del conocimiento disponible apoyados en resultados científicos de los impactos del Cambio Climático en nuestras costas campechanas para la toma de decisiones responsables e informadas.

Con los análisis de las medidas de adaptación propuestas, se logró el establecimiento de prioridades en lo referente a los sistemas físicos, eventos extremos, normatividad vigente, reforestación en los hábitats, así como medidas de monitoreo, manejo integrado, prevención, planeación, restauración, protección y de infraestructura.

Para alcanzar el objetivo planteado en este estudio se preparó un reporte sobre el nivel de conocimiento del problema, la vulnerabilidad presente y futura en el Estado, las predicciones de Cambio Climático, y la identificación de los sectores más sensibles ante el incremento del nivel del mar dentro del territorio estatal.

Este documento representa el inicio de una colaboración estrecha con el Banco Mundial para hacer del Estado de Campeche, un sitio más seguro ante los efectos del Cambio Climático al dotarles de las bases para proponer los planes de desarrollo estratégico en el estado y los municipios en beneficio de toda la población.

Lic. Fernando E. Ortega Bernés
Gobernador del Estado de Campeche

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| Resumen Ejecutivo..... | 8 |
| 1. Introducción..... | 12 |
| 2. Objetivo..... | 16 |
| 3. Contexto general del Estado de Campeche..... | 18 |
| 3.1 Clima..... | 19 |
| 3.2 Fisiografía y suelos..... | 19 |
| 3.3 Flora y fauna..... | 20 |
| 3.4 Áreas naturales protegidas..... | 20 |
| 3.5 Cambio del uso de suelo..... | 21 |
| 3.6 Hidrografía e hidrología..... | 22 |
| 3.7 Características económicas..... | 23 |
| 4. Resumen del mejor conocimiento disponible.... | 25 |
| 5. Análisis histórico de variables ambientales..... | 27 |
| 5.1 Precipitación..... | 28 |
| 5.2 Temperatura..... | 29 |
| 5.3 Número de huracanes..... | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 6. Taller | |
| Impactos del cambio climático en las costas del Estado de Campeche..... | 34 |
| 6.1 Introducción..... | 34 |
| 6.2 Impactos del cambio climático en las costas del Estado de Campeche..... | 36 |
| 6.3 Mesa de trabajo desde una perspectiva de infraestructura..... | 39 |
| 6.4 Mesa de trabajo desde una perspectiva de ecosistemas costeros biodiversidad y turismo..... | 42 |
| | |
| 7. Análisis de las opciones de adaptación..... | 47 |
| | |
| 8. Conclusiones y comentarios finales..... | 52 |
| 8.1 Comentarios finales..... | 53 |
| | |
| 9. Recomendaciones y futuras líneas de trabajo..... | 54 |
| | |
| 10. Referencias..... | 56 |
| | |
| Apéndice 1 | |
| Revisión del estado del arte..... | 62 |
| A.1 Estudios Físicos..... | 63 |
| A.2 Estudios ambientales..... | 87 |

RESUMEN EJECUTIVO

Las dos consecuencias principales del cambio climático que tienen un impacto sobre los ambientes costeros en el mundo, son el incremento en el nivel medio del mar y los cambios en el clima marítimo (incremento en frecuencia e intensidad de tormentas). El cuarto reporte del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático estima que el incremento del nivel medio del mar a nivel global para el año 2100, estará en el rango de 18-38cm (límite inferior) y 26-59cm (límite superior), en función del escenario de emisiones que se analice (IPCC, 2007). Si se da seguimiento a los resultados de estudios internacionales enfocados a la evaluación de los impactos del incremento del nivel del mar en la zona costera, la necesidad de investigar las consecuencias sobre las costas mexicanas es evidente.

En México, el Estado de Campeche representa un área estratégica de gran importancia económica (ej. zona petrolera) y ecológica (ej. 3 especies de tortugas marinas en peligro de extinción desovan en sus costas) que ya sufre los efectos del incremento del nivel del mar y la presencia de mareas de tormenta más severas. Algunos estudios indican que el 58.41% de la población del Estado está en una situación vulnerable ante un incremento de +1.0m en el nivel del mar (440,910 habitantes). La concentración de la población afectada, se ubica en Ciudad del Carmen (154,197 habitantes) y Campeche (211, 671 habitantes). El cambio climático incrementará la inundación y erosión costera en un futuro. Adicionalmente, también se espera un mayor número e intensidad de tormentas, por lo que se producirá un aumento en la probabilidad de incidencia de mareas de tormenta extremas sobre las costas (~ 4 -6 m). Estas mareas pueden hacer que las zonas afectadas se extiendan entre los 11 y los 16km tierra adentro en las zonas bajas (1 - 2m sobre el nivel del mar). Adicionalmente, en playas sujetas a procesos erosivos el número de nidos de tortuga es menor que en playas estables.

Resulta complejo hacer predicciones exactas sobre el alcance de los impactos esperados. La disparidad en los números reportados por los estudios revisados resaltan la necesidad de contar con datos de elevación con mejor resolución espacial y precisión vertical. Sin embargo, existe consenso en que las áreas más vulnerables ante la inundación por marea de tormenta en el Estado de Campeche son Los Petenes y la parte central de la ciudad de Campeche (zona amurallada), donde se registra un aumento de 3 veces en la superficie afectada ante un incremento de +60cm.

Las consecuencias económicas de los impactos del cambio climático son materia de preocupación para los tomadores de decisión. Como ejemplo, para países en vías de desarrollo, los costos económicos asociados a estos eventos han sido proyectados para el año 2100, cerca de los 100 Billones de dólares para un incremento de +0.6m sobre el nivel del mar. Estos costos no consideran cambios producidos por la salinización de acuíferos e improductividad de las zonas agrícolas, por lo que es necesario considerar su impacto en la seguridad alimentaria.

¿Cómo tomar decisiones bajo escenarios inciertos y con multiplicidad de prioridades? ¿cómo alcanzar consenso entre los distintos actores para priorizar actividades de adaptación al cambio climático? El Gobierno del Estado de Campeche a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Aprovechamiento Sustentable (SMAAS), en coordinación con el Banco Mundial, ha liderado una iniciativa pionera para afrontar estos retos, que son compartidos por muchos otros lugares en México y en el exterior. Esta iniciativa consiste en la aplicación de

la metodología del análisis ambiental estratégico, en la que se introduce la variable de cambio climático y los distintos escenarios futuros de impactos con su incertidumbre asociada, como método para la identificación y priorización de acciones en el Estado, alcanzando un importante consenso y acuerdo. La metodología tuvo su momento culminante durante el desarrollo de un taller de impactos del cambio climático sobre la zona costera del Estado. En este taller se definieron los lineamientos básicos para planificación de actividades de adaptación a los impactos del cambio climático en las costas, con la participación de todos los actores principales como son la sociedad civil, los académicos, las autoridades locales, los empresarios, los ingenieros y en general todos los representantes de sectores relevantes.

Durante el taller se agruparon a expertos locales sobre los impactos del cambio climático en las costas junto con actores relevantes de la sociedad, de tal suerte que los lineamientos obtenidos sean bien recibidos por la población.

Principales resultados del análisis ambiental estratégico de impactos del cambio climático en las costas de Campeche

El taller se realizó el 3 de Mayo de 2011, en la sala de usos múltiples de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche.

El punto de partida del análisis ambiental estratégico fueron las conclusiones de un reporte detallado, preparado por expertos en la materia, del estado del conocimiento en materia de cambio climático en la región, junto con ciertos pronósticos asociados a datos históricos disponibles. La finalidad del reporte era la de valorar el grado de conocimiento del problema, obtener una medida de la vulnerabilidad existente en el Estado, e identificar vacíos de información y áreas de mejora.

Dicho reporte indicó que dentro de los impactos esperados en la costa de Campeche destaca un incremento de 1 metro del nivel del mar, escenario que puede darse hacia finales de siglo, lo que pondría en riesgo el 9 - 12% de costa del Estado. Asimismo, el reporte indicó que Campeche es uno de los estados que ha trabajado más extensamente en la zona costera, lo que lo ubica como pionero en el desarrollo de metodologías de ordenamiento costero a nivel nacional. De hecho, en Campeche existen municipios que cuentan con un plan de desarrollo municipal que incluye consideraciones de cambio climático, lo que lo singulariza en el panorama nacional y lo convierte en un ejemplo sobre el que es posible mejorar esa herramienta de planificación.

El reporte fue puesto a disposición de distintas instituciones relevantes del Estado, y posteriormente se organizó un taller en el que la SMAAS invitó a un nutrido grupo de representantes de distintas áreas e intereses, incluyendo ONG, sector privado, universidades y centros de investigación, y órganos de gobierno. En un primer paso, los participantes eligieron conjuntamente los sectores prioritarios para la identificación de impactos, y se dividieron en grupos para trabajar más intensamente esos sectores prioritarios. De esta forma, se planteó el análisis conjunto de la vulnerabilidad percibida en los sectores más sensibles de acuerdo a la visión de los participantes. Posteriormente, se analizaron los impactos sobre los sectores que originarían los cambios previstos en diversas variables seleccionadas (precipitación, temperatura, subida del nivel del mar, intensificación de huracanes y otros) incluyendo las estimaciones de cambio de estas variables (estimaciones que fueron proporcionadas por el reporte anteriormente aludido). Finalmente, los participantes propusieron diversas opciones de adaptación y acordaron las acciones críticas, estratégicas y prioritarias ante los efectos del incremento del nivel del mar en la zona costera del Estado. Cada participante valoró y puntuó las distintas opciones presentadas, y finalmente se llegó a una lista consensuada de acciones prioritarias. Esta lista se convierte en un instrumento válido que debería informar y orientar las políticas de desarrollo del Estado.

Un resultado muy relevante del taller fue la visión que del Estado tienen los participantes. Es una visión de un Estado sustentable, que basa su fortaleza y atractivo en la conservación y mejora de sus valores ecológicos y naturales, con aprovechamiento sustentable de los mismos, con respeto a la naturaleza, con solidaridad, respeto y compromiso. Este es el Estado que los participantes quieren tener, y a partir de esa visión se desarrolló el trabajo posterior, que se convierte en un insumo para obtener esa visión.

Los dos sectores prioritarios seleccionados por los expertos durante el taller fueron: Infraestructura y asentamientos humanos y Ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo.

Las principales medidas de adaptación identificadas y consensuadas por el grupo fueron:

Infraestructura y asentamientos humanos:

- Sobre elevación de bordos
- Reubicación de infraestructura
- Legislación sobre el uso de suelo
- Restauración de humedales
- Mantenimiento del sistema de drenajes
- Relocalización de pozos de agua potable
- Reubicación de áreas de cultivo
- Reforestación
- Normatividad
- Emisión de alertas sanitarias
- Sistemas de alerta temprana
- Investigación sobre fenómenos extremos

Ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo:

- Programas de monitoreo de especies
- Rehabilitación y restauración de Áreas Naturales Protegidas (ANPs)
- Monitoreo de playas
- Obras de protección costera
- Regulación de pesca
- Fomento de Ecoturismo
- Reforestación de dunas costeras y pastos marinos
- Energías alternas
- Reubicación de nidos de tortuga
- Programa de acuicultura
- Monitoreo de Calidad del agua
- Investigación sobre dinámica costera y de peces.



1. INTRODUCCIÓN

A continuación se hace un resumen sobre los principales resultados y conclusiones alcanzados a través del reporte que sirvió como punto de partida del análisis ambiental estratégico, así como del taller de impactos del cambio climático en las costas del Estado de Campeche, con su priorización y consenso de acciones y recomendaciones para los tomadores de decisiones.

El cuarto reporte (AR4) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) pronosticó un incremento en el nivel medio del mar global de hasta ~60cm para el año 2100, como resultado del calentamiento de los océanos y el derretimiento de los glaciares (IPCC, 2007). Por otra parte, de forma paralela la recopilación de datos de satélite (TOPEX/POSEIDON, Jason 1 y Jason2) ha confirmado a nivel mundial, una clara tendencia hacia el incremento en el nivel del mar global durante la última década (ver Figura 1.1).

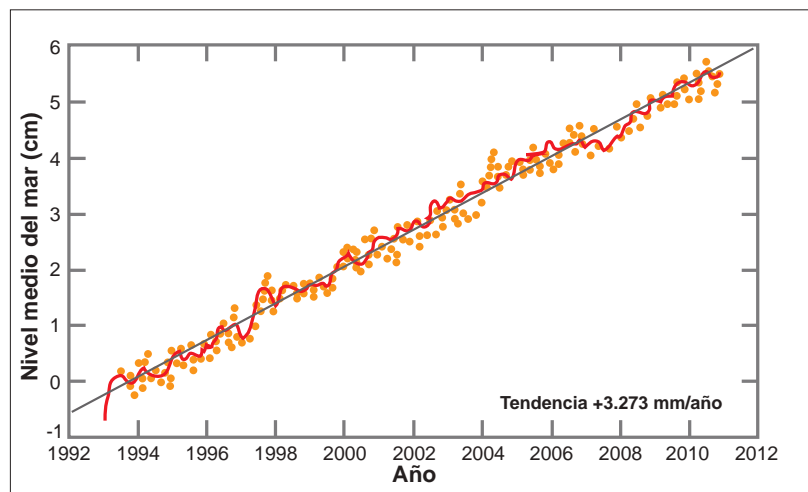


Figura 1.1. Tendencias mundiales del nivel del mar registradas por altimetría de satélite en las últimas dos décadas

Las distintas proyecciones presentadas hasta ahora, consideran diferentes fenómenos climáticos como forzadores principales del incremento en el nivel del mar, tal y como se resume de forma gráfica en la Figura 1.2. Sin embargo, cabe destacar que los pronósticos más creíbles están basados en relaciones semi-empíricas, por lo que es necesario desarrollar modelos más apegados a la física con el propósito de reducir la incertidumbre en los pronósticos.

Estos resultados indican de forma clara que es fundamental desarrollar proyecciones más certeras para la planeación de infraestructura de protección y adaptación en las zonas costeras. Por ejemplo, datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), estiman que a nivel mundial 500 Millones de personas se encuentran en riesgo ante una subida del nivel del mar de +1m. Aunado a lo anterior, las diferencias registradas entre los diferentes pronósticos de incremento en el nivel del mar para el año 2100, indican que con mucha seguridad las proyecciones del IPCC AR4 están **subestimando el fenómeno**.

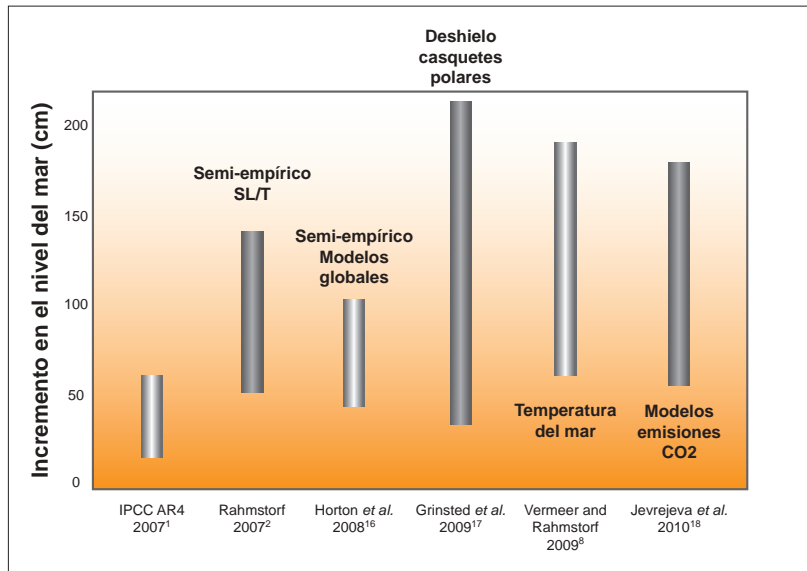


Figura 1.2. Proyecciones del incremento en el nivel del mar global para el año 2100

A pesar de la variación en las proyecciones, los resultados indican de forma clara que el cambio climático incrementará el riesgo de inundaciones e intrusión salina en aguas superficiales (Nicholls, 2002). Por ejemplo, es sabido que, en ausencia de otros cambios, un incremento en el nivel del mar de 38 centímetros aumentará en cinco veces el número de personas expuestas a inundaciones inducidas por la presencia de marea de tormenta sobre las costas (Nicholls et al., 1999). El efecto inmediato consiste en el incremento de inundaciones en zonas costeras; sin embargo, es sabido que efectos a largo plazo también ocurrirán conforme la costa se ajuste a las nuevas condiciones de forzamiento. Estos impactos incluyen más erosión costera y la intrusión salina en aguas subterráneas.

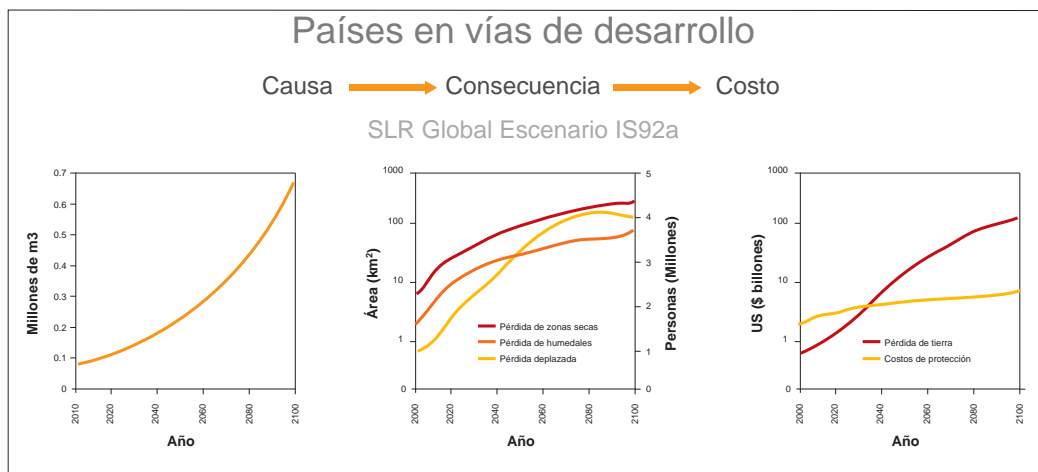


Figura 1.3. Costos asociados a un escenario de incremento en el nivel del mar en países en vías de desarrollo (Fuente: Nicholls et al. 2007)

Por otra parte, se sabe que a menos que los humedales costeros (ej. marismas y manglares) cuenten con la suficiente disponibilidad de sedimentos para mantener el ritmo de la elevación del nivel medio del mar, éstos verán reducida su extensión superficial. Estos impactos físicos tendrán asociados a ellos efectos socioeconómicos, directos e indirectos, que parecen ser tremendamente negativos. Por ejemplo, en países en vías de desarrollo, para un incremento de +0.6m sobre el nivel del mar en el año 2100, se han proyectado costos de ~100 Billones de dólares (Nicholls et al., 2007, ver Figura 1.3). Además, estudios abocados a la estimación de los daños en la zona costera señalan que es probable que estos se incrementen en un 20% si la costa está sometida a un proceso de erosión (West et al., 2001; Yohe y Schlesinger, 1998).

Recientemente, México ha sido catalogado como uno de los países con más territorio localizado dentro de zonas costeras de baja elevación, las cuales se definen como el área continua a lo largo de la costa que tiene menos de 10 metros de elevación sobre el nivel del mar (McGranahan et al., 2007). En consecuencia, la necesidad de investigar los impactos del incremento en el nivel del mar en la zona costera es muy evidente. Adicionalmente, es muy probable que el incremento en el nivel del mar aumentará a su vez la vulnerabilidad de las zonas costeras en el Golfo de México en virtud de que actualmente estas zonas se encuentran bajo la presión combinada de actividades antropogénicas y procesos naturales.

Entre los estados costeros de México, Campeche se encuentra bajo los efectos del incremento en el nivel del mar y la presencia de mareas de tormenta más severas. Sin embargo, los impactos que resultan de estos forzamientos sobre la zona costera del Estado son inciertos. Tampoco se tiene certeza sobre la capacidad de adaptación de la sociedad para sobrellevar las consecuencias. El Estado de Campeche representa el 3% del área total del país y posee el 4.51% del litoral nacional. Más aun, la industria petrolera ubicada en el Estado representa el 96.4% de la producción nacional de crudo y el 95.8% de la producción nacional de gas (Sánchez-Salazar and Martínez Galicia, 2000) y más del 70% de su población vive en los cuatro municipios costeros. Notablemente, la mayor parte de la infraestructura petrolera, está localizada a lo largo de la línea costera con lo que la evaluación de los impactos en esta zona por el incremento en el nivel del mar cobra aun mayor importancia.



2. OBJETIVO

El objetivo general del ejercicio realizado por la SMAAS y el Banco Mundial consistió en la aplicación del análisis ambiental estratégico a los impactos del cambio climático en el Estado de Campeche, bajo un escenario de incertidumbre, como herramienta para generar información útil y consensuada que sirva para guiar el proceso de adaptación al cambio climático en el Estado de Campeche.

Para alcanzar este objetivo, se preparó un reporte sobre el nivel de conocimiento del problema, la vulnerabilidad presente y futura en el Estado, las predicciones de cambio climático, y la identificación de los sectores más sensibles ante el incremento del nivel del mar dentro del Estado (principalmente el incremento en el nivel medio del mar, pero también aumento de temperatura, cambios en precipitaciones e intensificación de fenómenos extremos). Posteriormente se realizó un taller, que siguió una novedosa metodología (descrita en el capítulo 6) con los actores principales en relación con los impactos del cambio climático en las zonas costeras (académicos, representantes de sectores relevantes, ingenieros, planificadores gubernamentales, sociedad civil) a fin de identificar acciones críticas, estratégicas y prioritarias ante los efectos del incremento del nivel del mar en la zona costera.

La finalidad principal era proporcionar información útil para la Secretaría de Medio Ambiente y Aprovechamiento Sustentable de Campeche (SMAAS), de tal suerte que el conocimiento permita a los tomadores de decisiones realizar acciones informadas al proponer los planes de desarrollo estatal y municipal.

Este documento es el producto final de este proceso, el cual se constituye en un insumo para la Secretaría de Medio Ambiente y Aprovechamiento Sustentable del Estado, para la definición de los impactos del incremento en la zona costera de Campeche tomando en consideración los impactos potenciales esperados a lo largo del litoral.

Las matrices de riesgo resultantes de este ejercicio fueron elaboradas desde dos perspectivas fundamentales: Infraestructura y asentamientos humanos y Ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo. Ambos grupos de trabajo diseñaron las matrices de medidas de adaptación con base en la de riesgos, y posteriormente se utilizó una metodología previamente utilizada por el Banco Mundial para la jerarquización de estas medidas (ver apartado 6.2).



3. CONTEXTO GENERAL DEL ESTADO DE CAMPECHE

En este apartado se describen de manera general las principales características físicas y geográficas del Estado de Campeche, así como las condiciones socioeconómicas más sobresalientes.

El Estado de Campeche se encuentra ubicado en el suroeste de la República Mexicana (Figura 3.1a), entre los 20°51' y 17°49' de latitud norte; y los 89°09' y 92°28' de longitud oeste. Tiene una extensión territorial de 57.924 km², que representa el 3% de la superficie total del país. Limita al norte con Yucatán, al sur con Tabasco y Guatemala, al este con Quintana Roo y Belice, y al oeste con el Golfo de México. Campeche se encuentra dividido en 11 municipios siendo Campeche su capital (Figura 3.1b).

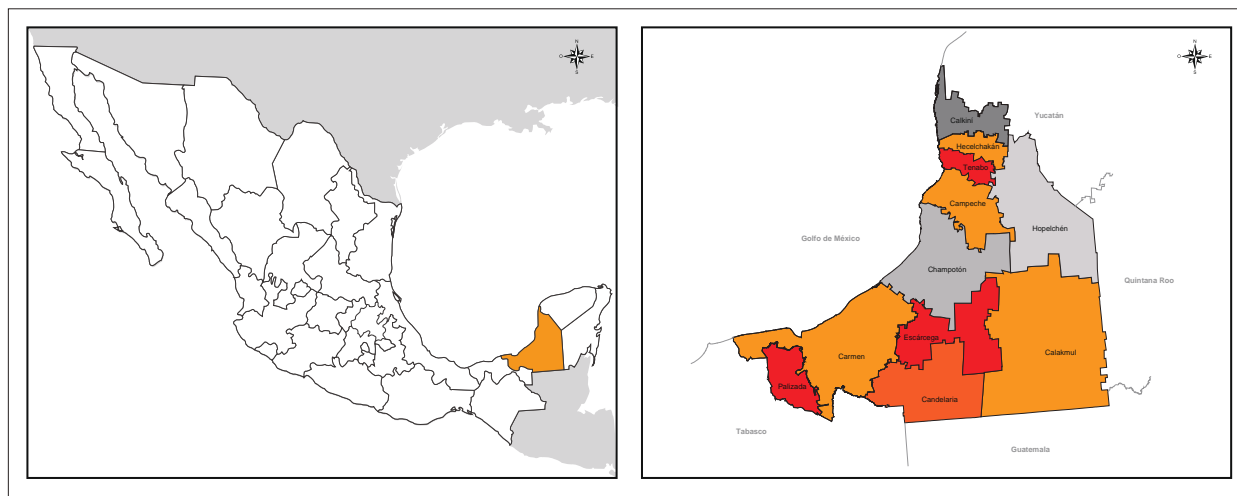


Figura 3.1. (a) Ubicación del Estado de Campeche; (b) División política del Estado de Campeche

3.1 Clima

La ubicación intertropical, la escasa altitud y el relieve llano que cuenta el Estado de Campeche, ha determinado la presencia de temperaturas altas en todo su territorio. Estas temperaturas en combinación con la cantidad de precipitación total anual que ocurre son las causantes del predominio del clima cálido subhúmedo, seguido del cálido húmedo y en una proporción menor el semiseco muy cálido y cálido (Figura 3.2). En la zona de la faja costera la temperatura media anual es de 28°C aproximadamente. La precipitación total anual varía de 800 mm en el norte y noreste a cerca de de 2.000 mm en los alrededores y el sureste de Ciudad del Carmen.

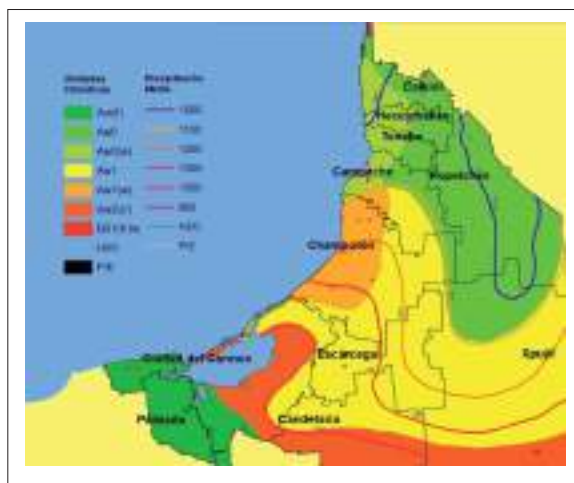


Figura 3.2. Unidades climáticas y precipitación media del estado de Campeche

3.2 Fisiografía y suelos

Campeche hace parte de la gran laja caliza que es la Península de Yucatán. En general se constituye de una planicie ligeramente ondulada con una suave inclinación que desciende en dirección del centro hacia el norte y suroeste (Figura 3.3a). El Estado se encuentra dividido en dos provincias fisiográficas, la llanura costera del Golfo del Sur y La Península de Yucatán, esta última dividida en dos subprovincias fisiográficas, la península de Yucatán y la llanura costera del Golfo sur (Figura 3.3b).

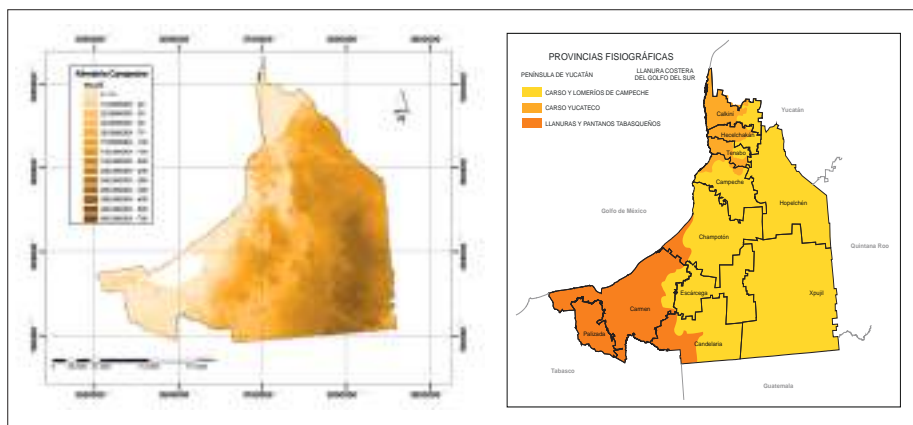


Figura 3.3. a) Altimetría del Estado de Campeche; b) Provincias y subprovincias fisiográficas

La península de Yucatán abarca el mayor porcentaje del Estado cubriendo el 81% del total estatal. En general comprende una gran plataforma continental, compuesta de rocas calcáreas marinas que han emergido desde hace muchos millones de años. Cuenta con terrenos planos y suelos arcillosos, originalmente de antiguas lagunas costeras. Esta provincia se encuentra dividida en dos subprovincias, al extremo norte, la subprovincia de Carso Yucateco y al centro oriente del Estado, la de Carso y Lomeríos de Campeche. Por lo que corresponde a la llanura costera del Golfo sur, ésta cubre el 19% de la superficie estatal y está compuesta de suelos aluviales profundos y grandes zonas inundables y de pantano.

Se destacan los fenómenos relacionados con depósitos fluviales, lacustres, palustres y litorales. Esta región presenta una subprovincia de Llanuras y Pantanos Tabasqueños en la fracción suroeste del Estado.

3.3 Flora y Fauna

El Estado de Campeche cuenta con una gran riqueza natural. Conforme a diversos estudios realizados en la zona, la etnoflora del Estado de Campeche comprende el 48.45% (938 especies) del total de especies que se registran en la Península de Yucatán (Sosa, et al. 1985). Por otra parte, un estudio realizado por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) registra la existencia de 10 tipos de vegetación (selva alta perennifolia, selva mediana subperennifolia, selva mediana subcaducifolia, selva baja perennifolia, Selva baja subperennifolia, selva baja caducifolia, vegetación de dunas costeras, manglar, tular y popal); cuatro sistemas de uso de suelo (pastizal cultivado, agricultura de temporal, agricultura nómada en selva mediana subcaducifolia y en selva mediana subperennifolia, agricultura de riego) y cinco diferentes tipos de hábitat (lagunas, lagunas costeras, esteros, islas/cayos, y áreas sin vegetación aparente).

En cuanto a su fauna, Campeche ocupa el decimosexto lugar a nivel nacional en la diversidad de vertebrados terrestres (Florez Villela y Gerez, 1988). Es importante también señalar la existencia de 15 especies de vertebrados terrestres catalogados en peligro de extinción.

3.4 Áreas Naturales Protegidas

El territorio de Campeche cuenta con 8 áreas protegidas decretadas entre los sistemas ANP (Áreas Naturales Protegidas) estatales y federales (Figura 3.4). Estas áreas abarcan una extensión de 22.9 mil km², es decir 39.5% del Estado.

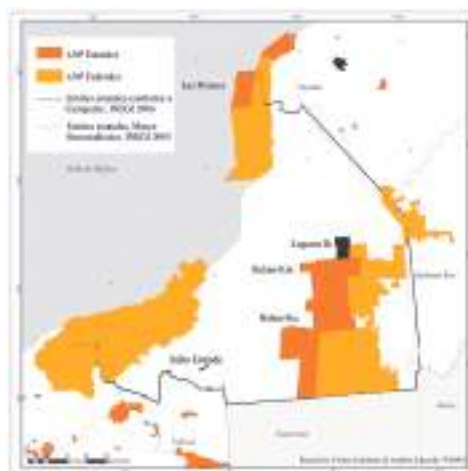


Figura 3.4. Áreas Naturales del Estado de Campeche (CONABIO, CONANP 2007)

Dentro de estas áreas protegidas se destacan las siguientes:

Áreas de protección de flora y fauna: La Laguna de Términos es considerada en su conjunto, como el sistema lagunar más importante del país. Cuenta con un área de 706,148 Ha. decretada como área protegida en el año de 1994, corresponde a la ecoregión de bosques húmedos de Tehuantepec/Bosques húmedos de Yucatán/ Humedales del centro de México.

Áreas de reserva de la biosfera: En este tipo de reserva se destacan dos áreas protegidas. La primera es Calakmul, decretada en el año de 1989 y cuenta con un área de 723,185 Ha, pertenece a la ecoregión de Bosques húmedos de Yucatán/ Bosques húmedos de Tehuantepec. La segunda es el área de los Petenes, decretada como área protegida en el año de 1999 y cubre una extensión de 282,858. Pertenece a la ecoregión de Bosques secos de Yucatán.

3.5 Cambio del uso de suelo

En cambio en el uso del suelo en el Estado de Campeche principalmente está ligado con la explosión industrial y por los cambios de actividades económicas que han ocurrido en los últimos años. Conforme al análisis realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Aprovechamiento Sustentable del Estado de Campeche (SMAAS), existe un importante incremento en la velocidad de pérdida de cobertura vegetal observado en los últimos años, a causa de la expansión de las actividades productivas -entre 1997 y 2002 la frontera agropecuaria creció en 29,540 hectáreas. Cerca de 88.4% de esta nueva superficie es de uso agrícola. En estas condiciones se puede intuir una alta fragilidad ecológica de gran parte del Estado de Campeche (POT Campeche). En la Figura 3.5 se muestra los usos actuales del suelo en el Estado de Campeche.

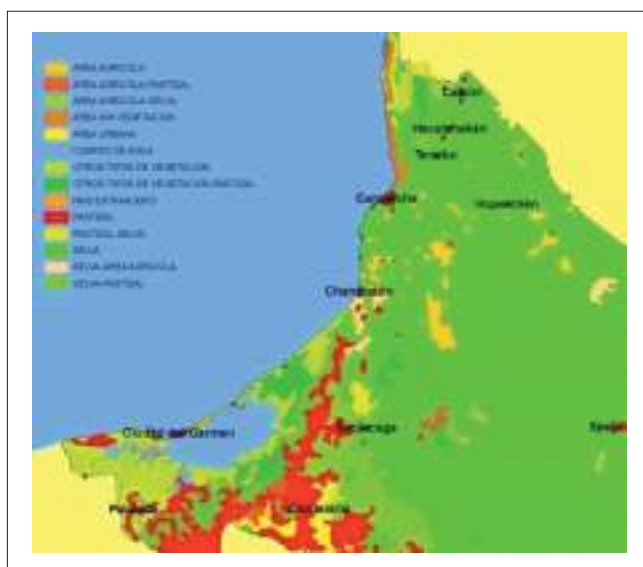


Figura 3.5 Principales usos del suelo en Campeche

3.6 Hidrografía e hidrología

En general, el Estado de Campeche cuenta con 7 cuencas hidrológicas (Figura 3.6) y 2,200 km² de lagunas costeras.

En relación con el componente hídrico del Estado de Campeche, existe un dominio en torno a la abundancia de sistemas lagunares y fluviales en dirección sur y suroeste del Estado. Esta proporción va disminuyendo hacia dirección norte debido a la rápida filtración del agua del subsuelo. En consecuencia, la región sur y suroeste del Estado presenta un exceso importante de agua debido al gran número de ríos que atraviesan la zona. Además, la elevación del terreno hace que cuando llueve en la parte alta del Estado, las aguas tiendan a drenar en dirección sur-oeste. En consecuencia hay todavía mayores riesgos de inundación cuando hay tormenta en la costa y lluvia arriba, estos efectos se concentran en la zona de laguna de términos que es donde descargan la mayor parte de los ríos caudalosos del Estado.

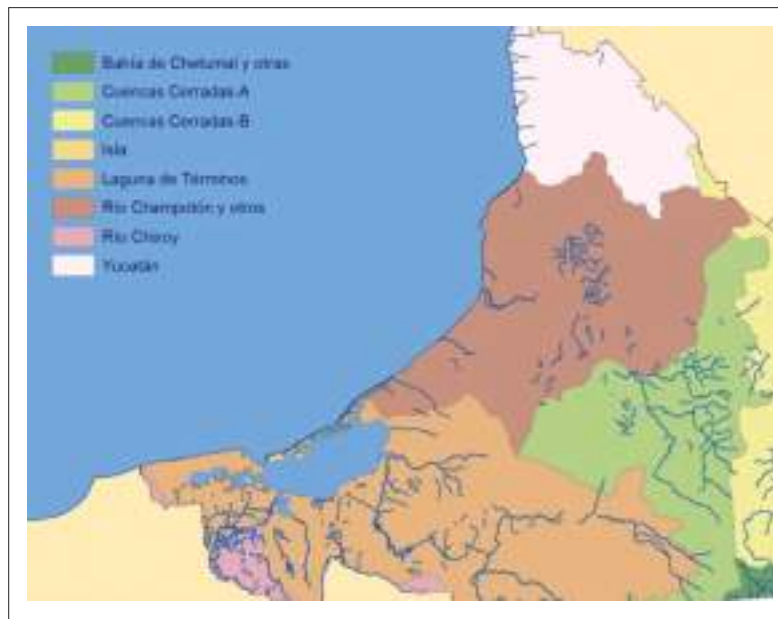


Figura 3.6 Cuencas hidrológicas del Estado de Campeche

3.7 Características económicas

Históricamente, la aportación del Estado de Campeche al Producto Interno Bruto Nacional (PIBN) ha sido dominada por las actividades agropecuarias. Sin embargo, a partir de la década de los años 80, el hallazgo de grandes reservas petroleras aceleró el crecimiento de actividades relacionadas con la explotación de hidrocarburos, llegando a aportar el 85% de PIB a nivel estatal. Actualmente el aporte del PIB del Estado se ubica en el puesto 30 aportando el 1.2% del total Nacional.

El crecimiento del PIB en las últimas décadas ha superado la tasa de crecimiento nacional, creciendo un promedio anual de 6.2% en el periodo de 1970- 2006 frente a sólo un 3.6% del promedio nacional. Sin embargo, si no consideramos la influencia de la extracción petrolera, se tiene un crecimiento de 4.6% que es superior al promedio nacional y se encuentra en el quinto lugar de aportación (Figura 3.7 y 3.8).

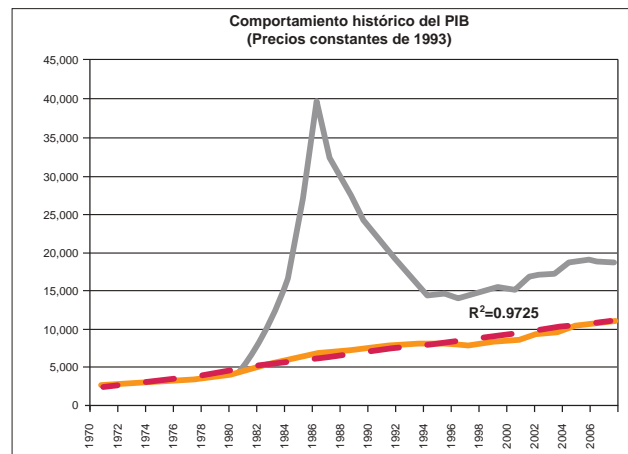


Figura 3.7. Comportamiento histórico del PIB en precios constantes (PDE Campeche)

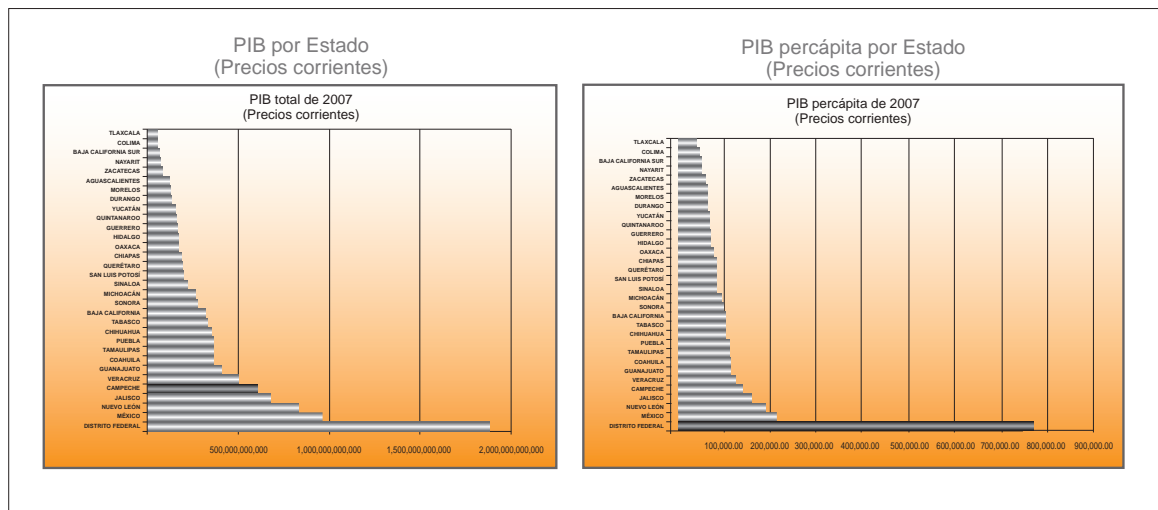


Figura 3.8. PIB por estado y per cápita en precios corrientes (PED Campeche)



4. RESUMEN DEL MEJOR CONOCIMIENTO DISPONIBLE

Cuando se realiza la planificación estratégica del desarrollo del Estado, es de gran importancia conocer cuáles son los impactos esperados del cambio climático, su magnitud y el momento en el que se esperan. La certidumbre sobre la probabilidad de ocurrencia de estos impactos se convierte en una variable crítica a la hora de tomar decisiones que implican nueva infraestructura, o nuevos planes de ordenamiento, u otras decisiones de importante trascendencia.

Como resultado de la revisión del estado del conocimiento sobre los impactos del incremento del nivel del mar sobre la zona costera del Estado de Campeche (ver Apéndice 1), la Tabla 4.1 presenta el resumen del mejor conocimiento disponible organizado por tema de investigación.

Asimismo, de acuerdo al criterio del experto encargado de esta revisión bibliográfica, en esta tabla se presenta una nota que hace referencia a las desventajas y posibles áreas de mejoramiento del conocimiento disponible.

| Tema | Referencia | Tipo de información | Notas |
|--------------------------------|--|--|--|
| Incremento en el nivel del mar | Zavala-Hidalgo et al. (2010) | Datos de nivel del mar del servicio mareográfico nacional (Cd del Carmen). | *Hace falta información a lo largo del estado y no sólo una ciudad. |
| Erosión costera | Torres Rodríguez et al. (2010) | Perfiles de playa en 8 playas e imágenes de diferentes años de la configuración de la costa. Información de satélite de diferente resolución (Landsat) y fotos aéreas. | *Hay mucha incertidumbre asociada a los resultados, por el uso de imágenes con diferente resolución. Además del error que se puede tener durante el proceso de digitalización dependiendo de la resolución espacial del pixel. |
| Inundación costera | Posada-Vanegas y Vega Serratos (2010) | DEM con 3m de resolución y modelado numérico. | *Estimación sólo para la zona urbana de Campeche ciudad. |
| Anidación de tortugas | Bolongaro Crevena et al. (2010) | Perfiles de playa y conteo de nidos. | *Se recomienda replicar el análisis para los Petenes y Cd del Carmen. |
| Marea de tormenta | Posada-Vanegas et al. (2011); Durán (2011) | Modelación numérica de trayectorias históricas y resultados a nivel estatal. | *Proyección lineal en los perfiles de playa medidos de las líneas de incremento del nivel del mar dadas por +40cm, +60cm +80cm y +1m. *Mejorar resolución espacial de los datos. *Se pueden refinar los diagnósticos estimados con mejor batimetría de la zona cercana a la costa. |

Tabla 4.1 Resumen del mejor conocimiento disponible de los impactos del incremento en el nivel del mar en el Estado de Campeche



5. ANÁLISIS HISTÓRICO DE VARIABLES AMBIENTALES

Cuando se intenta estimar la consecuencia del impacto del cambio climático en una variable determinada (precipitación, temperatura), a menudo se recurre a modelos de predicción climática. Estos modelos están formados por un número de ecuaciones que son capaces de simular las condiciones atmosféricas e ilustrar cómo van a cambiar en el tiempo. Otro enfoque muy útil en la estimación de las consecuencias del cambio climático en variables atmosféricas es el análisis de tendencias. Bajo este enfoque, se analiza el comportamiento de una variable en el pasado, y se intenta estimar, basándose en esa evolución hasta la fecha, cómo va a seguir su evolución en el tiempo.

En esta sección se presenta un breve análisis histórico de diferentes variables climatológicas en el Estado de Campeche, junto con un pequeño análisis estadístico de la tendencia de cambio de esas variables. Para este propósito, se utilizó la base de datos histórica de las estaciones hidrométricas instaladas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). La Figura 5.1 presenta la ubicación geográfica estatal de las estaciones hidrométricas. Para este reporte se seleccionaron dos estaciones en función de la cantidad de datos disponibles para el análisis, estas fueron las estaciones correspondientes a Campeche y Escárcega. El análisis se presenta en función de la estimación de los máximos anuales reportados para un periodo de medición de 60 años.

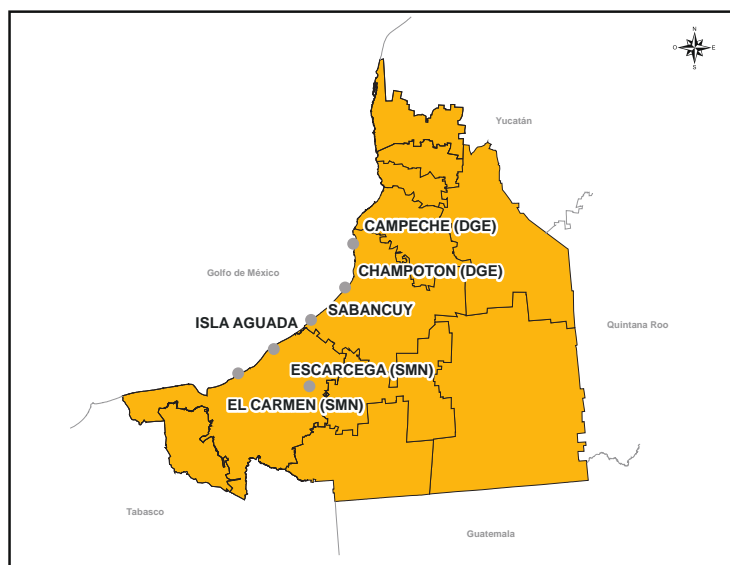


Figura 5.1 Localización geográfica de las estaciones hidrométricas de la CONAGUA en el Estado de Campeche, México

5.1 Precipitación

Los resultados de máximos anuales registrados para la intensidad de precipitación en ambas estaciones se presentan en la Figura 5.2.

En ambos paneles de la Figura 5.2 es evidente una clara tendencia de incremento considerable en la intensidad de la precipitación registrada en el Estado de Campeche. En consecuencia, es posible afirmar con un grado de confianza alto, que los sistemas hidrológicos del Estado resultarán también afectados, pues este incremento en las precipitaciones tiene una incidencia directa en el aumento de la escorrentía y en la anticipación de los caudales máximos de los ríos y su calidad del agua. Particularmente es probable que se incrementen los riesgos de inundaciones en zonas vulnerables ante estos eventos (llanuras de inundación, pantanos, desembocaduras de los ríos). La oscilación observada en la serie de datos, indica la variabilidad natural del clima asociada a la incidencia de fenómenos atmosféricos como el Niño sobre el Estado.

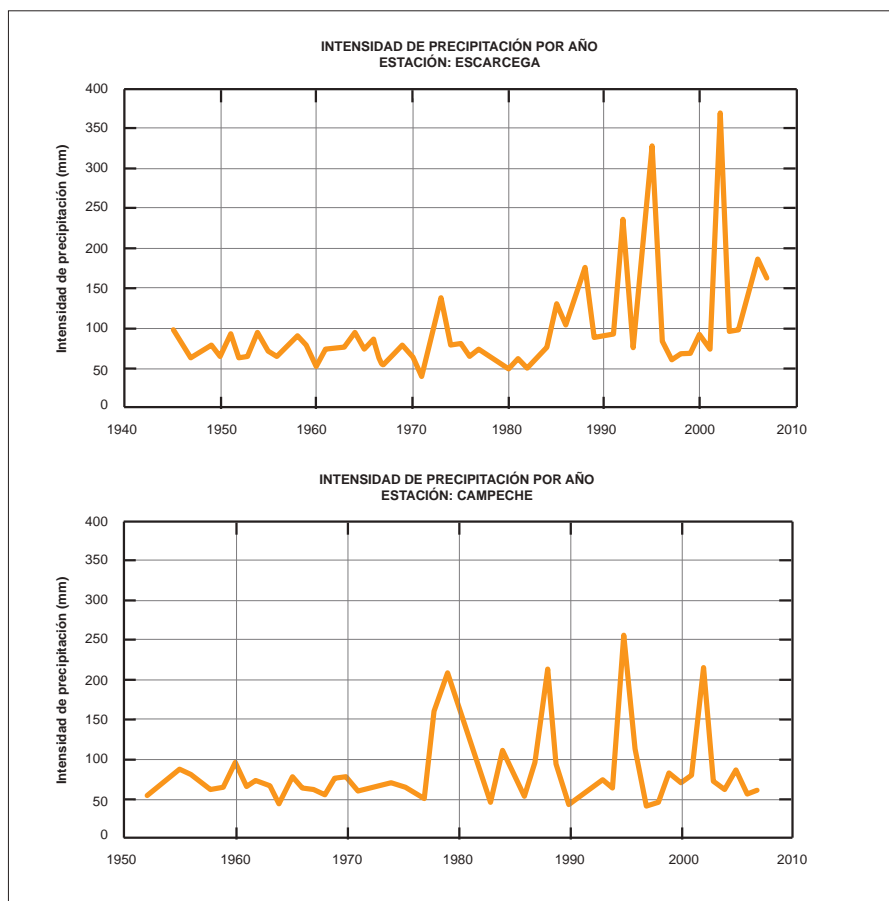


Figura 5.2 Intensidad de precipitación anual para las estaciones de Escárcega (panel superior) y Ciudad de Campeche (panel inferior)

5.2 Temperatura

Las observaciones realizadas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos hacen evidente que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, particularmente por un aumento de la temperatura.

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como se verifica a través de los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de glaciares, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar. De acuerdo con lo publicado en el AR4 (IPCC 2007), de los doce últimos años (1995-2006), once se ubican entre los doce 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 $+0.74^{\circ}\text{C}$ [entre 0.56°C y 0.92°C] es superior a la tendencia correspondiente de $+0.6^{\circ}\text{C}$ [entre 0.4°C y 0.8°C] (1901-2000) indicada en el Tercer Informe de Evaluación (TIE) (ver Figura 5.3). Este aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta y es más acentuado en las latitudes septentrionales superiores. En promedio, las temperaturas del Hemisferio Norte durante la segunda mitad del siglo XX fueron muy probablemente superiores a las de cualquier otro período de 50 años de los últimos 500 años, y probablemente las más altas a lo largo de, como mínimo, los últimos 1300 años.

En consecuencia, esta sección presenta un breve análisis histórico de los máximos anuales de temperatura registrada en el Estado de Campeche en dos estaciones hidrométricas de la CONAGUA que cuentan con la mayor cantidad de datos disponibles.

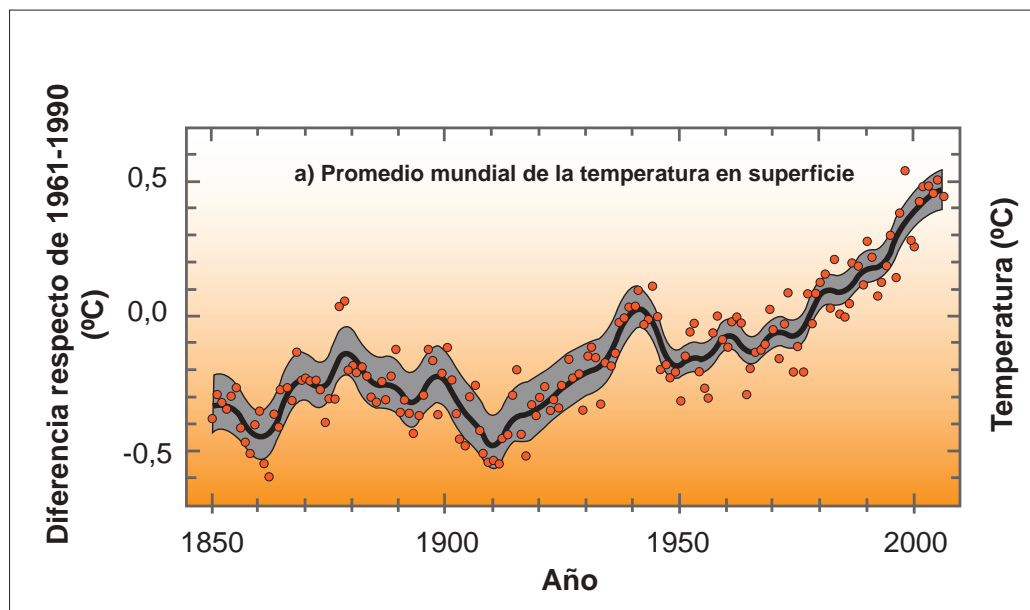


Figura 5.3. Cambios en la temperatura del Hemisferio Norte

La Figura 5.4 presenta los resultados obtenidos a partir de la estimación de los máximos anuales de temperatura de las series históricas correspondientes a las ciudades de Escárcega y Campeche. Los resultados indican una tendencia al alza, aunque con un ritmo de crecimiento mucho menor que el observado para las precipitaciones.

De acuerdo a las líneas de tendencia que se utilizaron para ajustar estos datos, se estima que para la ciudad de Campeche se tiene un incremento lineal ascendente en la temperatura de $+0.023^{\circ}\text{C}/\text{año}$, mientras que con los datos de Escárcega este incremento se cuantificó en $+0.015^{\circ}\text{C}/\text{año}$. Estas anomalías en las temperaturas registradas para el Estado de Campeche, están en sintonía con los valores publicados en el AR4 para América del norte. Sin embargo, cabe resaltar que la mayor parte del aumento observado del promedio mundial de temperatura desde mediados del siglo XX se debe muy probablemente al aumento observado de las concentraciones de gases de efecto invernadero antropogénicos. Por lo tanto, es probable que se haya experimentado un calentamiento antropogénico apreciable en los últimos cincuenta años. El calentamiento observado durante los tres últimos decenios ha ejercido probablemente una influencia discernible a escala mundial sobre los cambios observados en numerosos sistemas físicos y biológicos. Una atribución más completa de causas de las respuestas observadas en los sistemas naturales al calentamiento antropogénico no es, por el momento, posible debido a la brevedad de las escalas temporales contempladas en numerosos estudios de impacto, a la mayor variabilidad natural del clima a escala regional, a la contribución de factores no climáticos, y a la limitada cobertura espacial de los estudios.

De proseguir las emisiones de gases de efecto invernadero a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento aumentaría y el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy probablemente mayores que los observados durante el siglo XX. En consecuencia, se sugiere continuar con el sistema de monitoreo sistemático de variables climáticas del Estado.

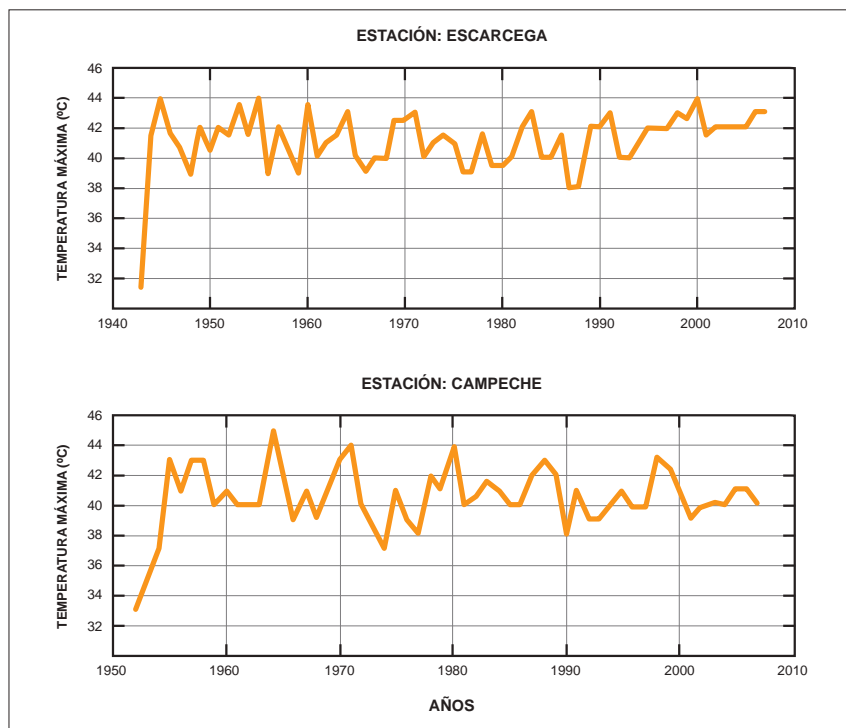


Figura 5.4 Temperaturas máximas anuales para las estaciones de Escárcega (panel superior) y Ciudad de Campeche (panel inferior)

Dentro de los impactos que han sido identificados como consecuencia del cambio anual medio de temperatura, la Figura 5.5 resume aquellos relevantes para el litoral del Estado de Campeche. Entre ellos se señala una alta probabilidad en el incremento de los caudales de los ríos, inundaciones fluviales, más erosión e inundación costeras, lo que traería consigo más estrés sobre zonas de anidación de especies en peligro de extinción (tortugas marinas), pérdidas en los humedales costeros y cambios en los ecosistemas salobres (ej. lagunas costeras), con los consecuentes riesgos de pérdida de reservas de agua dulce. Es necesario hacer notar que es posible cambiar el grado de intensidad de estos impactos en función del grado de adaptación (ej. inversión gubernamental) y la tasa del cambio de la temperatura (ej. control de emisiones de gases de efecto invernadero).

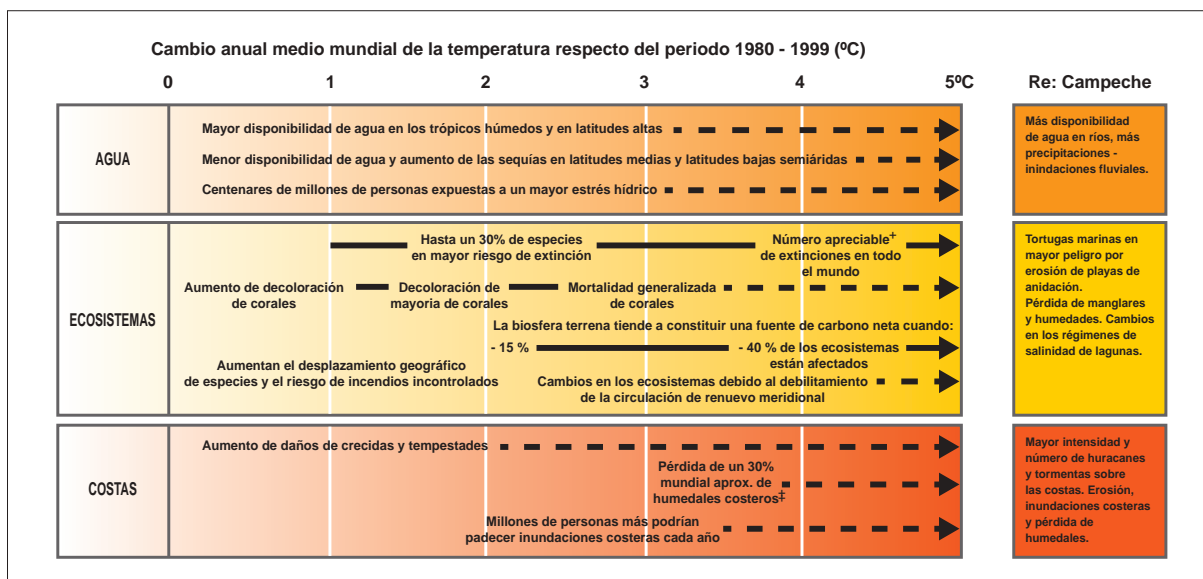


Figura 5.5 Ejemplos de impactos asociados con el cambio anual medio de temperatura

5.3 Número de huracanes

Las observaciones reflejan un aumento de la actividad ciclónica tropical intensa en el Atlántico Norte desde aproximadamente 1970, con escasa evidencia de aumentos en otras regiones. Existe cierto consenso sobre la dificultad para identificar tendencias de mayor largo plazo en la actividad ciclónica (particularmente antes de 1970).

La Figura 5.6 presenta el análisis en el número de huracanes que se han presentado sobre las costas campechanas en los últimos 60 años. En este caso no se aprecia, a partir de los datos históricos, una tendencia clara de incremento en el número de los huracanes sobre las costas. Sin embargo, cabe resaltar que el estudio presentado por Bender et al. (2010) pronostica un incremento en el número e intensidad de los huracanes que se presentarán en el Golfo de México en este siglo, por lo que las conclusiones de este estudio son relevantes para la costa del Estado de Campeche.

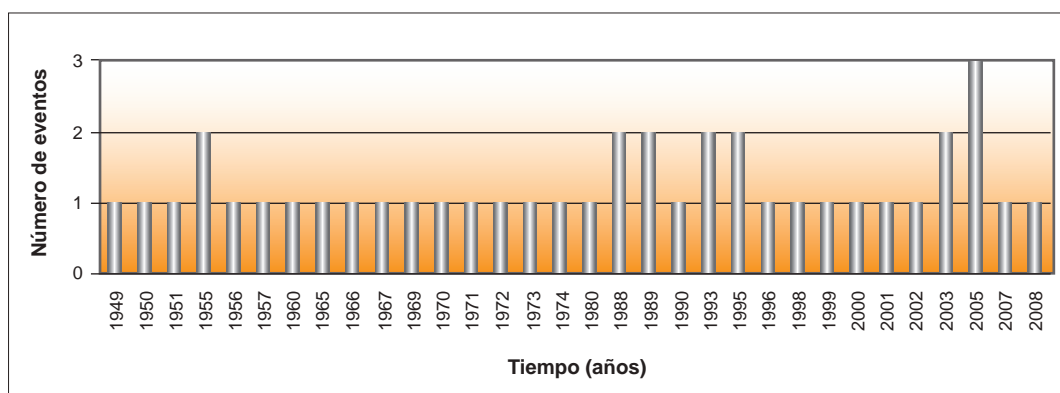


Figura 5.6 Número de huracanes por año para el periodo de tiempo de 1949-2008 (datos tomados de UNISYS Weather para el Estado de Campeche)

La Tabla 5.1 presenta un resumen de los diferentes pronósticos disponibles respecto a los cambios en cuatro variables fundamentales para entender el impacto del cambio climático sobre el litoral del Estado de Campeche. Estas son: el incremento en el nivel medio del mar, precipitaciones máximas, incremento en las temperaturas e incremento en el número e intensidad de huracanes. Para cada una de ellas se presentan predicciones para el corto (~ año 2030) y el largo plazo (año 2100). Adicionalmente, de acuerdo la calidad de la información utilizada, se indica el grado de incertidumbre asociada a las proyecciones de estas variables. Cabe señalar que estos números están ubicados en un orden de magnitud similar al que se publicó en el AR4 del IPCC. La escala de incertidumbre adoptada (incierto, probable y posible) refleja la calidad de la información en el Estado de Campeche, utilizada para sustentar dicho pronóstico. Así un pronóstico incierto indica baja calidad en la información local; probable indica una mejoría en la calidad de la información pero no de la magnitud necesaria para dar confiabilidad al pronóstico; y posible señala una buena calidad en la información que dota de confiabilidad al pronóstico.

| | 2030 | Incertidumbre | 2100 | Incertidumbre |
|--------------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| Incremento en el nivel del mar | +0.1 - 0.5 m | Posible | +0.34 - 1.0m | Posible |
| Precipitaciones | +15 - 42 mm | Probable | +50 -140mm | Probable |
| Temperatura | +0.45 - 0.7°C | Incierto | +1.5 - 2.3°C | Incierto |
| Huracanes | Más severos y frecuentes | Probable | Más severos y frecuentes | Probable |

Tabla 5.1 Predicciones en el corto y largo plazo para diferentes variables climáticas



6. TALLER

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS DEL ESTADO DE CAMPECHE

6.1 Introducción

La organización de este taller se llevó a cabo como parte del análisis ambiental estratégico, con el propósito de obtener lineamientos que sirvan como base para la planificación de los impactos del cambio climático en las zonas costeras del Estado. Se contó con la participación de los actores principales de Estado en relación con los impactos del cambio climático en las zonas costeras (académicos, representantes de sectores relevantes, ingenieros, planificadores gubernamentales, sociedad civil).

La Tabla 6.1 presenta la agenda seguida durante el Taller. El evento comenzó con la presentación de la estrategia del Plan Estatal de Adaptación al Cambio Climático en Campeche (por parte del Dr. Guillermo Villalobos, director del Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, EPOMEX). Posteriormente, se presentaron los trabajos de investigación sobre riesgos naturales que ya se realizan en Campeche, por parte del personal académico del EPOMEX (a cargo del Dr. Gregorio Posada Vanegas). Con el propósito de complementar la visión local del problema, se presentó una visión general de los posibles impactos del incremento en el nivel del mar sobre las zonas costeras bajo dos ejes fundamentales: uno que tiene su base en el mejor conocimiento científico disponible (por parte del Dr. Adrián Pedrozo Acuña – IIUNAM) y otro que se basó en el análisis institucional del Estado (realizada por el Dr. Alberto Rojas).

El Dr. Adrián Pedrozo, ilustró los impactos esperados como consecuencia de efectos de cambio climático en las zonas costeras, haciendo un recorrido por las predicciones de subida del nivel del mar, intensificación de huracanes, subidas de temperatura y cambios en los regímenes de lluvia. Entre sus conclusiones principales se destaca que un incremento de 1 metro del nivel del mar, escenario que puede darse hacia finales de siglo, puede afectar entre el 9 y el 12% de costa de Campeche, lo que afectaría al 58% de la población (154,000 personas en Ciudad del Carmen y 212,000 personas en Campeche). También, que el incremento en número e intensidad de huracanes se ha venido comprobando en las series temporales que existen para el Estado y son corroborados por los modelos globales de cambio climático, lo que supone una gran amenaza para todo el territorio en términos de daños directos, inundaciones, pérdidas de ecosistemas críticos y otros.

Por su parte el Dr. Alberto Rojas, ilustró el panorama institucional nacional en materia de cambio climático, empezando por la creación de la Comisión Intersectorial de Cambio Climático (CC) en 2005, la posterior estrategia nacional de CC en 2007 y el Plan Especial CC en 2009. El Dr. Rojas resaltó que Campeche es uno de los Estados que ha trabajado más extensamente en la zona costera, lo que lo ubica como pionero en el desarrollo de metodologías de ordenamiento costero a nivel nacional.

| | |
|---------------|---|
| 09:00 – 09:15 | <ul style="list-style-type: none"> • Bienvenida y presentación M A. Chuc |
| 09:15 – 09:30 | <ul style="list-style-type: none"> • Objetivos del taller, programa, resultados esperados R. Damania, C. Herrera |
| 09:30 – 09:45 | <ul style="list-style-type: none"> • Presentación de participantes (30 segundos cada persona) Participantes |
| 09:45 – 10:10 | <ul style="list-style-type: none"> • Zonas costeras del Estado de Campeche G. Posada |
| 10:10 – 10:45 | <ul style="list-style-type: none"> • Impactos del cambio climático en Costas, análisis institucional, análisis económico; A. Pedrozo, A. Rojas |
| 10:45 – 11:15 | Receso |
| 11:15 – 11:45 | <ul style="list-style-type: none"> • Discusión sobre las presentaciones, preguntas clave C. Herrera, A. Pedrozo, D. Mira |
| 11:45 – 12:15 | <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de una visión compartida por los participantes (15 min) • 3-5 objetivos principales para lograr la visión (incluyendo plazos necesarios) (7 min) • Identificación de valores principales (8 min) C. Herrera y grupos |
| 12:15 – 13:30 | <ul style="list-style-type: none"> • Matrices de impacto y priorización. • Explicación de la metodología; Riegos climáticos; Discusión sobre escenarios y proyecciones; análisis de impactos de las variables clave seleccionadas: subida del nivel del mar, cambios en temperatura, intensificación de tormentas, inundaciones; incertidumbre. C. Herrera y grupos |
| 13:30 – 14:30 | Comida |
| 14:30 – 15:30 | <ul style="list-style-type: none"> • Continuación de Matrices de impacto y priorización. • Opciones de adaptación, identificación de prioridades, lagunas de información. C. Herrera y grupos |
| 15:30 – 15:45 | Receso |
| 15:45 – 17:00 | <ul style="list-style-type: none"> • División en grupos de trabajo reducidos para discutir/refinar preocupaciones clave e ideas sobre riesgos, opciones de adaptación, prioridades, lagunas de información |
| 17:00 – 18:30 | <ul style="list-style-type: none"> • Presentación por cada grupo sobre la discusión, ideas y conclusiones principales (15 min cada grupo) • Discusión general entre los participantes (15 min) <ul style="list-style-type: none"> • Síntesis final del día (15 min) C. Herrera, D. Mira, P. Posas |
| 18:30 – 18:45 | <p>Clausura E. Rivera, R. Damania</p> |

Tabla 6.1 Agenda del Taller: Impactos del Cambio Climático en las Costas del Estado de Campeche

Tras hacer un análisis de 4 de los 6 Planes Municipales de Desarrollo de los municipios costeros, solamente el de Ciudad del Carmen incorpora temas de cambio climático y manejo integrado de zonas costeras. Aún así, este plan municipal es de los primeros a nivel nacional en incorporar estas consideraciones, y puede ser utilizado como ejemplo en el Estado para replicarlo de forma adecuada en otras zonas igual de vulnerables.

Una vez sentadas las bases para la discusión de los posibles impactos del incremento en el nivel del mar sobre las costas del Estado, se solicitó a los participantes que desarrollaran su visión particular para el Estado, en otras palabras se les pidió que contestaran la pregunta: ¿qué tipo de Estado quieren tener en 10 años? Posterior a la exposición de las ideas de algunos de los participantes, se encontró un consenso general respecto al desarrollo de un Estado que aproveche sustentablemente sus recursos, con respeto a la naturaleza, bajo un prisma de solidaridad, respeto y compromiso.

La respuesta a esta pregunta, permitió la identificación de los dos sectores que se analizaron durante el taller: asentamientos urbanos e infraestructura costera y ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo.

6.2 Impactos del cambio climático en las costas del Estado de Campeche

La división de los participantes del taller en dos grupos, permitió el análisis de los impactos del cambio climático en la zona costera del Estado bajo dos perspectivas fundamentales: la de asentamientos urbanos e infraestructura costera y la de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo. En el primer grupo se consideraron los efectos que el cambio esperado de ciertas variables seleccionadas (temperatura, precipitación, huracanes y otras) causa y causará en un futuro sobre asentamientos humanos, la infraestructura de comunicaciones y servicios, fuentes de agua potable, salud y seguridad alimentaria. Mientras que el segundo grupo hizo énfasis en los impactos sobre la conservación de tortugas, los pastos marinos, los arrecifes, los manglares, las lagunas costeras, la erosión costera, la pesquería y el turismo (atractivos e infraestructura).

6.2.1 Metodología

La metodología seleccionada permite la identificación sistemática y ordenada de los riesgos que supone el cambio climático, la definición de las vulnerabilidades que conlleva, la selección de opciones de adaptación para reducir esta vulnerabilidad, y finalmente la priorización de los resultados. Consiste en seis pasos específicos y que los participantes van realizando a través de acuerdos y consensos, a través de un facilitador profesional de la sesión.

El punto de partida es la determinación de la importancia de los factores de cambio climático que sean relevantes para el sector en estudio. A partir de los análisis de cambio climático y predicciones para el Estado de Campeche, se identifican los factores que tienen mayor relevancia para los sectores analizados. Como se están considerando los impactos del cambio climático en zonas costeras, los factores seleccionados de forma consensuada con todos los participantes fueron: incremento en el nivel medio del mar, variación de la precipitación media, variación de la temperatura, cambios en intensidad y número de huracanes, e incrementos en marea de tormenta. Esos factores se incorporan a una matriz para formar la primera columna.

A continuación se realiza una clasificación de la variabilidad de los factores climáticos de acuerdo con su verosimilitud de ocurrencia. Esta clasificación se hace basándose en una detallada revisión de la literatura (ver Anexos), en los análisis de tendencias, predicciones de modelos globales del clima y opinión de los expertos (presentada en la Tabla 5.1. Con esta clasificación se establece una escala de colores para identificar en la matriz la confiabilidad de los factores mencionados.

Posteriormente los participantes identifican las variables que pueden ser impactadas por estos factores de cambio climático. El primer renglón de la matriz se llena con los enunciados que representan los aspectos del tema general que se desea analizar. Por ejemplo, para el sector infraestructura se seleccionó asentamientos humanos, fuentes de agua potable, y otros.

Llegados a este punto, los participantes construyen la matriz de impactos, que tiene como propósito asociar la probabilidad de ocurrencia de la variable de cambio climático y por columnas el nivel del efecto negativo esperado (ver Tabla 6.2). En cada celda de la matriz de impactos, se escribe un enunciado que corresponda al impacto que podría esperarse, de acuerdo con la opinión de los expertos, para un tema particular, ante la variable climática correspondiente al renglón en estudio.

Los impactos identificados se califican en función del riesgo que representan; para ello, se utiliza la matriz de riesgos que tiene por renglones la posibilidad de que ocurra la variable de cambio climático y por columnas el nivel del efecto negativo esperado. Los niveles de riesgo son cualitativamente valorados por los participantes entre Bajo, Medio, Alto y Extremo. Así se colorea cada celda con lo que se logra identificar de manera objetiva aquellas que tienen mayores riesgos.

El siguiente paso es la identificación de las medidas de adaptación para reducir la vulnerabilidad. Se hace construyendo la matriz de adaptación, de manera similar a la de impactos pero donde cada celda de la matriz se llena con la o las medidas de adaptación que los expertos consideran pertinentes ante los impactos esperados conforme a la matriz de impactos.

Adicionalmente, se califica la vulnerabilidad de las medidas de adaptación a partir de la capacidad de adaptación y del impacto potencial en el Estado (ver Tabla 6.3). Los resultados que se generan a partir de estas matrices son considerados representativos de la capacidad de adaptación de las zonas costeras del Estado bajo ambas perspectivas de análisis seleccionadas (infraestructura y medio ambiente).

Gracias a este método de análisis exhaustivo y participativo, es posible relacionar, a partir de la identificación de cadenas causales (que relacionan el cambio en variables climáticas con sus efectos o impactos sobre las actividades y activos del sector analizado) los riesgos relativos que el cambio climático añade a la situación actual. Estos riesgos son priorizados en función de la posibilidad de ocurrencia de cada escenario y el grado de gravedad de sus consecuencias.

El valor del método usado consiste en incorporar la experiencia de especialistas en los temas específicos, quienes tienen la sensibilidad para calificar la gravedad del impacto de las variables climáticas y también los conocimientos para definir y evaluar las medidas de adaptación. Su participación en la etapa de jerarquización es fundamental porque conocen otros factores locales que inciden en la viabilidad de las medidas seleccionadas. La jerarquización es fundamental, ya que permite definir en qué temas se requiere ampliar los estudios y en cuáles es posible y necesario actuar en forma inmediata o en el mediano y largo plazos, lo que constituye un instrumento importante para la programación adaptativa de acciones. Durante el taller se tomó como referencia temporal las proyecciones de cambio climático para el año 2100, presentadas para incrementos en el nivel medio del mar, la temperatura, las precipitaciones y el número de huracanes sobre las costas de Campeche (ver Tabla 5.1).

Al final de taller se identificaron más de 25 medidas de adaptación, algunas más prioritarias y/o factibles que otras. Destacan las medidas de monitoreo y extensión del conocimiento científico, medidas de manejo integrado, de prevención (incendios, erosión y desastres naturales), de planeación (del territorio, de los desarrollos turísticos), de restauración y protección, y de infraestructura (nuevos códigos de construcción, recolección de agua de lluvia, energías alternativas).

| | | Consecuencias | | | |
|--------------------|----------|----------------------|-----------|---------|---------|
| | | Menores | Moderadas | Mayores | Severas |
| Posibilidad | Baja | Bajo | Bajo | Bajo | Bajo |
| | Mediana | Bajo | Medio | Medio | Alto |
| | Alta | Bajo | Medio | Alto | Alto |
| | Muy alta | Bajo | Medio | Alto | Extremo |

Tabla 6.2 Matriz de impactos que asocia la probabilidad de ocurrencia vs el nivel de riesgo esperado, utilizada en ambas mesas de trabajo

| | | Capacidad de adaptación | | |
|--------------------------|---------|--------------------------------|----------|----------|
| | | Baja | Media | Alta |
| Impacto potencial | Extremo | Alta | Alta | Moderada |
| | Alto | Alta | Alta | Moderada |
| | Medio | Moderada | Moderada | Baja |
| | Bajo | Baja | Baja | Baja |

Tabla 6.3 Matriz de adaptación que presenta la relación entre un impacto potencial vs la capacidad de adaptación del Estado, utilizada en ambas mesas de trabajo

6.3 Mesa de trabajo desde una perspectiva de infraestructura

A partir de la aplicación del método elegido, en la mesa de trabajo de infraestructura se generó una matriz de impactos que se presenta en la Tabla 6.4. Los factores de cambio climático utilizados, proyectados a 2100, son los siguientes:

- Incremento en el nivel medio del mar
- Variación de la precipitación media
- Variación de la temperatura
- Huracanes
- Marea de Tormenta

Como punto inicial para el análisis, el grupo de trabajo decidió focalizarse en seis categorías o temas de interés. Estos son:

- Asentamientos humanos
- Infraestructura de comunicaciones
- Infraestructura de servicios
- Fuentes de agua potable
- Salud pública
- Seguridad alimentaria

Entrecruzando los factores anteriores con las seis categorías, los participantes construyeron la matriz de la Tabla 6.4. Posteriormente se valoró la capacidad actual de adaptación en cada caso, asociándola a su vez con un nivel de riesgo. Esto define la matriz de las medidas de adaptación, que incluye cierta prioridad asociada en función de su nivel de vulnerabilidad (colores rojos).

| Matriz de impactos | Asentamientos humanos | Infraestructura de comunicaciones | Infraestructura de servicios |
|--------------------------------------|---|---|---|
| Incremento en el nivel medio del mar | Inundaciones y desplazamiento de la población | Desplazamiento de la infraestructura | Desplazamiento de la infraestructura |
| Variación de la precipitación media | Inundaciones fluviales y desplazamiento de laderas | Deterioro | Saturación de drenaje |
| Variación de la temperatura | Incremento en la demanda de agua; disminución en el confort de las viviendas | | Incremento de servicios |
| Huracanes | Inundaciones costeras ; daños a edificaciones; daños a embarcaciones | Interrupción del flujo vehicular | Inhabilitación de infraestructura por daños |
| Marea de tormenta | Inundaciones costeras; aislamiento; daños a verificaciones por socavación o corrosión | Deterioro de la infraestructura por erosión | Inhabilitación de infraestructura por daño |

Tabla 6.4 Matriz de impactos bajo una perspectiva de infraestructura y asentamientos humanos

Así la matriz que se presenta en la Tabla 6.5 contiene las posibles medidas de adaptación identificadas por los expertos que se pueden llevar a cabo a efectos de reducir la vulnerabilidad de la infraestructura y asentamientos humanos en las zonas costeras del Estado ante los impactos de cambio climático.

| Matriz de adaptación | Asentamientos humanos | Infraestructura de comunicaciones | Infraestructura de servicios |
|--------------------------------------|--|--|--|
| Incremento en el nivel medio del mar | Sistemas de infraestructura sobre elevación de bordos: reordenamiento de usos del suelo; reubicación o cambio de tipología en edificios | Reubicación o readaptación de infraestructura | Reubicación de la infraestructura |
| Variación de la precipitación media | Sistemas de infraestructura sobre elevación de bordos: reordenamiento de usos del suelo; mantenimiento a flujos naturales; reforestación | Programas de conservación y mantenimiento; adecuación de normas sobre carreteras | Conservación y mantenimiento del sistema de drenajes; adecuación de la infraestructura |
| Variación de la temperatura | Políticas públicas para aprovechamiento de agua; Construcción de casas con nuevas tecnologías y materiales; | | Adecuación de la normatividad; uso de nuevas tecnologías |
| Huracanes | Desarrollo de capacidades locales para atención de emergencias; sistemas de alerta; fondos locales para atención de emergencias; | Adecuar la infraestructura en los puntos de mayor riesgo y adecuación de infraestructura; sistemas de alerta | Adecuar la infraestructura en los puntos de mayor riesgo y adecuación de infraestructura; sistemas de alerta; estudio del comportamiento de fenómenos hidrometeorológicos extremos |
| Marea de tormenta | Protección al pie de las estructuras; protección y sobre elevación de bordos | Protección de la infraestructura con rellenos; enrocamientos | Adecuar la infraestructura en los puntos de mayor riesgo y adecuación de infraestructura; sistemas de alerta; estudio del comportamiento de fenómenos hidrometeorológicos extremos |

Tabla 6.5 Matriz de adaptación bajo una perspectiva de infraestructura y asentamientos humanos

| Fuentes de agua | Salud | Seguridad alimentaria |
|--|---|---|
| Intrusión salina; disminución de la disponibilidad | | Cambio de uso de suelo; disminución en la producción pesquera |
| Escasez | Aumento de vectores; desnutrición | Disminución en la producción alimentaria; cambio de uso de suelo; cambios en patrones de producción |
| Aumento de la demanda | Morbilidad; incremento de estrés; incremento de vectores; enfermedades infecciosas y cutáneas | Deterioro de la calidad de alimentos; incremento en costos de alimentos; Aumento del estrés vegetal |
| Intrusión salina | Daños a la salud; incremento de vectores | Aumento del estrés vegetal; interrupción en la distribución de alimentos |
| Intrusión salina | Incremento de accidentes; fallecimientos; falta de acceso a servicios de salud | Interrupción en la distribución de alimentos |

| Fuentes de agua | Salud | Seguridad alimentaria |
|--|--|---|
| Relocalización de pozos; estudios del comportamiento geohidrológico; implementación de medidas para uso eficiente del agua; diseño de instrumentos de legislación sobre uso de suelo (actividades con altas descargas de materia orgánica) | | Estudios de especies resistentes a aguas salobres; reubicación de áreas de cultivo; restauración de humedales; |
| Incremento de la capacidad de almacenamiento; medidas de uso eficiente del agua; Relocalización de pozos | Organizar los servicios de salud para otorgar una respuesta inmediata en los niveles de atención; manejo adecuado de las enfermedades diarreicas | Estudios de especies resistentes a aguas salobres; reubicación de áreas de cultivo; restauración de humedales; alternativas agroecológicas para el manejo de humedad del suelo |
| Medidas de uso eficiente del agua; establecimiento de tarifas que reflejen el valor del agua con subsidios a usuarios con menor capacidad económica | Emisión de alertas sanitarias; guías clínicas; | Manejo adaptativo de los cultivos; mejora y selección de variedades; aplicación de subsidios diferenciados |
| | Emisión de alertas sanitarias; campañas de vacunación | Diseño de medidas precautorias para manejo de alimentos; racionalidad en el manejo de productos básicos |
| Medidas de uso eficiente del agua; relocalización de pozos | Sistemas de alerta; desarrollo de capacidades para atención de emergencias | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #e67e22; margin-right: 5px;"></div> Alta vulnerabilidad </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #f39c12; margin-right: 5px;"></div> Media vulnerabilidad </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #f9b24d; margin-right: 5px;"></div> Baja vulnerabilidad </div> |

6.4 Mesa de trabajo desde una perspectiva de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo

En la mesa de trabajo de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo se produjo una matriz de impactos que se presenta en la Tabla 6.6. Las características de cambio climático utilizadas fueron las proyecciones para el año 2100, a saber:

- Incremento en el nivel medio del mar
- Variación de la precipitación media
- Variación de la temperatura
- Huracanes
- Marea de Tormenta

| Matriz de Impactos | Conservación tortuga | Pastos marinos | Arrecifes | Manglares |
|-----------------------------------|--|--|---|--|
| Incremento nivel mar | Pérdida hábitat. Cambio en zonas de anidación. Alteraciones reclutamiento. Cambio dinámica poblacional. | Cambio distribución (temporal) | Cambios desarrollo. Cambios distribución. Cambio cobertura. | Cambio desarrollo de la planta. Cambio abundancia especies. Cambio diversidad especies, distribución, pérdida cobertura. |
| Variación Precipitación (aumento) | Modificación patrón de gestación. Afectación al éxito reproductivo. | Reducción cobertura en L. de Términos. Incremento cobertura en Los Petenes. | Reducción cobertura. Cambios desarrollo. | Cambio desarrollo de la planta, dominancia, diversidad, distribución. |
| Variación Temp (aumento) | Modificaciones patrones gestación. Modificación proporción sexos. Alteraciones reclutamiento. Incremento prevalencia enfermedades. | Cambio dominancia especies. Modificación distribución especies. Incremento prevalencia enfermedades. | Blanqueamiento y mortandad. Enfermedades y depredadores. Cambio distribución. Cambio cobertura. | Cambio desarrollo, dominancia, diversidad, distribución. Incremento incendios forestales. Salinización. Pérdida cobertura. |
| Huracanes / marea tormenta | Cambio zonas anidación. Pérdida nidos. Alteraciones reclutamiento. Mortandad. | Pérdida temporal de cobertura. | Pérdida permanente cobertura. Cambios distribución. | Cambio desarrollo, distribución, pérdida floración, cobertura. |
| Hidrodinámica | Alteración dominancia especies. Modificación distribución especies. | Alteraciones en el desarrollo y cambio de cobertura. | Cambios en el desarrollo. | Cambio desarrollo, dominancia, diversidad, distribución, cobertura. |

Tabla 6.6 Matriz de impactos bajo una perspectiva de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo

En este caso, el grupo de trabajo decidió centrar el análisis en nueve categorías o temas de interés. Estos son:

- Conservación de tortugas
- Pastos marinos
- Arrecifes
- Manglares
- Lagunas costeras
- Erosión costera
- Pesquerías
- Atractivos turísticos
- Infraestructura turística

La matriz de riesgo en este caso se presenta en la Tabla 6.6, a partir de la cual se valoró la capacidad existente de adaptación en cada caso, y asociándola a su vez con un nivel de riesgo. La matriz de adaptación resultante se presenta en la Tabla 6.7, que señala las prioridades de adaptación de los ecosistemas, biodiversidad y turismo litoral campechanos a impactos del cambio climático, consensadas por los expertos locales y nacionales.

| Lagunas costeras | Erosión costera | Pesquerías | Atractivos Turísticos | Infraestructura turística |
|--|---|---|--|--|
| Incremento superficie. Cambio morfología. | Aumento erosión. Variación granulometría. Pérdida infraestructura. Cambio morfología costera. | Cambio distribución y abundancia especies. Reducción distancia de captura. | Pérdida playas. Pérdida manglar y ecoturismo. | Daño / pérdida infraestructura. Mayor costo mantenimiento. |
| No Determinado. | Cambio morfología costera (en las desembocaduras, deltas). | Cambios distribución y abundancia. | Pérdida flujo turístico, cambio estacionalidad. Mayor costo mantenimiento. | Mayor costo mantenimiento, mayor costo drenaje. Oportunidad recolección agua. |
| Eutrofización. Modificación distribución y composición especies. Cambio composición de nutrientes. | Cambios en vegetación de dunas. | Cambios distrib. y abundancia. Presencia enfermedades. Alteración proporción sexos. | Temporalidad y estacionalidad turística. | Mayor demanda energía y agua. |
| Cambio en morfología. Modificación distribución y composición especies. Azolve. Eutrofización. | Cambio morfología costera (cambio rápido). | Modificación hábitats, incremento mortalidad, alteración distrib. y abundancia. | Pérdida calidad atractivo turístico. Alteraciones atractivos turísticos. | Mayor costo mantenimiento, costo nueva infraestructura. Daño / pérdida de infraestructura. |
| Modificación/distribución y composición especies, asolve, cambio composición nutrientes. | Cambio morfología costera. | Alteraciones en distribución y abundancia. | Igual a la de arriba. | Igual que arriba. |

| Matriz de Impactos | Conservación tortuga | Pastos marinos | Arrecifes | Manglares |
|-----------------------------------|--|--|---|---|
| Incremento nivel mar | Restauración. Protección. Rehabilitación. | Monitoreo. | Sustratos artificiales. Cultivos para restaurar. Monitoreo. | Programa manejo integral en las 2 ANP. Rehabilitación y restauración. |
| Variación Precipitación (aumento) | Incubación controlada. | Programa de manejo, trasplantes, reforestación. Monitoreo. | Monitoreo. | Igual. |
| Variación Temp (aumento) | Incubación controlada. | Evaluación y monitoreo. | Programa de conservación de especies resistentes. | Plan preventivo de incendios. Programa manejo integral. Mantenimiento / restauración flujos hídricos. |
| Huracanes / marea tormenta | Traslado preventivo de nidos. Reubicación. | Programa de manejo, trasplantes, reforestación. Monitoreo. | Restauración con estructuras artificiales que sirven de base. | Rehabilitación. Mejoras de drenaje. |
| Hidrodinámica | Programa monitoreo de especies. | Programa Monitoreo biológico. | Programa Monitoreo biológico y físico. | Programas de manejo. |

Tabla 6.7 Matriz de adaptación bajo una perspectiva de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo

| Lagunas costeras | Erosión costera | Pesquerías | Atractivos Turísticos | Infraestructura turística |
|--|---|--|---|--|
| Monitoreo morfología costera. Evaluación de la variación del perfil de costas. Análisis de detección de cambios. Desasolves. | Obras de ingeniería. Planeación. Monitoreo. | Monitoreo. Estudios dinámica poblacional de peces. Reglamentación de capturas. Campaña de concientización de consumidores. Normatividad desarrollo y cumplimiento. | Estructuras de protección. Diversificación del turismo actual, ecoturismo. Entrelazar programas de restauración y ecoturismo. | Ordenación de actividad turística. Fortalecimiento de normatividad. Cambio de códigos constructivos. |
| | Programa de monitoreo y saneamiento de bocas estuarinas. Desasolve. | Monitoreo. Estudios dinámica. | Diversificación de turismo, turismo de avistamiento de aves, diversificación de oferta turística, turismo rural. | Proyectos de recolección y recuperación de agua de lluvia. Incentivar eficiencia de infraestructura. Programa de sensibilización de usos del agua. |
| Monitoreo calidad agua. Estudio tiempos de residencia. Programa de saneamiento para poblaciones que aportan carga orgánica. | Programa recuperación vegetación de las dunas en las dos ANP. | Monitoreo y dinámica. Acuicultura. | Igual. | Proyectos de energía alternativa, sistemas de ahorro y eficiencia energética. |
| Sistema de monitoreo remoto. Obras de ingeniería de protección en bocas cerradas. | Obras de ingeniería. Planeación territorial con normatividad. | Monitoreo. Programa de acuicultura con zonificación de áreas poco vulnerables. | Programas preventivos de atractivos culturales, mantenimiento, restauración, mantenimiento de accesos. | Instrumentos económicos (seguros). Regulación de la construcción. Programa de reforzamiento de estructuras existentes. |
| | Monitoreo. | | | |



Alta vulnerabilidad
Media vulnerabilidad
Baja vulnerabilidad



7. ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DE ADAPTACIÓN

En esta sección se presenta un breve análisis de las opciones de adaptación identificadas en ambas mesas de trabajo, para lo cual se evalúa cada una de las medidas propuestas con los siguientes criterios:

- Nivel de urgencia de implementación, definida en función del nivel de vulnerabilidad percibido por los expertos (derivado del ejercicio previo)
- Costo relativo estimado
- El tiempo estimado para implementar la medida a partir de su nivel de desarrollo actual
- La efectividad para controlar o adecuarse a los cambios posibles
- Las condiciones institucionales, según se perciban como adversas, adecuadas o propicias para la implantación de la medida

| Medida de adaptación propuesta | Nivel de urgencia (1 a 3) | Costo (1,2,3) Bajo/medio/alto | Efectividad (1,2,3) Alto/medio/Bajo | Condiciones Institucionales (1,2,3) propicias/ adecuadas/adversas |
|---|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---|
| Sobre elevación de bordos | 3 | 3 | 2 | 2 |
| Reubicación de infraestructura | 3 | 3 | 1 | 2 |
| Legislación sobre el uso de suelo | 3 | 2 | 1 | 2 |
| Restauración de humedales | 3 | 3 | 2 | 1 |
| Mantenimiento del sistema de drenajes | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Relocalización de pozos de agua potable | 3 | 3 | 2 | 3 |
| Reubicación de áreas de cultivo | 3 | 3 | 2 | 2 |
| Reforestación | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Normatividad | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Emisión de alertas sanitarias | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Sistemas de alerta temprana | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Investigación sobre fenómenos extremos | 2 | 2 | 1 | 1 |

Tabla 6.8 Matriz de adaptación bajo una perspectiva de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo

Los criterios globales se definen en primer término a partir de la necesidad de reducir la vulnerabilidad (de acuerdo con el resultado de la matriz de vulnerabilidad) y en segundo en virtud de la viabilidad general de las medidas (que consideraría de manera agregada los criterios de costo, tiempo de implementación, efectividad y condiciones del entorno institucional). De esta forma se construye la matriz de adaptación que se presenta en la Tabla 6.8, que contiene las calificaciones obtenidas para cada medida considerada de forma individual bajo cada uno de los criterios, sin tomar en cuenta el costo agregado, tiempo de adaptación y condiciones del entorno institucional. Esta matriz se generó dentro de la mesa de infraestructura y asentamientos humanos, de la combinación de resultados reportados en las matrices de impactos y vulnerabilidad.

Con el propósito de definir un orden de viabilidad general, se siguió la metodología propuesta en el reporte de Contribución para la formulación del Plan de Acción frente al Cambio Climático del Estado de Michoacán presentado al Banco Mundial por Herrera Toledo et al. (2010).

De esta forma, se asimiló el conjunto de calificaciones a un vector de desempeño n-dimensional y se obtuvo el módulo de la calificación por medio del cálculo de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las calificaciones individuales. La jerarquización respecto a la viabilidad se define en orden ascendente de acuerdo al módulo de la calificación obtenida para cada medida de adaptación. El resultado del desempeño de las medidas de adaptación desde una perspectiva de infraestructura y asentamientos humanos se presenta en la Tabla 6.9.

| Medida de adaptación propuesta | Nivel de urgencia (Vulnerabilidad) | Viabilidad |
|---|------------------------------------|------------|
| Investigación sobre fenómenos extremos | 2 | 1 |
| Reforestación | 3 | 1 |
| Normatividad | 2 | 1 |
| Mantenimiento del sistema de drenajes | 3 | 1 |
| Sistemas de alerta temprana | 2 | 2 |
| Legislación sobre el uso de suelo | 3 | 3 |
| Restauración de humedales | 3 | 4 |
| Emisión de alertas sanitarias | 2 | 5 |
| Reubicación de áreas de cultivo | 3 | 6 |
| Sobre elevación de bordos | 3 | 7 |
| Reubicación de infraestructura | 3 | 7 |
| Relocalización de pozos de agua potable | 3 | 8 |

- +++ Viable
- ++ Viable
- + Viable
- o Viable
- Viable
- Viable
- Viable

Tabla 6.9 Desempeño de las medidas de adaptación definidas desde una perspectiva de infraestructura y asentamientos humanos

De acuerdo con la viabilidad identificada para cada medida de adaptación propuesta por el grupo de análisis bajo una perspectiva de infraestructura y asentamientos humanos, se rescatan como más viables las siguientes medidas:

- Investigación sobre fenómenos extremos, esto se debe a la consolidación de la masa crítica científica al interior del centro EPOMEX, quienes ya han comenzado con esta labor (ej. marea de tormenta)
- Reforestación, por la facilidad que conlleva la implementación de esta medida
- Normatividad, como resultado de la sinergia que ya ha sido impulsada a nivel estatal a través de la SMAAS por medio de los planes de acción contra el cambio climático
- Mantenimiento en los sistemas de drenaje, debido a que a pesar de representar un gasto corriente no requiere una inversión mayor en comparación con la construcción de nueva infraestructura

Por otra parte las medidas que han sido clasificadas como menos viables son:

- Reubicación de áreas de cultivo, en este caso la reubicación de zonas de cultivo es complicada desde el punto de vista social por el carácter ejidal de estas áreas. Su implementación requiere de una labor de convencimiento de los ejidatarios y el establecimiento de nuevas estrategias de comunicación de los riesgos a los que están expuestos dentro de las zonas que actualmente se ocupan
- Sobre elevación de bordos, tiene una complejidad de ejecución dado que esta actividad cae dentro del área de competencia federal a cargo de la CONAGUA, el Estado de Campeche no está facultado para autorizar este tipo de obras. Para facilitar su implementación, se requiere de una buena comunicación y acuerdo entre las autoridades estatales (que están expuestas a los riesgos) y federales (que manejan los riesgos)
- Reubicación de infraestructura, esta medida al igual que la primera que se mencionó tiene asociada una variable social altamente complicada. El significado de pertenencia a un lugar es muy arraigado en la población del sureste mexicano. Por ejemplo, en el Estado de Tabasco existen casos de poblados que se niegan a ser reubicados a pesar de informarles los riesgos a los que están expuestos (ubicados en llanuras de inundación)
- Relocalización de pozos de agua potable, esta medida se antoja complicada por la modificación de la red de abastecimiento de agua potable que se requeriría. Además esta medida es de las que se propone cuando el problema de contaminación de acuíferos por salinización ya es un hecho. Se recomienda tratar de implementar todas las otras medidas identificadas para evitar la ejecución de esta

De igual manera, la Tabla 6.10 presenta las calificaciones obtenidas para las medidas de adaptación definidas desde una perspectiva de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo. Las medidas analizadas son seleccionadas con base en las matrices de impactos y vulnerabilidad obtenidas durante el taller

| Medida de adaptación propuesta | Nivel de urgencia (1 a 3) | Costo (1,2,3) Bajo/medio/alto | Tiempo implementación/ corto/mediano/largo | Efectividad (1,2,3) Alto/medio/Bajo | Condiciones Institucionales (1,2,3) propicias/ adecuadas/adversas |
|--|---------------------------|-------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| Programas de monitoreo de especies | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Rehabilitación y restauración de ANPs | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Monitoreo de playas | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| Obras de protección costera | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| Regulación de pesca | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Fomento de Ecoturismo | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Reforestación de dunas costeras y pastos marinos | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Energías alternativas | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| Reubicación de nidos de tortuga | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| Programa de acuicultura | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Monitoreo de Calidad del agua | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Investigación sobre dinámica costera y de peces | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 6.10 Matriz de adaptación bajo una perspectiva de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo

| Medida de adaptación propuesta | Nivel de urgencia (Vulnerabilidad) | Viabilidad |
|--|------------------------------------|------------|
| Investigación sobre dinámica costera y de peces. | 2 | 1 |
| Monitoreo de Calidad del agua | 2 | 2 |
| Regulación de pesca | 2 | 2 |
| Reforestación de dunas costeras y pastos marinos | 3 | 2 |
| Monitoreo de playas | 2 | 3 |
| Fomento de Ecoturismo | 3 | 4 |
| Programa de acuicultura | 2 | 5 |
| Obras de protección costera | 3 | 6 |
| Programas de monitoreo de especies | 2 | 7 |
| Rehabilitación y restauración de ANPs | 2 | 7 |
| Energías alternativas | 2 | 8 |
| Reubicación de nidos de tortuga | 2 | 9 |

■ +++ Viable
■ ++ Viable
■ + Viable
■ o Viable
■ - Viable
■ -- Viable
■ --- Viable
■ ---- Viable

Tabla 6.11 Desempeño de las medidas de adaptación definidas desde una perspectiva de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo

El orden de viabilidad general, se definió también a través de la asimilación del conjunto de calificaciones por medio del cálculo del módulo de la calificación, definido como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las calificaciones individuales. La jerarquización respecto a la viabilidad se define en orden ascendente de acuerdo al módulo de la calificación obtenida para cada medida de adaptación. El resultado del desempeño de las medidas de adaptación desde ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo se presenta en la Tabla 6.11.

De acuerdo con la viabilidad de cada medida de adaptación propuesta por el grupo de análisis bajo una perspectiva de ecosistemas costeros, biodiversidad y turismo, se rescatan como más viables las siguientes medidas:

- Investigación sobre dinámica costera y peces, la alta viabilidad de esta medida es consecuencia del trabajo que se realiza al interior del centro EPOMEX, es evidente que sus investigadores tienen experiencia suficiente para abordar estos temas. De hecho, dentro de sus trabajos recientemente publicados ya se registran esfuerzos dirigidos a cubrir esta medida

- Monitoreo de la calidad del agua, una vez más el centro EPOMEX ya hace algo de trabajo en este sentido y su capacidad técnica permitiría la rápida creación de un sistema de monitoreo constante

- Reforestación de dunas, una vez identificadas las zonas de amortiguamiento (dunas) a lo largo del litoral del Estado, la planificación de una campaña de su reforestación es medianamente posible

- Monitoreo de playas, ya existe algo de trabajo abocado a cubrir una caracterización del litoral campechano. Además dentro del EPOMEX existe la capacidad para implementar un sistema de monitoreo constante (ya lo hacen con el nivel medio del mar). Sin embargo, se deben explorar fuentes de financiamiento para este tipo de actividades

Asimismo, las medidas que han sido clasificadas como menos viables son:

- Reubicación de nidos de tortuga, esto se debe a que en la medida de lo posible las medidas de adaptación no deberían considerar la alteración de los ecosistemas actuales. La reubicación de los nidos implica la pérdida de las playas ante la erosión costera. En consecuencia esta es una medida reactiva más que preventiva. Se propone la implementación de otras medidas de adaptación señaladas en la Tabla 6.11 que puedan prevenir directamente la erosión costera y de forma indirecta la reubicación de los nidos de tortuga

- Energías alternas, su viabilidad baja se debe al bajo desarrollo que existe en el país respecto a la investigación y tecnología para hacer realidad el uso de las energías alternas. Por otra parte, para el caso del Estado de Campeche no existen mapas de potencial energético de viento, oleaje o corrientes marinas que puedan identificar de forma más clara su viabilidad a nivel estatal. Se sugiere como un primer paso la cuantificación y caracterización de esos potenciales que eventualmente pueden representar fuentes de energía para el Estado

Todas las medidas de adaptación mencionadas con anterioridad han sido identificadas y priorizadas de forma consensuada con los expertos y grupos de interés del Estado de Campeche. Se ha discutido su jerarquización comprendiendo consideraciones de urgencia y de capacidad actual de acometerlas. Adicionalmente, el ejercicio ha permitido la realización de un análisis comparativo de las medidas de adaptación propuestas, con un carácter general y de gran visión. La información generada se convierte por tanto en información relevante para informar las políticas de desarrollo del Estado, y ofrece al Gobierno del Estado de Campeche la posibilidad de generar propuestas robustas que cuentan con un buen nivel de aceptación y consenso en un amplio grupo de actores.

8. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Las dos consecuencias principales del cambio climático que tienen un impacto sobre los ambientes costeros en el mundo, son el incremento en el nivel medio del mar y los cambios en el clima marítimo (incremento en frecuencia e intensidad de tormentas). El Estado de Campeche representa un área estratégica para México de gran importancia económica (ej. zona petrolera) y ecológica (ej. 3 especies de tortugas marinas en peligro de extinción desovan en sus costas) que ya sufre los efectos del incremento del nivel del mar y la presencia de mareas de tormenta más severas.

Resultados indican que 58.41% de la población del Estado está en una situación vulnerable ante un incremento de +1.0m en el nivel del mar (440,910 habitantes). La concentración de la población afectada, se presenta principalmente en la Ciudad del Carmen (154,197 habitantes) y Campeche (211, 671 habitantes).

El cambio climático incrementará la inundación y erosión costera en un futuro, así, a mayor número e intensidad de tormentas se producirá un aumento en la probabilidad de incidencia de mareas de tormenta extremas sobre las costas (~ 4 -6 m); extendiéndose las zonas afectadas de los 11 a los 16 km tierra adentro en las zonas bajas (1 - 2m sobre el nivel del mar). Un incremento en el nivel del mar de +60cm amplifica hasta en 3 veces la superficie afectada en la Ciudad de Campeche por inundaciones costeras. Las áreas más vulnerables ante la inundación por marea de tormenta en Campeche son Los Petenes, la zona comercial Akim-Pech y la parte central de la ciudad.

A pesar de la magnitud de daños y costos económicos que se han asociado a estos eventos (para el año 2100) para países en vías de desarrollo, cerca de los 100 Billones de dólares para un incremento de +0.6m sobre el nivel del mar, no se han reportado trabajos que cuantifiquen los costos estimados para el litoral de Campeche. Además los costos estimados no consideran cambios producidos por la salinización de acuíferos e improductividad de las zonas agrícolas, por lo que es necesario considerar su impacto en la seguridad alimentaria de la población del Estado.

Por su parte, la erosión tiene una influencia directa en el número de nidos de tortuga ya que en playas sujetas a procesos erosivos se registra un número menor de nidos, lo que es probable que tenga un impacto en la conservación de esta especie.

De acuerdo con el análisis de las medidas de adaptación propuestas se establecieron prioridades a la investigación de los sistemas físicos, los eventos extremos, la normatividad vigente y la reforestación de los hábitats. También destacan medidas de monitoreo, manejo integrado, prevención (incendios, erosión y desastres naturales), planeación (del territorio, de los desarrollos turísticos), de restauración y protección, y de infraestructura (nuevos códigos de construcción, energías alternativas).

8.1 Comentarios finales

- El Taller permitió dar un paso adelante en el trabajo de Cambio Climático que viene realizando el Estado de Campeche, identificando medidas asociadas a problemas particulares que se vislumbran a partir del análisis de un escenario de incremento en variables climatológicas dentro del horizonte 2100
- El ejercicio de análisis ambiental estratégico es una buena herramienta de consenso y planificación estratégica. Es importante continuar con este proceso de diálogo e inclusión de actores, e incluir a los sectores relevantes para cada tema (por ejemplo la participación de sectores de gobierno como CONAGUA o la Administración del Puerto en relación a afectaciones a fuentes de agua e impactos en los puertos)
- En el caso de Campeche los resultados del Taller coadyuvaron a organizar y estructurar el conocimiento disponible en resultados científicos de los impactos del cambio climático sobre las costas.

9. RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

La evaluación y el manejo de los riesgos por inundación y erosión costera comprenden labores altamente complicadas debido a la alta no-linealidad en el respuesta de los sistemas costeros ante la incidencia del clima marítimo, las diferentes escalas espaciales involucradas (metros a kilómetros) y la carencia de un conocimiento certero sobre las incertidumbres asociadas a los modelos numéricos y las observaciones de campo.

En los próximos cien años, se requiere mejorar el entendimiento de cómo el cambio climático generado por factores naturales y antropogénicos alterará la intensidad y frecuencia de las inundaciones y sus regímenes climáticos. Es necesario conocer qué limita nuestra capacidad presente y futura para predecir los riesgos por inundaciones en las décadas por venir.

Se sugiere que una vía de desarrollo se ligue a la construcción de modelos numéricos con el propósito de que estos integren sus resultados desde la atmósfera, pasando por la cuenca y hasta llegar a la costa. A partir del trabajo de investigación reportado en este informe, la Tabla 8.1 presenta un resumen de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del conocimiento disponible en el Estado.

| | |
|--|--|
| Fortalezas <ul style="list-style-type: none">-Existe un sistema de monitoreo del nivel medio del mar.-Se ha identificado al Ordenamiento territorial como instrumento preventivo.-Hay inversión de recursos en investigación.-El conocimiento disponible ha sido aplicado para identificar zonas de alta vulnerabilidad. | Debilidades <ul style="list-style-type: none">-Limitada resolución de la información espacial (ej. Fotos aéreas, de satélite y elevaciones) para evaluar riesgos.- No hay un sistema de monitoreo de la zona costera (ej. Perfiles de playas).-No se ha cuantificado la incertidumbre asociada a los resultados.-No hay una estrategia para la comunicación del riesgo a la población. |
| Oportunidades <ul style="list-style-type: none">-Generar una visión holística para evaluación de impactos y riesgos.-Zonificar la región costera y marina para implementar medidas de adaptación compatibles.-Consolidar la información topobatemétrica. | Amenazas <ul style="list-style-type: none">-Cambio en el régimen de precipitaciones del estado.-Inundaciones más frecuentes y severas.-Erosión costera.-Salinización de acuíferos.-Menos disponibilidad de agua potable.-Pérdida de ecosistemas costeros. |

Figura 8.1 Resumen de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del conocimiento disponible en el Estado de Campeche, México

La evaluación y el manejo de los riesgos por inundación y erosión costera comprenden labores altamente complicadas debido a la alta no-linealidad en el respuesta de los sistemas costeros ante la incidencia del clima marítimo, las diferentes escalas espaciales involucradas (metros a kilómetros) y la carencia de un conocimiento certero sobre las incertidumbres asociadas a los modelos numéricos y las observaciones de campo. En el futuro, el cambio climático afectará no solamente vía un incremento en el nivel del mar sino también tendrá un efecto potencial sobre todos los aspectos del régimen de precipitaciones en Campeche. La naturaleza exacta de estos cambios es incierta, particularmente para los eventos extremos (ej. huracanes) que producen inundaciones, ya sean estos de corta o larga duración. Un incremento en la precipitación en todas las escalas, incrementará el riesgo de inundación en mayor o menor medida, dependiendo de cómo los incrementos se manifiesten en espacio y tiempo y de las características fisiográficas de cada cuenca.

Esta sección presenta los puntos estratégicos, en los que se requiere investigación adicional en diferentes áreas del conocimiento. Se anticipa que de trabajarse en estas áreas se determinará con una mejor precisión los riesgos existentes en la zona costera debido al incremento en el nivel del mar.

1. Abordar el problema de incertidumbre en resultados numéricos y datos de entrada. - Una forma muy socorrida a nivel mundial para abordar el problema de la incertidumbre, consiste en la utilización de ensambles como aquellos que se emplean en modelos de pronóstico meteorológico (ej. Du et al., 1997, Hamill y Colucci, 1997) e hidrológico (ej. De Roo et al., 2003). Generalmente, esta metodología asume que la incertidumbre en las predicciones del flujo está asociada, en principio, a la incertidumbre de los datos de entrada (ej. precipitación en un modelo hidrológico). Sin embargo, cabe señalar que recientemente diversos investigadores han puntualizado la necesidad de revisar la incertidumbre relacionada con la estimación de los parámetros en un modelo numérico (ej. calibración y discretización espacial Lamb and Kay, 2004 o Reeve et al., 2010; condiciones de frontera Pappenberg et al., 2006; valores de rugosidad Mason et al., 2003).

2. Evaluar la probabilidad y los riesgos asociados a los eventos climáticos extremos. - Se recomienda la exploración de métodos de pronóstico con ensambles, qué pasa cuando los modelos son escalonados hacia resoluciones superiores o inferiores, qué pasa cuando los resultados de estos modelos son sumados, cómo se transfieren las incertidumbres de un conjunto de observaciones a un modelo y cómo lo anterior afecta la efectividad de nuestros sistemas de alerta temprana o de identificación de riesgos.

3. Mejorar el entendimiento de cómo el cambio climático generado por factores naturales y antropogénicos altera la intensidad y frecuencia de las inundaciones.

4. Determinar las limitaciones actuales y futuras de nuestra capacidad para predecir los riesgos por inundaciones.

5. Desarrollar una visión integral para la construcción de modelos numéricos.- Con el propósito de que estos integren sus resultados desde la atmósfera, pasando por la cuenca y hasta llegar a la costa.

6. Considerar una visión holística para la evaluación de escenarios de cambio climático.- A fin de lograr un mejor equilibrio entre los pilares que dan base al desarrollo sustentable (económico, social y el de medio ambiente). Este tipo de iniciativas requieren la participación de todos los interesados, en todos niveles del proceso de manejo de riesgo (Gobiernos Estatales y Federales, Cámara de Diputados, Ciudadanos, Académicos, las ONGs).

10. REFERENCIAS

- Allison, I., R.B. Alley, H.A. Fricker, R.H. Thomas and R.C. Warner. 2009. Ice sheet mass balance and sea level. *Antarctic Science* 21, 413-426, doi:10.1017/S0954102009990137
- Bender, M. A. Thomas R. Knutson, Robert E. Tuleya, Joseph J. Sirutis, Gabriel A. Vecchi, Stephen T. Garner, Isaac M. Held, 2010. Modeled Impact of Anthropogenic Warming on the Frequency of Intense Atlantic Hurricanes, *Science*, Vol 327, no.5964, pp454-458, doi:10.1126/science.110568.
- Bird, E. C. F.: 1985, *Coastline Changes*, Wiley and Sons, New York, p. 219.
- Bolongaro Crevenna Recaséns, A. A.Z. Márquez García, V. Torres Rodríguez, y A. García Vícairo, 2010. Vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera en el Estado de Campeche, p.73-96. 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. 514p.
- Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Agraz-Hernández, C., y Presa, J., 2010. Mitigación, adaptación y costos, p469-492. 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. 514p.
- Bruun, P., 1962. Sea-level Rise as a Cause of Shore Erosion, *Journal of Waterways Harbors Division, American Society of Civil Engineers*, 88, 117–130.
- Caetano, E., V. Innocentini, V. Magaña, S. Martins, and B. Méndez, 2010. Cambio climático y el aumento del nivel del mar, p283-304. 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. 514p.
- Carbajal Domínguez, J.A., 2010. Zonas costeras bajas en el golfo de México ante el incremento del nivel del mar. p. 359-380. 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. 514p.
- Carranza-Edwards, A., 2001. Grain Size sorting in modern beach sands. *Journal of Coastal Research*, 17(1), 38-52.
- CICC. 2007. *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. México. http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica_ambiental/cambioclimatico/Pages/estrategia.aspx, 160 pp.
- Conanp. 2010. *Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas*, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Semarnat. México.
- Cowell, P. J., Stive, M. J. F., Niedoroda, A. W., Swift, D. J. P., De Vriend, H. J., Buijsman, M. C., Nicholls, R. J., Roy, P. S., Kaminsky, G. M., Cleveringa, J., Reed, C. W., and De Boer, P. L., 2003. The Coastal-Tract (Part 2): Applications of Aggregated Modelling to Lower-order Coastal Change, *Journal of Coastal Research* 19 (4), 828–848.
- De Roo, A.P.J., Bartholmes, J., Bongioannini-Cerlini, P., Todini, E., Bates, P.D., Horrit, M., Hunter, N., Beven, K., Pappenberger, F., Heise, E., Rivin, G., Hils, M., Hollingsworth, A., Holst, B., Kwadijk, J., Regiani, P., VanDijk, M., Sattler, K.D. and Sprokkereef, E. 2003. Development of a European flood forecasting system, *Int. J. River Basin Management*, 1, 49-59

- Du, J., Mullen, S.L. and Sanders, F. 1997. Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2427-2459
- Durán Valdez, G., 2011. Análisis del peligro por marea de tormenta en el Golfo de México. Tesis Maestría (Maestría en Ingeniería Civil)-UNAM, Instituto de Ingeniería. 136p.
- Emmanuel, K., 2007, Environmental Factors Affecting Tropical Cyclone Power Dissipation, *Journal of Climate*, Vol.20, American Meteorological Society, 5497-5508p. doi:10.1175/2007JCLI157.1
- Estrategia Nacional de Cambio Climático, 2007. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (<http://www.semarnat.gob.mx/temas/cambioclimatico/Paginas/estrategia.aspx>)
- Flores-Villela, O. y Pérez P., 1988, Conservación en México: síntesis sobre vertebrados terrestres, vegetación y uso de suelo. INIREB-Conservación Internacional, Xalapa, Ver.
- FREE, 2008, Flood Risk induced by Extreme Events, National Environmental Research Council, United Kingdom, <http://www.nerc.ac.uk/research/programmes/free/>
- Hamill, T.M. and Colucci, S.J. 1997. Verification of Eta-RSM short-range ensemble forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, 125, 12-1327
- Hamm, L., Capobianco, M., Dette, H. H., Lechuga, A., Spanhoff, R., and Stive, M. J. F., 2002. A summary of European experience with shore nourishment, *Coastal Engineering*, Vol 47, No.2, 237-264, doi:10.1016/S0378-3839(02)00127-8
- Hinkel, J., and Klein, R.T., 2009, Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, Vol 19., No. 3, 384-395 doi:10.1016/j.gloenvcha.2009.03.002.
- Hinkel, J., Nicholls, R.J., Vaefedis, A.T., Tol, R.S.J., and Avagianou, T., 2010. Assessing the risk for an adaptation to sea-level rise in the European Union: an application of DIVA, Mitigation and adaptation strategies for global change, Vol. 5, No.7, 703-719, doi:10.1007/s11027-010-9237-y.
- Horton, R., C. Herweijer, C. Rosenzweig, J. Liu, V. Gornitz, and A. C. Ruane , 2008. Sea level rise projections for current generation CGCMs based on the semi-empirical method, *Geophysical Research Letters.*, 35, L02715, doi:10.1029/2007GL032486.
- IMEE, 2011, Infrastructure Management and Extreme Events (IMEE), National Science Foundation, USA, http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=13353
- IPCC, Climate Change 2007, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press.
- Jevrejeva, S., Moore, J.C., Grinsted, A., 2010. How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100? *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, L07703, doi:10.1029/2010GL042947, 2010
- Klein, R.J.T. 2001. Adaptation to Climate Change in German Official Development Assistance - An Inventory of Activities and Opportunities, with a Special Focus on Africa. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Eschborn, Germany. 42 pp.
- Knutson T.R., J.J. Sirutis, S.T. Garner, G.A. Vecchi, and I.M. Held, 2008. Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twenty-first-century warming conditions. *Nature Geoscience*, 1, 359-364.
- Lamb, R. and Kay, A.L. 2004. Confidence intervals for a spatially generalised, continuous simulation flood frequency model for Great Britain, *Water Resources Res.*, 40(7), W07501
- Leatherman, S. P., Zhang, K., and Douglas, B. C.: 2000, 'Sea Level Rise Shown to Drive Coastal Erosion', *EOS Transact.* 81 (6), 55-57.
- Maldonado, S., E. Mendoza, G. Posada, L. Alpuche y R. Silva, 2010. Caracterización de la hidrodinámica y la calidad del agua marina en la costa de Campeche, México, XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Punta del Este, Uruguay.

Márquez, A., Torres Rodríguez, V., Bolongaro-Crevenna Recaséns A., Chavarría Hernández, J., Varona Cordero, F., Expósito Díaz, F., Galván Fernández A., Márquez García E., Monsalvo Jiménez C., Pérez Aguilar V., Ramírez García L., Santana Carrillo M., Santana Carrillo A., Márquez García A., García Vicario A., 2008. Estudio De La Dinámica Costera Del Litoral Norte Del Municipio Del Carmen, Campeche. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Municipio del Carmen Campeche. Informe PEMEX-PEP.

Márquez, R., y Ma. Del C., Jiménez, 2010. El posible efecto del cambio climático en las tortugas marinas, p.97-112. 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. 514p.

Mason, D., Cobby, D.M., Horritt, M.S. and Bates, P.D. 2003. Floodplain friction parameterisation in two-dimensional river flood models using vegetation heights derived from airborne scanning laser altimetry. *Hydrological Processes*, 17, 1711–1732.

Mc Granahan, G., Balk, D., Anderson, B. 2007. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, vol. 19, no. 1, 17-37 doi: 10.1177/0956247807076960.

Nicholls, R. J., Frank, M. J., Hoozemans, Marchand M. 1999. Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses, *Global Environmental Change*, Vol. 9, pages 69–87.

Nicholls, R. J. 2002. Rising sea levels: potential impacts and responses, *Issues in Environmental Science and Technology*, Vol. 17, pages 83–107.

Nicholls, R. J. 2004. Coastal Flooding and Wetland Loss in the 21st century: Changes under the SRES Climate and Socioeconomic Scenarios. *Global Environmental Change* 14, 69–86.

Nicholls, R. J. et al., in *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry et al., Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007).

Nicholls R. J., Wong P P, Burkett V R, Woodroffe C.D., Hay J.E., 2008. Climate change and coastal vulnerability assessment: scenarios for integrated assessment. *Sustainability Science*, 3 (1), 89-102

Nicholls, R. J., C. D. Woodroffe, V. R. Burkett, 2009, Coastline degradation as an Indicator of Global Change, in *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth*, T. M. Letcher, Ed., Elsevier, pp. 409–424.

Nicholls R. J., and Cazenave, A., 2010. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science* 328, 1517-1520, DOI: 10.1126/science.1185782

Ortiz Pérez, M. A., 1992. Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche, Tabasco, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 25, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7–23.

Ortiz Pérez, M. A., 1994. Repercusiones del ascenso del nivel del mar en costas bajas de planicies deltaicas, *Geografía y Desarrollo*. Vol. 2. núm. 11, pp. 69-72.

Ortiz Pérez, M.A., and A.P. Méndez Linares, 1999. Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 39: 68-81

Ortiz Pérez, M.A., and A.P. Méndez Linares, 2000a. Componentes naturales y de uso del suelo vulnerables a las variaciones del nivel del mar en la costa atlántica de México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 41: 46-61

Ortiz Pérez, M.A. and A. P. Méndez Linares. 2000b. Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el Litoral del Golfo de México. In: México, una visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México. Instituto de Geografía, UNAM, Mexico.

Ortiz Pérez, M.A. and A. P. Méndez Linares. 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del golfo de México y mar Caribe. In: El Manejo Costero en México. Rivera

Arriaga, E., G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, y F. Rosado May (eds.), Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 307-319 p.

Palacio Aponte, A. G., 2004, Riesgos naturales y susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes, aplicación de SIG en la costa baja acumulativa del suroeste de Campeche. In: El Manejo Costero en México. Rivera Arriaga, E., G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, y F. Rosado May (eds.), Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 287-306 p.

Palacio Aponte, A. G., P. Salles Afonso de Almeida, R. Silva Casarin, E. Gustavo Bautista Godínez, G. Posada Vanegas y R. Val Segura, 2005. Diagnóstico de Riesgo por Inundación para la Ciudad de Campeche. Universidad Autónoma de Campeche, H. Ayuntamiento del Municipio de Campeche. 109 p.

Pappenberger, F., Matgen, P., Beven, K.J., Henry, J.B., Pfister, L., de Fraipont, P. 2006, Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions. *Advances in Water Resources*, Vol.29, No.10, 1430-1449.

Parker, D. J. (ed.). 2000. *Floods*, 2 volumes. London: Routledge, 431 and 317.

Pedrozo-Acuña, A., Mariño-Tapia, I.J., Enriquez-Ortiz, C., Medellín-Mayoral, G., González-Villareal, F., 2011, Evaluation of inundation areas resulting from the diversion of an extreme discharge towards the sea: Case study in Tabasco, Mexico, *Hydrological processes*, Wiley and Sons, en revision.

Penning-Rowsell, E. C. 2000. Has Venice Crossed the Rubicon? In: *Floods*, Volume 1, D. J. Parker (ed.). London: Routledge, 277–287.

Pfeffer, W.T., J.T. Harper and S. O’Neel. 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea level rise. *Science* 321, 1340–1343.

Pielke, R. A. and R. A. Pielke. 1997. *Hurricanes: Their Nature and Impacts on Society*. New York: Wiley, 279.

Posada Vanegas G., y B.E. Vega Serratos, 2010. Evaluación de zonas inundables para la ciudad de San Francisco de Campeche, p. 607-622. En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual y G.J. Villalobos-Zapata (eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Universidad Autónoma de Campeche, CetyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.

Posada-Vanegas, G., Vega Serratos, B.E., Ruiz Martínez, G., Silva Casarín, R., Nava Fuentes, J.C., Pulido Yah, A., 2010a, Sistema de medición de niveles del mar y temperatura en el Estado de Campeche México. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Punta del Este, Uruguay, CDR0M.

Posada-Vanegas, G., Vega Serratos, B.E., Zetina Tapia, R., Ruiz Martínez, G., 2010b, Ubicación y caracterización de zonas de peligro de inundación por marea de tormenta en las costas de México, Informe Final, Fondos Mixtos CNA-CONACYT CNA-2006-01-48639.

Posada-Vanegas, G., Durán-Valdez, G., Silva-Casarin, R., Maya-Magaña, M., Salinas-Prieto, J., 2011. Vulnerability To Coastal Flooding Induced By Tropical Cyclones. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, North America*, 1, jan. 2011. Available at: <http://journals.tdl.org/ICCE/article/view/1195>. Date accessed: 01 Mar. 2011.

Rahmstorf, S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sealevel rise, *Science*, 315, 368 – 370, doi:10.1126/science.1135456

Reeve, D. E., Horrillo-Caraballo, J.M., Pedrozo-Acuña, A., 2010. Handling Uncertainty in Coastal Modelling, in *Flood Risk Science and Management* (eds G. Pender and H. Faulkner), Wiley-Blackwell, Oxford, UK. doi: 10.1002/9781444324846.ch16

Rignot, E., J. E. Box, E. Burgess, and E. Hanna. 2008. Mass balance of the Greenland ice sheet from 1958 to 2007, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20502, doi:10.1029/2008GL035417.

Rivera Arriaga, E., G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, y F. Rosado May (eds.), 2004. *El Manejo Costero en México*. Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 654 p.

Rivera-Arriaga, E., G. Palacio Aponte, G. Villalobos Zapata, R. Silva Casarín y P. Salles Afonso de Almeida, 2004. Evaluación de Daños en las Zonas Costeras de la Península de Yucatán por el Huracán “Isidoro”. Desarrollo de Propuestas de Investigación y Mitigación en Manejo Integrado de Recursos Costeros. Sección Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 158p.

Rivillas Ospina, G.D., 2008. Re-análisis de oleaje para México: 1948-2007. Tesis Maestría (Maestría en Ingeniería Civil)-UNAM, Instituto de Ingeniería, 159p.

Ruiz, G., Vega, B.E., Posada, G., Silva R., Nava, J.C., 2010, Implementación de Red Mareográfica en el Litoral del Estado de Campeche, JAINA, Boletín Informativo, Vol.21, No.1, 27-48p.

Sánchez-Salazar M.T. and M. Martínez Galicia. 2000. La vulnerabilidad de la industria y los sistemas energéticos ante el cambio climático global. In: México, una visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México. Instituto de Geografía, UNAM, Mexico.

Short, A. W., 2003. A Survey of Australian Beaches, Keynote Lecture, Coastal Sediments 2003, Clearwater, Florida.

Silva, R., Díaz, G., Contreras, A., Bautista, G., Sánchez, C., 2000. Determination of oceanographic risk for hurricanes on the Mexican coast. 6th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Melbourne, Florida, 137-151p.

Smith, K., and R. Ward. 1998. Floods: Physical Processes and Human Impacts. Chichester: Wiley, 382.

Sosa, V., J. Salvador Flores, V, Rico–Gray, R. Lira y J. J. Ortíz. 1985. Lista florística y sinonimia maya. In Etnoflora yucatanense 1. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida. 225 p.

Torres Rodríguez, V., A., Márquez García, A., Bolongaro Crevenna, J. Chavarría Hernández, G. Expósito Díaz y E. Márquez García, 2010. Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el Estado de Campeche debidos a efectos en el 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. 514p.

UICN, 2001. Unión Internacional para la Conservación de la naturaleza. Ruling of the IUCN Red List Standards and Petitions Subcommittee on Petitions against the 1996 listings of Four Marine Turtle species.

UNEP. 1994. Assessment and monitoring of climatic change impacts on mangrove ecosystems. United Nations Environment Programme, Regional Seas Report and Studies 154.

Vecchi, G.A., T. R. Knutson, Vecchi, L. Bengtsson, T. R. Knutson, 2008. On estimates of historical North Atlantic tropical cyclone activity. *Journal of Climate*, 21, 3580-3600.

Vega, B.E, Posada, G., Silva, R., Zetina, R., Reyes A., Aponte, G., 2010. Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche, XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Punta del Este, Uruguay.

Velicogna, I. 2009. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19503, doi:10.1029/2009GL040222.

Vermeer, M., and S. Rahmstorf, 2009. Global sea level linked to global temperature, *Proceedings of the National Academy of Science. U.S.A.*, doi :10.1073/pnas.0907765106.

West, J. J., Small, M.J., and Dowlatabadi, H. 2001. Storms, investor decisions, and the economic impacts of sea level rise, *Climatic Change*, Vol. 48, No.2-3, 317-342, doi:10.1023/A:1010772132755.

Yáñez-Arancibia, A., R.R. Twilley and A.L. Lara-Domínguez. 1998. Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y bosques* 4(2): 3-19. <http://www.ecologia.edu.mx/publicaciones/resumeness/4.2/pdf/Yanez%20et%20al%201998.pdf>.

Yohe, G. and Schlesinger, M. E., 1998. Sea-Level Change: The Expected Economic Cost of Protection or Abandonment in the United States, *Climatic Change* 38, 337–472.

Zavala-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, and F. Hernandez-Maguey, 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. p. 249-268. 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. 514p.



APÉNDICE 1

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Un resultado evidente en diferentes partes del mundo, y México no es la excepción, indica que el aumento en el número de inundaciones que se observan al año está asociado al incremento en la frecuencia e intensidad de tormentas. Por otra parte, es muy probable que el observado cambio climático sea consecuencia de actividades antropogénicas que modifican el medio ambiente. Por lo tanto, se puede afirmar que el cambio climático traerá consigo inundaciones más frecuentes y severas.

Es probable que en los años porvenir, el costo de los desastres asociados a eventos extremos, registrado a lo largo del país, se eleve considerablemente (ver Tabla A.1) como resultado del crecimiento económico (ej. asentamientos en llanuras de inundación) y el cambio climático (ej. incremento en el número y severidad de eventos extremos).

| Desastre | Daño US\$ |
|--|------------------|
| Huracán Wilma (2005) | 1 782 000 000.00 |
| Inundaciones en Tabasco y Chiapas (2007) | 700 000 000.00 |
| Huracán Gilberto (1988) | 567 000 000.00 |
| Huracán Isidore (2002) | 308 000 000.00 |
| Huracán Emily (2005) | 302 000 000.00 |
| Huracán Stan (2005) | 228 000 000.00 |
| Huracán Kenna (2002) | 176 000 000.00 |
| Huracán Juliette (2001) | 90 000 000.00 |
| Huracán Pauline (1997) | 62 000 000.00 |

Tabla A.1. Los nueve eventos con mayor costo económico en México
(fuente: CENAPRED)

Es por ello que la capacidad para investigar los impactos de la variabilidad y cambio climáticos, es esencial para proteger a la población, sus bienes, la infraestructura y para mantener una economía sustentable. Adicionalmente, es claro que esto se logrará a partir de un incremento en el conocimiento científico que existe sobre la frecuencia, intensidad y comportamiento de los eventos extremos, siempre y cuando se considere una perspectiva holística, que involucre a todas las ciencias ingenieriles y ambientales (ej. física, hidrología, biología, meteorología, ingeniería, etc.)

La revisión del conocimiento que aquí se presenta introduce los diferentes estudios que se han realizado en el Estado de Campeche a la fecha, que evaluaron de alguna u otra forma los impactos del incremento en el nivel del mar en la zona costera, así como los cambios de precipitación e intensificación de fenómenos extremos. Los estudios están organizados de acuerdo a dos áreas principales de investigación. La primera de ellas considera los estudios físicos (ej. inundaciones, huracanes, erosión), y la segunda resume los estudios ambientales (ej. ecosistemas costeros, tortugas, pastos marinos).

A.1 Estudios Físicos

En un estudio reciente, Nicholls y Cazenave (2010) resumieron de forma sucinta los impactos físicos del incremento en el nivel del mar en la zona costera. Entre ellos destacan el incremento en el número de inundaciones de zonas costeras, y la intrusión salina de aguas superficiales. Además mencionaron los efectos a largo plazo (ej. año 2100), entre los que destacan el incremento en la erosión costera y la intrusión salina en acuíferos de agua dulce.

En consecuencia, no sorprende el hecho de que en años recientes temas como el estudio de los riesgos de inundación debida a eventos extremos, hayan recibido una mayor atención a nivel internacional (ej. programas FREE, 2008 en el Reino Unido, e IMEE, 2011 en Estados Unidos). En sintonía con lo que pasa a nivel global, la comunidad científica en Campeche ha identificado la investigación de los riesgos de inundación inducida por eventos extremos, y las vulnerabilidades asociadas, como un tema relevante para la mejor planeación estatal y municipal de los ambientes costeros (Palacio-Aponte et al., 2005). De hecho, los primeros mapas de inundación de los que se tiene reporte para la Ciudad de Campeche, fueron realizados a petición del Centro Estatal de Emergencias de Campeche (CENECAM) para el estudio de las inundaciones inducidas por la presencia del huracán Isidore del año 2002 (Rivera-Arriaga et al., 2004).

Entre los primeros estudios abocados al estudio de la erosión costera en el Estado, se encuentra el trabajo de Ortiz Pérez (1992), quien a través de la comparación de fotografías aéreas tomadas en diferentes fechas, estimó los movimientos de la línea de costa del Golfo de México. En este trabajo, se argumentó que la evolución de la línea de costa era resultado de un desequilibrio ambiental producido por la subsidencia del terreno. Sin embargo, debido a la resolución espacial de las imágenes y los métodos utilizados, la información contenida en este estudio debe ser tomada como un diagnóstico cualitativo de la línea de costa.

A.1.1 Incremento del nivel del mar

En la actualidad, el debate sobre la magnitud del incremento del nivel medio del mar en el mundo es un tema totalmente abierto. Proyecciones para el año 2100, estiman valores +0.59m (IPCC, 2007) mientras que modelos de ascenso en el nivel del mar por el deshielo de casquetes polares consideran valores de hasta +2.5m para el mismo escenario (Grinsted et al., 2009).

Dentro de los primeros estudios que intentaron una evaluación de los impactos en la zona costera por el incremento en el nivel del mar, se encuentran aquellos presentados por Ortiz-Pérez (1994) y Ortiz-Pérez and Méndez Linares (1999). El primero de ellos enfocado en la evaluación de estos efectos en la planicie deltaica del Estado de Tabasco, mientras que el segundo incluye un análisis de toda la costa atlántica de México, comprendida por el Golfo de México y el Mar Caribe. Ambas investigaciones involucraron la combinación de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con resolución espacial de 90m y fotografías aéreas. En particular, se estudió la vulnerabilidad de la costa ante escenarios de incrementos de +1.0 y +2.0m sobre el nivel del mar.

Los resultados obtenidos se derivaron de la proyección de las curvas de nivel en el MDE, con el propósito de identificar las poblaciones más vulnerables dentro de las zonas de baja elevación en la costa. La Figura A.1 presenta los resultados generales presentados por estos estudios, en la que se aprecia una alta vulnerabilidad de las costas del Estado de Campeche ante el incremento en el nivel medio del mar. Especialmente para las zonas en las que se encuentra el área natural protegida de Los Petenes y el sureste de la costa del Estado (Cd. Del Carmen).



Figura A.1. Localización de las áreas de vulnerabilidad alta ante el incremento del nivel medio del mar en la vertiente atlántica mexicana (Golfo de México y Mar Caribe, fuente: Ortiz Pérez and Méndez Linares, 1999)

Los resultados presentados por estos investigadores indican que la región más vulnerable en la costa atlántica de México, ante eventos de incremento en el nivel del mar está localizada en el delta del río Grijalva-Usumacinta, una zona de gran magnitud que se ubica entre los estados de Tabasco y Campeche. Notablemente, en este primer estudio Ciudad del Carmen ya estaba identificada como una zona altamente vulnerable a un incremento de +1.0m sobre el nivel del mar (ver Figura A.2).

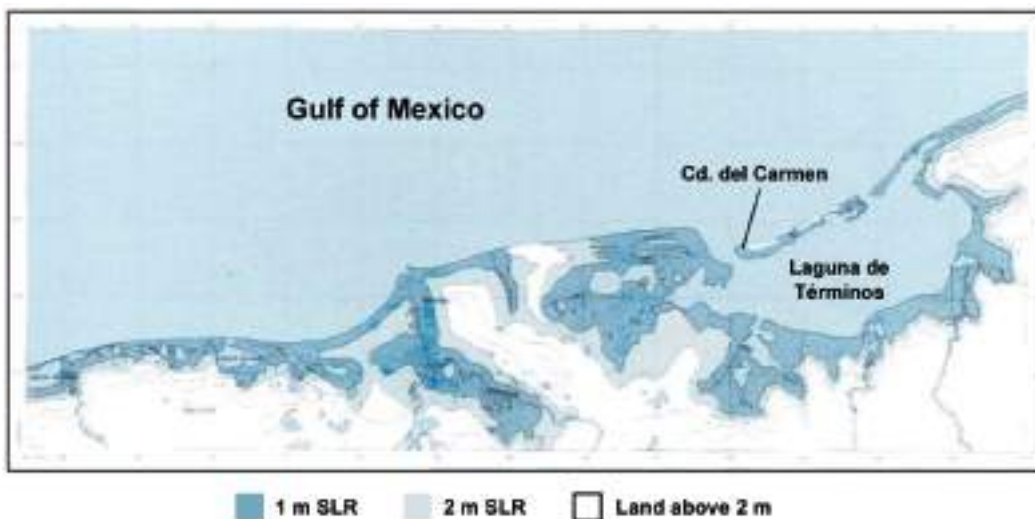


Figura A.2 Localización de áreas de vulnerabilidad alta a incrementos de +1.0 y +2.0m sobre el nivel del mar en la zona del delta del Grijalva-Usumacinta (fuente: Ortiz Pérez and Méndez Linares, 1999)

Con respecto a la evaluación de la parte norte de la zona costera de Campeche, la región donde se encuentra el Área Natural Protegida de Los Petenes, también fue identificada por los autores como una zona altamente vulnerable ante la subida del nivel del mar (ver Figura A.3). Esta región contiene humedales costeros con manglares y marismas, los cuales han sido identificados como elementos particularmente frágiles ante la subida del nivel del mar. De hecho, en el reporte del IPCC (2007) se hace mención a la importancia de los humedales costeros en el suministro de hábitats para muchas especies, esto les otorga un rol principal en la aportación de nutrientes, además de servir como plataforma de muchas oportunidades económicas para las comunidades aledañas, pues proveen oportunidades de recreación y protección contra inundaciones.

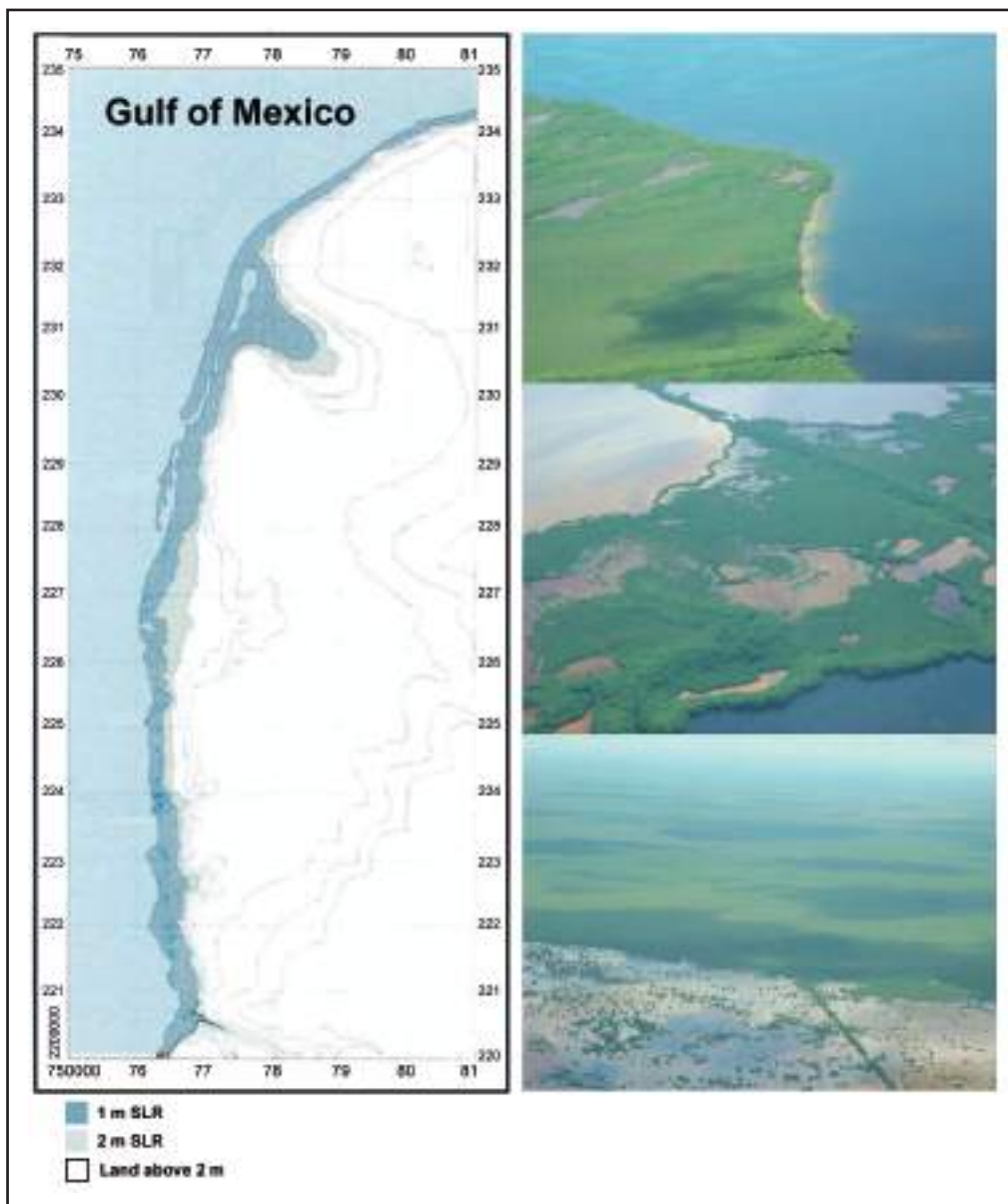


Figura A.3. Panel izquierdo- áreas afectadas ante incrementos de +1.0 y +2.0m sobre el nivel del mar en Los Petenes, Campeche (fuente: Ortiz Pérez and Méndez Linares, 1999); paneles derechos – fotografías aéreas de la región (fuente: <http://www.ecosur.mx/unidades/campeche/petenes/aereas.html>)

Conforme el nivel del mar aumenta, la frontera exterior de estos humedales será erosionada y nuevos humedales se formarán tierra adentro, con lo que áreas previamente secas, serán expuestas a inundación por la subida en los niveles de agua. Los humedales evolucionarán tierra adentro solamente si no existen obstáculos físicos (como por ejemplo, una carretera u otro tipo de infraestructura) que les impidan hacerlo. Además, el número de nuevos humedales generados puede ser mucho menor que la región que se haya perdido, especialmente en áreas densamente pobladas que se encuentran protegidas por bordos perimetrales (restringiendo el libre paso del agua). En el caso del norte de la costa de Campeche, el área afectada por un incremento en el nivel del mar de +1.0m fue calculada en 520 km², con una penetración de la mancha de inundación hacia tierra de 15 km. Mientras que para el caso de un incremento de 2.0m sobre el nivel del mar, se cuantificó un área de 720 km² con una penetración de la mancha de inundación de hasta 19 km desde la costa.

De acuerdo a las proyecciones de incremento en el nivel del mar presentadas por Rahmstorf (2007) – modelo lineal temperatura/nivel del mar-, Horton et al. (2008) –modelos globales semi-empíricos-, Grinstead et al. (2009) –deshielo de casquetes polares-, Vermeer and Rahmstorf (2009) –temperatura del mar- y Jevrejeva et al. (2010) –modelos estadísticos de emisiones CO₂- es muy probable que para el año 2100 se presente un incremento +1 m.

Los impactos de la elevación del nivel medio del mar sobre los manglares costeros, han sido investigados en México por Yáñez-Arancibia et al. (1998). En la Tabla A.2, se enlistan las principales respuestas que se esperan de estos ecosistemas costeros ante la incidencia del cambio climático (UNEP, 1994).

| |
|---|
| Incremento en el nivel del mar |
| <ul style="list-style-type: none"> • Si hay suficiente disposición de sedimentos el manglar se crecerá hacia tierra (en caso de que no haya obstáculos topográficos). • Se incrementará la erosión costera. • El rango en el incremento del nivel del mar determinará la elevación en la que las dunas, humedales costeros y manglares se re-establecerán. • La productividad secundaria (y pesquera) se incrementará debido a la mayor disponibilidad de nutrientes debido a erosión y suspensión de sedimentos. |
| Incremento en la concentración de CO₂ |
| <ul style="list-style-type: none"> • No se incrementará significativamente la actividad fotosintética de los manglares. • La eficiencia en el uso del agua de los manglares será mejorada. • No todas las especies de manglar reaccionarán de la misma manera. |
| Elevación en la temperatura (°C) |
| <ul style="list-style-type: none"> • Algunos manglares se extenderán hacia altas latitudes. • Se incrementará la productividad global del manglar. • Se incrementará la biodiversidad en estos ecosistemas. • Se acelerarán los procesos microbianos. |
| Impacto esperado debido al cambio climático en el uso de suelo y explotación de manglares |
| <ul style="list-style-type: none"> • Se incrementarán las inundaciones en zonas bajas. • Se incrementará la erosión costera. • Se incrementará la intrusión salina • Se incrementará el daño debido a eventos extremos. |

Tabla A.2. Principales respuestas de ecosistemas costeros ante la incidencia del cambio climático

Recientemente, Ortiz Pérez and Méndez Linares (2000a) presentaron un estudio actualizado que evaluó los efectos del incremento en el nivel del mar en toda la costa del Golfo de México. Para la clasificación de uso de suelo y la vegetación, utilizaron mapas (escala 1:50,000), fotografías aéreas y campañas de campo. La caracterización geomorfológica de la línea de costa y el arreglo fisiográfico de su estructura, permitió la identificación de dos regiones: a) La zona intermareal – que se espera sea la escena base para la recepción de los impactos de cambio en el nivel del mar; y b) la zona supralitoral o supramareal, que servirá de amortiguamiento, identificada como de riesgo potencial. En ambas regiones se realizó un inventario del tipo de vegetación y uso de suelo, de tal suerte que se reveló la composición y distribución de las áreas vulnerables ante incrementos en el nivel del mar. En un trabajo subsecuente, Ortiz Pérez and Méndez Linares (2000b) incluyeron un análisis detallado de la vulnerabilidad debida a incrementos en el nivel del mar del Área Natural Protegida de Los Petenes, localizada en el norte del Estado con una llanura de inundación de 15km de anchura. Indicando que por la pendiente de la zona y la carencia de una playa (defensa natural), esta región costera es especialmente vulnerable por el ascenso del nivel del mar. Los resultados que obtuvieron respecto a la clasificación de uso de suelo se presentan en la Tabla A.3.

Posteriormente, Ortiz Pérez and Méndez Linares (2004) describieron las interacciones que existen entre los factores socioeconómicos, biológicos y físicos que resultan del incremento en el nivel del mar. Su resultado principal consiste en un diagrama de flujo que representa estas interacciones (ver Figura A.4).

| Zona intermareal | Marismas y manglares | | Marismas y vegetación hidrófila | | Lagunas | | | | | |
|------------------------------|----------------------|------|---------------------------------|------|-------------|------|-----------------|-----|---------------|-----|
| | km2 | % | km2 | % | km2 | % | | | | |
| Tamaulipas | 50 | 0.4 | 481 | 3.9 | 1797 | 14.6 | | | | |
| Veracruz | 401 | 3.3 | 207 | 1.7 | 688 | 5.6 | | | | |
| Veracruz, Tabasco y Campeche | 1891 | 15.4 | 1168 | 9.5 | 1430 | 11.6 | | | | |
| Campeche y Yucatán | 1293 | 10.5 | 531 | 4.3 | 351 | 2.9 | | | | |
| Quintana Roo | 1050 | 8.5 | 72 | 0.6 | 886 | 7.2 | | | | |
| Total | 4682 | 38.1 | 2459 | 20.0 | 5152 | 41.9 | | | | |
| Zona supramareal | Pantanos | | Pastizal | | Agricultura | | Campos de dunas | | Zonas urbanas | |
| | km2 | % | km2 | % | km2 | % | km2 | % | km2 | % |
| Tamaulipas | 57 | 0.3 | 361 | 2.2 | 41 | 0.2 | 84 | 0.5 | 6 | 0 |
| Veracruz | 739 | 4.5 | 1134 | 6.9 | 1486 | 9 | 255 | 1.5 | 77 | 0.5 |
| Veracruz, Tabasco y Campeche | 2101 | 12.7 | 2577 | 15.6 | 1543 | 9.3 | 31 | 0.2 | 14 | 0.1 |
| Campeche y Yucatán | 482 | 2.9 | 1217 | 7.4 | 987 | 6 | 216 | 1.3 | 37 | 0.2 |
| Quintana Roo | 2836 | 17.1 | 132 | 0.8 | 83 | 0.5 | 22 | 0.1 | 36 | 0.2 |
| Total | 6215 | 37.5 | 5421 | 32.9 | 4140 | 25 | 608 | 3.6 | 170 | 1 |

Tabla A.3. Áreas estimadas en la zona intermareal y supramareal de la costa Atlántica de México (fuente: Ortiz Pérez and Méndez Linares, 2000b)

Entre sus conclusiones principales, estos autores señalaron que la falta de indicadores directos y sistemáticos de carácter oceanográfico y en particular mareográfico impide conocer con mejor precisión las modalidades y propiedades de incremento en el nivel del mar. Sin cuestionar las proyecciones del ascenso del nivel del mar, puntualizaron que es importante conocer las implicaciones y las consecuencias del ascenso como

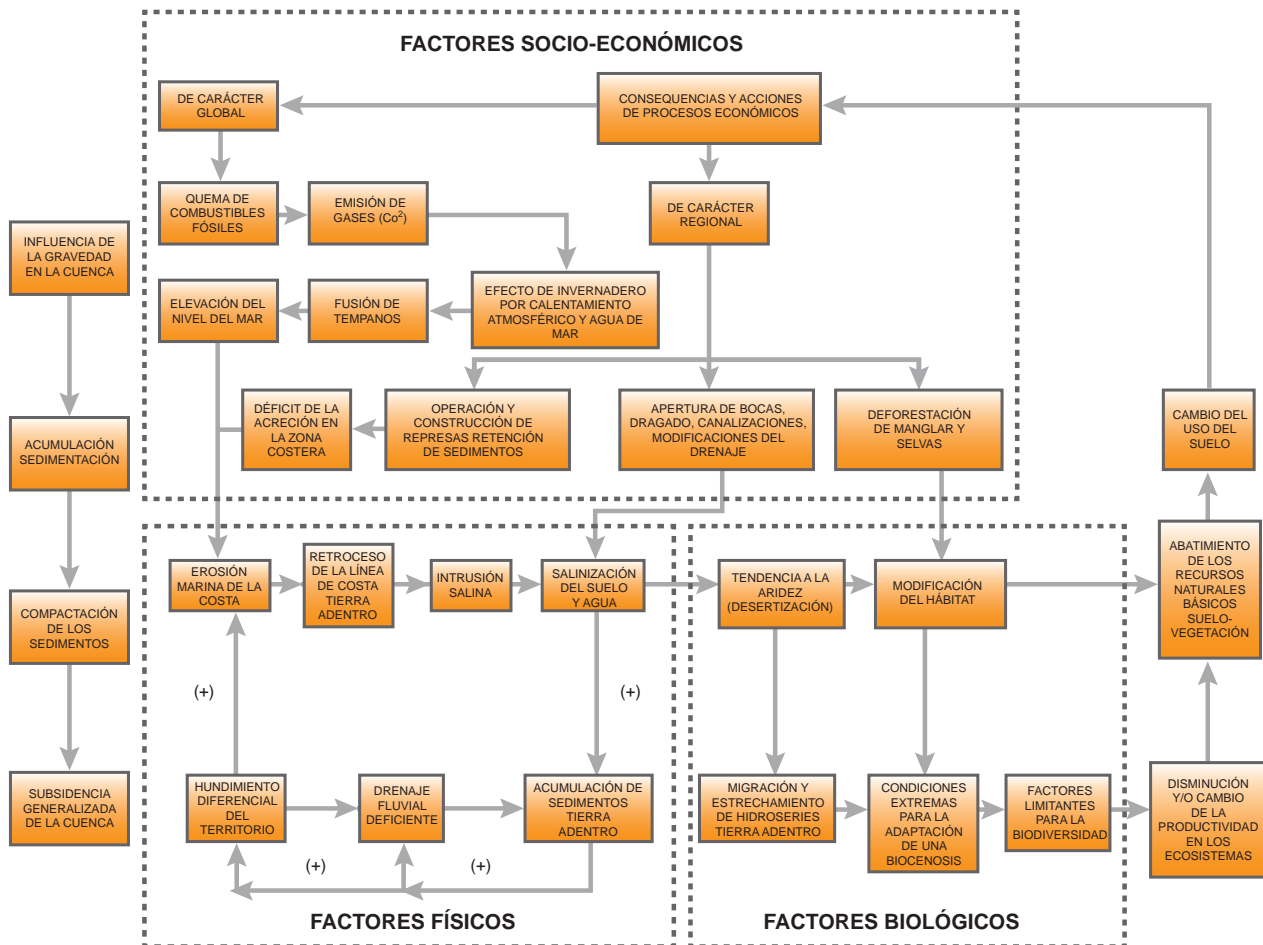


Figura A.4. Interacciones entre factores biológicos, físicos y socioeconómicos inducidos por cambios en el nivel del mar (fuente: Ortiz Pérez and Méndez Linares, 2004)

un fenómeno paralelo al de la subsidencia, dado que la diferencia de vulnerabilidad costera del litoral mexicano del Golfo está guiada por el descenso diferencial de las distintas cuencas geológicas marginales (cuenca de Burgos, Tampico-Mizantla, la cuenca de Veracruz, la cuenca salina del Istmo, Comalcalco y Macuxpana) y de las fallas geológicas en la Península de Yucatán.

Además propusieron el establecimiento de un sistema de monitoreo continuo, de tal suerte que se permita evaluar y clasificar el grado de vulnerabilidad de las costas con mediciones y herramientas de mayor precisión y resolución. Entre las posibles medidas de mitigación que propusieron están: a) Defensa: en las áreas afectadas por inundación se propuso construir obras de infraestructura (diques) para proteger refineras y puertos. Otro caso sería mantener los ecosistemas costeros y evitar la deforestación de la cubierta vegetal, para que estos sistemas actúen como barrera natural; b) Adaptación: este es un sistema que consiste en adecuar los usos del suelo con medidas y restricciones, con uso no intensivo sino extensivo (ganadería, pesca, etc.); c) Retirada: esta medida se sugiere en aquellos casos cuando no es posible establecer las dos anteriores. En este caso se propone el abandono y reubicación, por ejemplo el desalojo de las obras no costeadas (terrenos salinizados de difícil recuperación, etc.), reubicación de la población expuesta a inundaciones.

En el caso de la zona costera de Campeche, propusieron medidas de adaptación para la región norte del litoral (Los Petenes), mientras que para la región compuesta por Ciudad del Carmen hasta Campeche, no propusieron ninguna medida.

Por su parte, Palacio-Aponte (2004) presentó resultados respecto a la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes en la costa suroeste de Campeche, formulando la susceptibilidad como expresión territorial de la capacidad del paisaje para absorber o retroalimentar los efectos destructivos de los huracanes en tierra. Por medio de un análisis ponderado de las variables más significativas (ver Tabla A.3a) se estimó la susceptibilidad del terreno utilizando el análisis condicional y el contexto territorial de las unidades del terreno en la costa suroeste de Campeche (ej. rango de marea, intensidad de huracanes, resistencia/resiliencia de la vegetación, características de los sedimentos, tipo de playa, etc.).

| Tabla 3. variables ponderadas para evaluar la susceptibilidad del terreno. | | | |
|---|---|--|------|
| S1 Fijación biogénica Resistencia-Resiliencia | Manglar | Rizophora mangle | 0.10 |
| | | Avicennia germinans | 0.20 |
| | | Laguncularia racemosa | 0.30 |
| | Tulares y pastizales inundados | | 0.40 |
| | Selvas tropicales | | 0.50 |
| | Vegetación de dunas costeras | | 0.60 |
| | Cultivos abiertos | | 0.80 |
| | Superficies desnudas e impermeables | | 1.00 |
| S2 Movilidad del sustrato | Rocoso | | 0.25 |
| | Limo-arcillosos | | 0.50 |
| | Arena y fragmentos de conchas | | 0.75 |
| | Arena | | 1.00 |
| Predisposición dinámica de las geoformas costeras | Reflectiva | | 0.33 |
| | Mixta | | 0.66 |
| • S3 Interfase marina | Disipativa | | 1.00 |
| • S4 Interfase continental | Acantilados > 1 m | | 0.30 |
| | Terrazas, rampas y acantilados bajos (< de 1 m) | | 0.60 |
| | Planicies bajas acumulativas (< de 1 m) | | 1.00 |
| S5 Régimen intermareal | Micromareal | | 0.30 |
| | Mesomareal | | 0.60 |
| | Macromareal | | 1.00 |
| S6 Evidencias morfodinámicas del oleaje de tormenta (rasgos sedimentarios y morfológicos asociados) | Nivel 1 | | 0.25 |
| | Nivel 2 | | 0.50 |
| | Nivel 3 | | 0.75 |
| | Nivel 4 | | 1.00 |
| S6 Ubicación relativa de la amenaza en perfil transversal de afectación | Impacto proximal frontal | A (oleaje de tormenta, marea de tormenta, viento y reflujos) | 1.00 |
| | | B (viento, marea de tormenta y reflujos) | 0.75 |
| | Impacto proximal asociado | C (Viento, inundación) | 0.50 |
| | | D (viento) | 0.25 |
| S7 Fenomenología | Frecuencia de trayectorias ciclónicas (entre 1899-2002) | Baja | 0.33 |
| | | Media | 0.66 |
| | | Alta | 1.00 |
| | Categoría Saffir-Simpson | 1 y 2 | 0.33 |
| | | 3 | 0.66 |
| | | 4 y 5 | 1.00 |
| | Intensidad del viento ciclónico máximo | Baja | 0.33 |
| | | Media | 0.66 |
| | | Alta | 1.00 |
| | Altura de la ola máxima histórica | Baja | 0.33 |
| Media | | 0.66 | |
| Alta | | 1.00 | |
| Peligrosidad total | | | |
| $\Sigma/4$ | | | |
| 0-1 | | | |

Tabla A.3a. Variables ponderadas en el análisis de Palacio-Aponte (2004)

La Figura A.5 introduce los resultados encontrados en esta investigación, en la que se ilustra una alta susceptibilidad de la zona costera en la zona suroeste del Estado. Este resultado confirma, una vez más, la fragilidad de Ciudad del Carmen y la región suroeste del Estado ante la incidencia de ciclones tropicales.

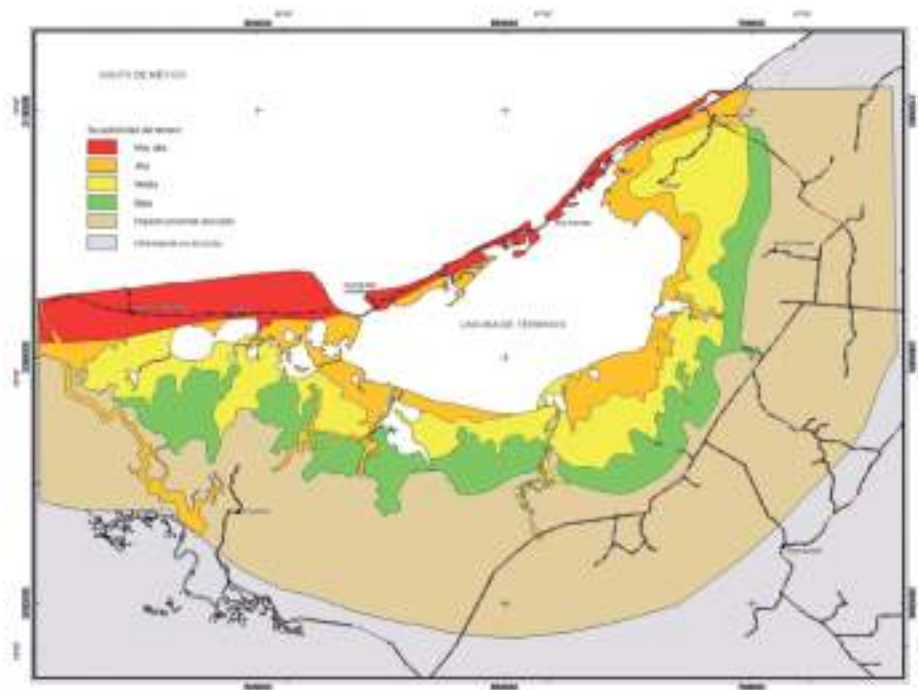


Figura A.5. Susceptibilidad del terreno ante incidencia de huracanes en la costa suroeste de Campeche (fuente: Palacio-Aponte, 2004)

Zavala-Hidalgo et al. (2010) presentaron un análisis histórico de series temporales del nivel medio del mar, obtenidas por el Servicio Mareográfico Nacional (<http://www.mareografico.unam.mx/Mareografico/>), presentando resultados del incremento en el nivel del mar en diferentes localidades a lo largo de las costas mexicanas. Uno de sus puntos de análisis corresponde a Ciudad del Carmen en Campeche. Para este caso, sus resultados indicaron un claro incremento en el nivel medio del mar para el período de tiempo entre 1956 y 1991. El incremento anual estimado para esta Ciudad fue de +3.4mm/año (ver Figura A.6).

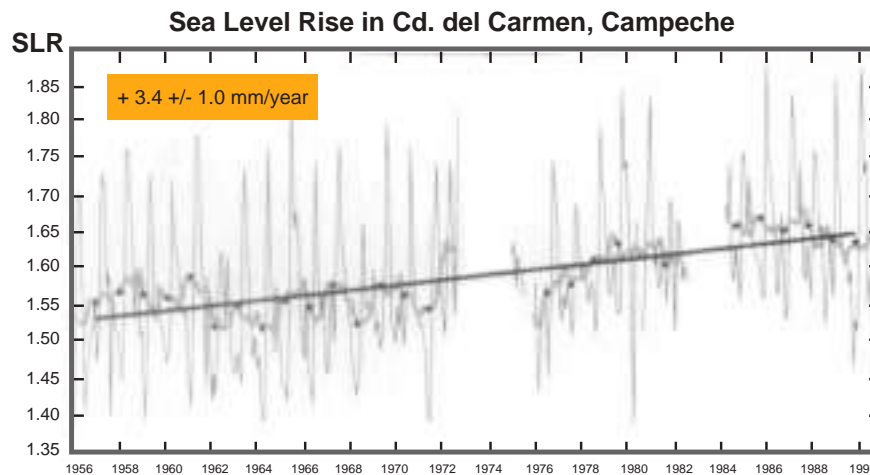


Figura A.6. Serie temporal de nivel medio del mar durante 1956-1991 en Cd del Carmen, Campeche (fuente: Zavala-Hidalgo et al., 2010)

Si esta tendencia continúa, para el año 2030 se tendría un incremento en el nivel del mar de +68mm, mientras que para 2100 sería de +340mm. Sin embargo, se espera que la tasa de incremento anual se vea acelerada como consecuencia del cambio climático.

La evaluación de los impactos de la subida del nivel medio del mar a lo largo del litoral campechano, han sido revisados recientemente por Caetano et al. (2010). Sin embargo, cabe mencionar que la metodología utilizada por estos investigadores para la evaluación de los mismos, fue más sencilla que la propuesta con anterioridad por Ortiz-Pérez and Méndez Linares (1999). Más aun, solo consideraron un incremento de +1.0m sobre el nivel del mar y no tomaron en cuenta contribuciones debidas a la presencia de huracanes, mareas astronómicas y oleaje sobre las costas. De hecho, sus resultados mostraron áreas afectadas de tamaño similar a aquellas reportadas con anterioridad por Ortiz-Pérez and Méndez Linares (1999). La Figura A.7 presenta los resultados obtenidos por Caetano et al. (2010) para todo el Estado de Campeche, donde es posible identificar la alta vulnerabilidad de ambas, Ciudad del Carmen y el Área Natural Protegida de Los Petenes ante un incremento de 1m en el nivel del mar.

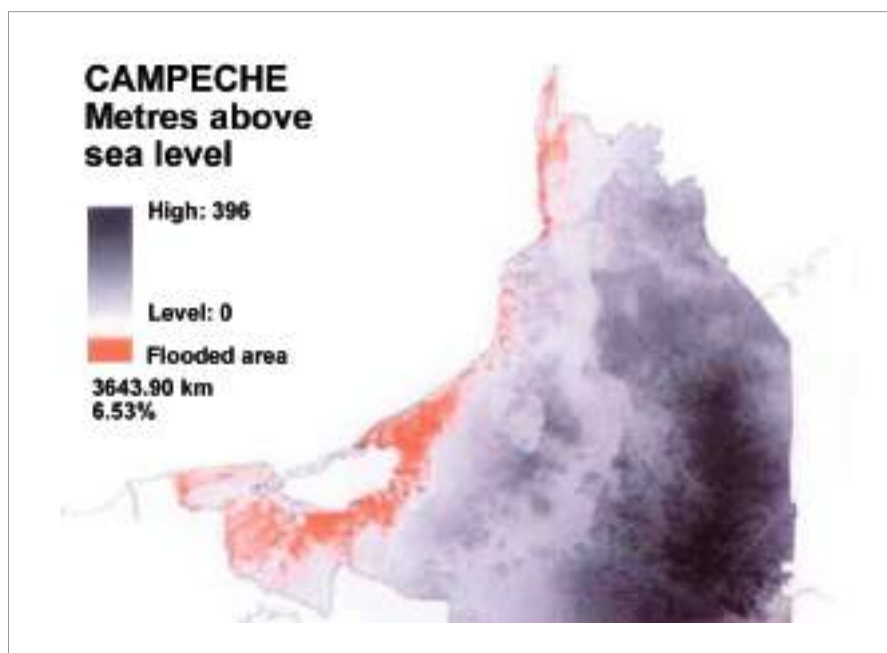


Figura A.7. Área inundada con +1.0m en el nivel del mar en Campeche (fuente: Caetano et al., 2010)

Además de estos esfuerzos, Carbajal Dominguez (2010) presentó, para todos los estados que colindan con el Golfo de México mapas de inundación debida a la subida del nivel medio del mar de 0.6 m, 1m y 2m. Para ello, utilizó datos del MDE de la Shuttle Radar Topography Mission con una resolución espacial de 90m en conjunto con datos de población obtenidos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2005). La Tabla A.4 resume el porcentaje de áreas afectadas reportado por Carbajal Dominguez (2010) ante los incrementos seleccionados. Además, para los casos de sobre-elevaciones del nivel del mar de +1.0m y +2.0m, realizó una comparación del área inundada a partir de dos fuentes de información distintas, estimando el área a partir del MDE del SRTM y los resultados del procesamiento de imágenes de la Universidad de Arizona (<http://geongrid.geo.arizona.edu/arcims/website/slrworld/viewer.htm>).

| Estado | +0.6m SLR | +1.0m SLR | +2.0m SLR | +1.0m SLR* | +2.0m SLR* |
|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Campeche | 12.46% | 12.60% | 15.00% | 7.46% | 9.50% |

Tabla A.4 Porcentaje de área afectada bajo diferentes escenarios de ascenso en el nivel del mar
*indica resultados obtenidos de las imágenes de la University of Arizona (fuente: Carbajal-Dominguez 2010)

Notablemente, el porcentaje de área afectada obtenido para el Estado de Campeche fue determinado entre el 12.60% con el SRTM y 7.46% utilizando datos de la Universidad de Arizona. La diferencia en estas cifras fue explicada debido a la presencia de vegetación alta en la región de interés. De hecho, el área afectada reportada para una subida de 1m del nivel del mar fue el doble de aquella reportada por Caetano et al. (2010). La discrepancia entre los valores de porcentaje de área afectada, reportados por diversos investigadores se explica en los errores de la resolución espacial y precisión vertical del MDE empleado en cada estudio. La novedad del trabajo presentado por Carbajal Dominguez (2010), reside en la integración de información poblacional en la zona costera de Campeche. Sus resultados se presentan en la Tabla A.5.

| Población afectada por un incremento en el nivel del mar de +1m | Número de habitantes |
|---|----------------------|
| Campeche | 211,671 |
| Cd. Del Carmen | 154,197 |
| Champotón | 27,235 |
| Seybaplaya | 8,285 |
| Sabancuy | 6,159 |
| Isla Aguada | 4,688 |
| Nuevo Progreso | 4,462 |
| Villa Madero | 3,507 |
| San Antonio Cárdenas | 3,319 |
| Palizada | 3,061 |
| Sihochac | 2,631 |
| Ley Federal de Reforma Agraria | 2,398 |
| Atasta | 2,096 |
| Checubul | 1,541 |
| Francisco Villa (Mamantel) | 1,208 |
| El Aguacatal (Chumpán) | 1,189 |
| Emiliano Zapata | 1,126 |
| CERESO San Francisco Kobén | 1,072 |
| Imí | 1,035 |
| Total | 440,910 |
| % Población | 58.41% |

Tabla A.5. Población afectada en Campeche debido a un incremento de +1m en el nivel del mar (fuente: Carbajal-Dominguez 2010)

Los resultados indican que 58.41% de la población del Estado está en una situación vulnerable ante un incremento de +1.0m en el nivel del mar (440,910 habitantes). Mientras que la concentración de la población afectada, se presenta principalmente en la Ciudad del Carmen (154,197 habitantes) y Campeche (211, 671 habitantes).

La disparidad en los números reportados por los diversos estudios que han cuantificado las áreas afectadas en Campeche, resaltan la necesidad de contar con datos de elevación con mejores resolución espacial y precisión vertical. Hinkel and Klein (2009) describieron que una manera de evitar la incertidumbre en la estimación del área y población afectada ante la subida del nivel del mar podría ser mediante el uso de tecnologías de punta para adquisición de datos. Por ejemplo, el uso de Laser Imaging Detection and Ranging system (LiDAR, por sus siglas en inglés) para la generación de MDE de mayor resolución ha sido identificado como una opción de mejoramiento en la información base (Hinkel et al., 2010).

Sin embargo, a la fecha, no existen estudios en el Estado de Campeche que incorporen la utilización de datos LiDAR en un análisis de áreas vulnerables a incrementos en el nivel del mar.

Torres Rodríguez et al. (2010) presentaron un análisis de los impactos de la subida del nivel del mar a lo largo de la costa de Campeche, en conjunto con una estimación de la tasa de erosión obtenida a partir del procesamiento digital de imágenes georeferenciadas. Respecto a los resultados asociados a los impactos por la subida del nivel del mar en la costa suroeste de Campeche, la Figura A.8 presenta los resultados obtenidos en función de las áreas afectadas asociadas a un incremento en el nivel del mar dado. De acuerdo con números reportados en investigaciones previas, el área más vulnerable corresponde a la vecindad de laguna de Términos. Una vez más, Ciudad del Carmen, localidad con gran importancia estratégica para el país por la concentración de infraestructura de PEMEX aparece como altamente vulnerable a este fenómeno. La información de elevación del terreno utilizada en este trabajo, corresponde a los datos del MDE que fue utilizado en los trabajos presentados por Ortiz Pérez y Méndez Linares (1999), Caetano et al. (2010) y Carbajal Dominguez (2010), con la diferencia de que en este estudio se incorporaron más escenarios de sobre elevación del nivel del mar (+3.0, +4.0, +5.0, +6.0, +14.0 m). Estos escenarios podrían representar situaciones extremas asociadas al deshielo total de los casquetes polares en Groenlandia (-6.5m, Grinsted et al. 2009). Sin embargo, los autores no proporcionaron ninguna justificación para su inclusión.

Los resultados indican que 58.41% de la población del Estado está en una situación vulnerable ante un incremento de +1.0m en el nivel del mar (440,910 habitantes). Mientras que la concentración de la población afectada, se presenta principalmente en la Ciudad del Carmen (154,197 habitantes) y Campeche (211, 671 habitantes).

La disparidad en los números reportados por los diversos estudios que han cuantificado las áreas afectadas en Campeche, resaltan la necesidad de contar con datos de elevación con mejores resolución espacial y precisión vertical. Hinkel and Klein (2009) describieron que una manera de evitar la incertidumbre en la estimación del área y población afectada ante la subida del nivel del mar podría ser mediante el uso de tecnologías de punta para adquisición de datos. Por ejemplo, el uso de Laser Imaging Detection and Ranging system (LiDAR, por sus siglas en inglés) para la generación de MDE de mayor resolución ha sido identificado como una opción de mejoramiento en la información base (Hinkel et al., 2010). Sin embargo, a la fecha, no existen estudios en el Estado de Campeche que incorporen la utilización de datos LiDAR en un análisis de áreas vulnerables a incrementos en el nivel del mar.

Torres Rodríguez et al. (2010) presentaron un análisis de los impactos de la subida del nivel del mar a lo largo de la costa de Campeche, en conjunto con una estimación de la tasa de erosión obtenida a partir del procesamiento digital de imágenes georeferenciadas. Respecto a los resultados asociados a los impactos por la subida del nivel del mar en la costa suroeste de Campeche, la Figura A.8 presenta los resultados obtenidos en función de las áreas afectadas asociadas a un incremento en el nivel del mar dado. De acuerdo con números reportados en investigaciones previas, el área más vulnerable corresponde a la vecindad de laguna de Términos. Una vez más, Ciudad del Carmen, localidad con gran importancia estratégica para el país por la concentración de infraestructura de PEMEX aparece como altamente vulnerable a este fenómeno. La información de elevación del terreno utilizada en este trabajo, corresponde a los datos del MDE que fue utilizado en los trabajos presentados por Ortiz Pérez y Méndez Linares (1999), Caetano et al. (2010) y Carbajal Dominguez (2010), con la diferencia de que en este estudio se incorporaron más escenarios de sobre elevación del nivel del mar (+3.0, +4.0, +5.0, +6.0, +14.0 m). Estos escenarios podrían representar situaciones extremas asociadas al deshielo total de los casquetes polares en Groenlandia (-6.5m, Grinsted et al. 2009). Sin embargo, los autores no proporcionaron ninguna justificación para su inclusión.

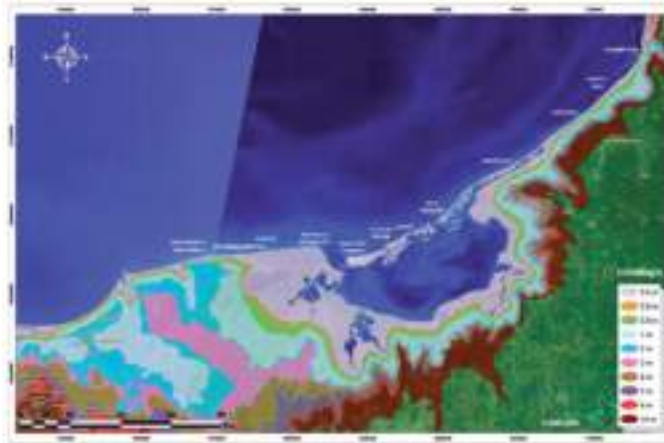


Figura A.8. Predicción de impactos de subida en el nivel del mar en el Suroeste de Campeche considerando incrementos de +0.4, +0.6, +1.0, +2.0, +3.0, +4.0, +5.0, +6.0, +14.0 m (fuente: Torres Rodríguez et al., 2010)

Además de los escenarios adicionales, Torres Rodríguez et al. (2010) incorporaron condiciones de subida del nivel del mar que resultan de los escenarios de cambio climático registrados en el cuarto reporte del IPCC (2007). Estos consideran proyecciones del nivel del mar para los años 2030: +0.08m, 2050: +0.135m y 2100: +0.33m, sus resultados se presentan en la Figura A.9. Cabe resaltar que la concentración actual de CO₂ en la atmósfera, ya rebasa el peor de los escenarios contemplados en el IPCC, por lo tanto resulta lógico concluir que cualquier proyección basada en este reporte (IPCC, 2007) está probablemente subestimando las condiciones reales.

Una forma de abatir la incertidumbre en las evaluaciones del comportamiento del nivel del mar en las costas del Estado de Campeche, consiste en la instalación de una red de monitoreo constante del nivel del mar a lo largo de la costa. Hasta hace poco, el Estado de Campeche no contaba con mediciones permanentes de niveles medios del agua en sus costas y ríos (con excepción del puerto de Ciudad del Carmen).

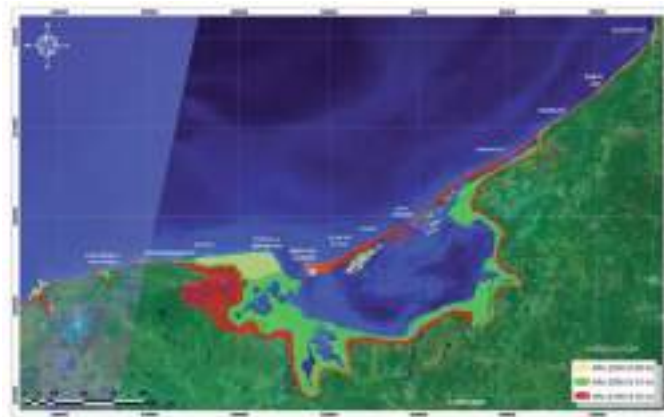


Figura A.9. Configuración de la línea de costa para los años 2030, 2050 and 2100 considerando incrementos de nivel del mar del AR4 correspondientes a +0.08m, +0.135m, +0.33m respectivamente (fuente: Torres Rodríguez et al., 2010)

En la actualidad, el Centro de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México de la Universidad Autónoma de Campeche (EPOMEX) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México desarrollan de manera conjunta, diversos proyectos de investigación en el litoral campechano (ej. Maldonado et al., 2010, Vega et al., 2010). A partir de esta colaboración se ha puesto en marcha un sistema de monitoreo (nivel del mar y temperatura) en la zona costera de Campeche (Posada-Vanegas et al. 2010a, Ruiz et al. 2010). La Figura A.10 presenta los puntos seleccionados a lo largo de la costa campechana (Ruiz et al. 2010).

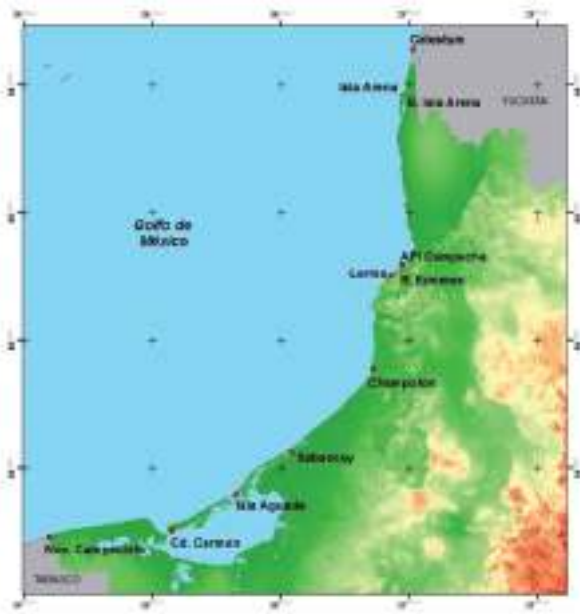


Figura A.10. Localización de mareógrafos (●) y barómetros (●) del sistema de medición de niveles y temperatura para el Estado de Campeche (fuente: Ruiz et al. 2010)

A.1.2 Incremento en el número de tormentas

Otro de los impactos en la zona costera frecuentemente asociados al cambio climático es el aumento en la frecuencia e intensidad de las tormentas. En consecuencia, en el caso de la costa tropical de México, es necesario considerar dentro de cualquier análisis de vulnerabilidad de la región costera, el impacto de la incidencia de huracanes más intensos sobre la misma.

De acuerdo con el trabajo publicado por Emanuel (2007), a la fecha los registros de actividad de huracanes indican una alta correlación en escalas multianuales, entre la temperatura de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) en el Atlántico y el índice de disipación de potencia (PDI, por sus siglas en inglés) de los huracanes (ver Figura A.11).

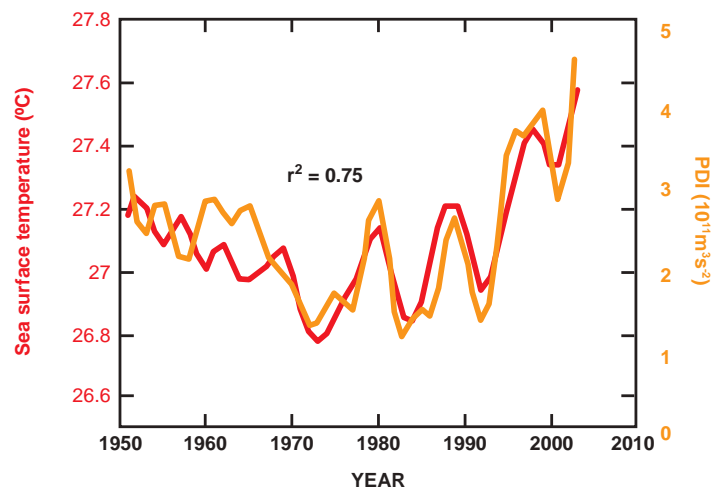


Figura A.11. Serie temporal de temperatura de la superficie del mar Atlántico al final del verano (azul) y el Índice de Disipación de Potencia (verde), que mide la actividad de los huracanes dependiendo de la frecuencia, duración e intensidad en una temporada. Los datos anuales han sido suavizados con un filtro de baja frecuencia para resaltar las variaciones en escalas de tiempo de varios años o más (fuente: Emanuel, 2007)

El PDI es una medida agregada de la actividad de los huracanes en el Atlántico, combina frecuencia, intensidad y duración del evento en un solo índice. Ambos, SST y PDI presentan un ascenso notable desde los años 70, en el caso del PDI, es evidente que se presentan valores más grandes de este índice en años recientes que en la década de los 50. A pesar de la correlación estadística que se reporta entre SST y la actividad de los huracanes (PDI), es prematuro concluir que la actividad antropogénica, y particularmente el calentamiento global por emisión de gases invernadero, hayan producido un cambio perceptible en la actividad de huracanes en el Atlántico (en este contexto “perceptible” significa que el cambio es lo suficientemente grande para ser distinguido de la variabilidad debida a procesos naturales). A pesar de que se ha registrado un aumento estadísticamente significativo de la intensidad de los huracanes, todavía no hay suficiente evidencia para concluir que este aumento es causado por el hombre. Sin embargo, es posible que la actividad humana ya haya causado algunos cambios sustanciales que se encuentran por debajo del umbral de detección, o que no son modelados correctamente (ej. efectos de la emisión de aerosoles en el clima regional).

Por otro lado, resultados numéricos de proyecciones del cambio climático para fines del siglo 21, apuntan hacia un incremento en la frecuencia e intensidad de huracanes (Categorías 4-5) en la vertiente Atlántica (Bender et al., 2010; ver Figura A.12). Los resultados se obtienen de utilizar el promedio de 18 modelos de clima global para forzar modelos regionales de mayor resolución.

Por lo tanto, es factible esperar que durante este siglo, un clima más caliente generará huracanes más intensos y precipitaciones más severas que las observadas hoy día de manera global (ej. Vecchi et al., 2008; Vecchi and Knutson 2008).

En la sección cinco de este reporte, se presenta un análisis histórico del número de huracanes y datos de precipitación provenientes de las estaciones hidrométricas dentro del Estado de Campeche.

A.1.3 Marea de tormenta

La inundación costera puede ocurrir por un sinnúmero de razones, entre ellas la incidencia de tsunamis, precipitaciones intensas, descargas extraordinarias de los ríos y marea de tormenta (ej. Penning-Rowse y Fordham 1994; Smith y Ward 1998; Parker 2000).

El Estado de Campeche se caracteriza por la alta concentración de la población en los municipios costeros y la localización de infraestructura petrolera en la costa, lo que se traduce en un incremento de los potenciales daños que una inundación costera puede acarrear. Las mareas de tormenta se generan por la presencia de tormentas tropicales y extra-tropicales típicas en el Golfo de México. La baja presión barométrica y la sobre-elevación por viento, trabajan de forma conjunta para generar un incremento temporal en el nivel del mar que tiene la capacidad de inundar las zonas bajas en la costa. Estos eventos están generalmente asociados a vientos extraordinarios y olas altas, lo que implica un aumento en el potencial de daño que se tendría si solo se considera la marea de tormenta (Nicholls, 2004).

La marea de tormenta es el cambio en el nivel del mar (positivo o negativo) que resulta de las variaciones en la presión atmosférica y los vientos asociados. Ocurren de forma simultánea a la marea astronómica, y en los casos en los que marea de tormenta positiva coincide con mareas vivas se pueden producir altos niveles de ascenso en el nivel del mar generando grandes inundaciones. Su magnitud está controlada en parte por la trayectoria de la tormenta, su intensidad, y la configuración del fondo marino y la línea de costa. Vientos con dirección hacia la costa acumulan el agua contra la misma, fenómeno que junto con las corrientes superficiales y el oleaje elevan la superficie libre del mar. La Tabla A.6 presenta de forma indicativa la magnitud de la marea de tormenta que se genera, como resultado de la incidencia de distintas categorías de huracanes, mostrando que mareas de tormenta de 6m o más son posibles.

| Categoría | Presión central (hPa) | Viento (km/hr) | Magnitud de la marea de tormenta (m) |
|-----------|-----------------------|----------------|--------------------------------------|
| 1 | >980 | 120-149 | 1.2-1.6 |
| 2 | 979-965 | 150-179 | 1.7-2.5 |
| 3 | 964-945 | 180-209 | 2.6-3.8 |
| 4 | 944-920 | 210-249 | 3.9-5.5 |
| 5 | <920 | >249 | >5.5 |

Tabla A.6. Características de los huracanes y su marea de tormenta asociada con base en la escala Saffir-Simpson (fuente: Smith y Ward, 1998)

La inundación resultante de la incidencia de mareas de tormenta en las costas tiene un amplio rango de impactos, desde daños materiales, el estrés en la población, la salud pública y en el peor de los casos víctimas mortales.

La extensión superficial y la profundidad de la inundación generada por este fenómeno depende de un rango de parámetros entre los que destacan la magnitud de la elevación y su duración, el mantenimiento de las obras de defensa (ej. muros verticales) y la elevación natural del terreno. En situaciones “naturales” en ausencia de obras de protección costera, como aquellas que se observan en la costa norte de Campeche (Los Petenes), la marea de tormenta disminuye de forma típica en el orden de 0.2 a 0.4 m por kilómetro recorrido tierra adentro. En consecuencia, una marea de tormenta extrema (del orden de los 6 m) incidiendo sobre zonas bajas (1 - 2m sobre el nivel del mar) puede alcanzar extensiones del orden de los 11 a los 16 km tierra adentro (Pielke and Pielke 1997).

En el caso del Estado de Campeche, existen esfuerzos numéricos recientes que se abocan al estudio de la marea de tormenta generada por ciclones tropicales (Posada-Vanegas et al., 2010b; Posada-Vanegas et al., 2011). Su metodología consiste en la solución del campo de vientos y presiones del huracán a través de un modelo paramétrico (Silva et al. 2000), utilizando estos resultados para forzar el modelo bidimensional que resuelve las ecuaciones de aguas someras. La discretización del modelo se realiza a través de un método de mallas adaptables que permiten la simulación de grandes regiones con alta eficiencia numérica (ver Figura A.13).

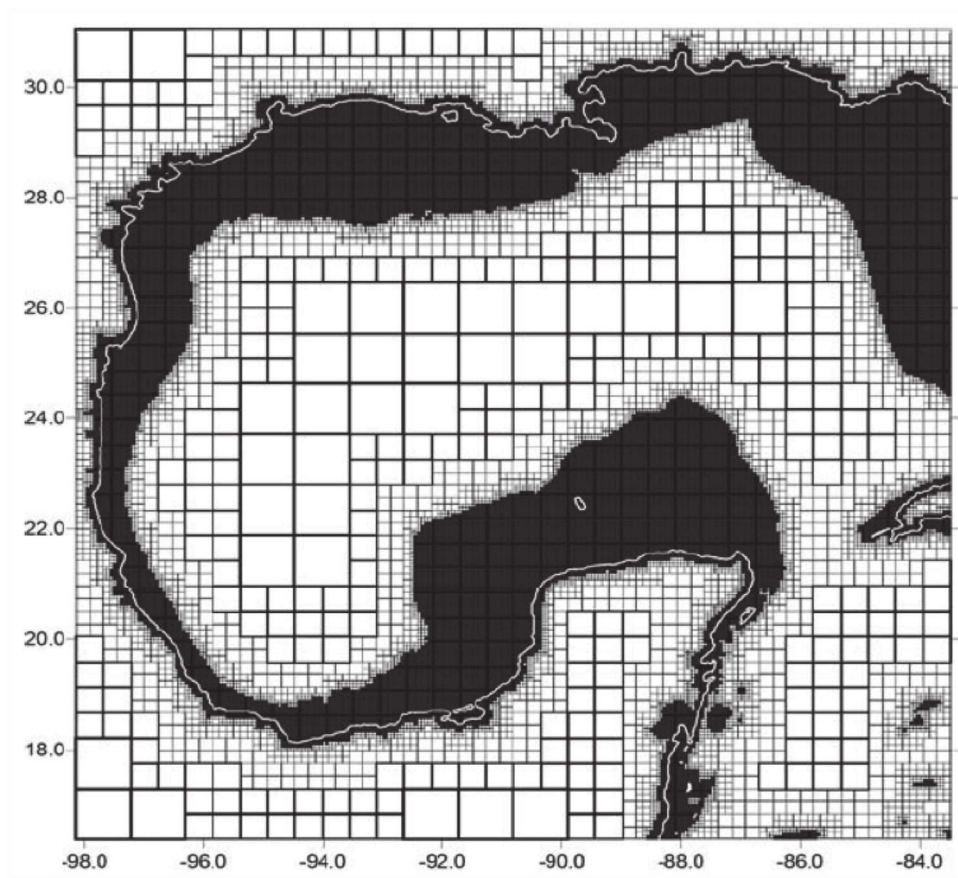


Figura A.13. Malla adaptable definida para la simulación de marea de tormenta en el Golfo de México (fuente: Posada Vanegas et al., 2011)

Este modelo utiliza los gradientes de presión generados por los campos de viento para deformar la superficie libre del mar. La aplicación exitosa de esta metodología ha sido demostrada por Posada-Vanegas y Vega Serratos (2010), para el caso de la Ciudad de Campeche, trabajo en el que se evaluaron las zonas inundables debido a los efectos de un norte (magnitud y dirección constantes, asociadas a un $Tr=100$ años) y bajo dos escenarios de nivel medio del mar (condiciones actuales y $+0.59$ m sobre el nivel del mar). Sus resultados principales indicaron que bajo condiciones de viento constante, las áreas más vulnerables ante la inundación por marea de tormenta son Los Petenes, zona comercial Akim-Pech y la parte central de la ciudad (zona amurallada), los dos últimos son terrenos ganados al mar entre los años 50 y 60 con la construcción del primer malecón. Los resultados de la línea de inundación máxima asociada a estos escenarios para la zona de la Ciudad de Campeche se presentan en la Figura A.14. La Tabla A.7 presenta los porcentajes de área afectada por el evento bajo ambas condiciones, en las que se observa que un incremento de ~ 60 cm en el nivel del mar triplica la superficie afectada por la inundación.

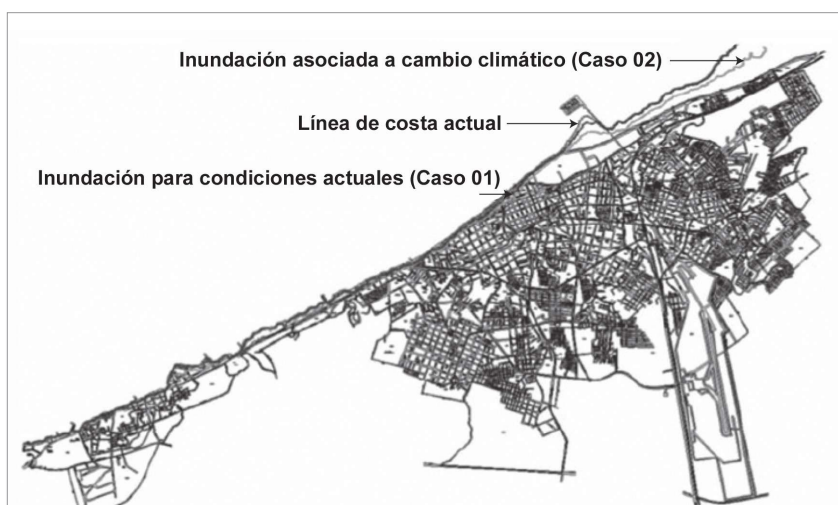


Figura A.14. Comparación de las líneas de inundación para condiciones de marea de tormenta con y sin influencia del ascenso en el nivel del mar, en la Ciudad de Campeche

| Condición | Área (m ²) |
|--|------------------------|
| Caso 01, condición actual | 475,574 |
| Caso 02, ascenso de $+0.59$ m asociado al cambio climático | 1,575,493 |

Tabla A.7. Comparación de las líneas de inundación para condiciones de marea de tormenta con y sin influencia del ascenso en el nivel del mar, en la Ciudad de Campeche

La caracterización de la peligrosidad asociada a la marea de tormenta generada por la incidencia de huracanes en la vertiente atlántica de México, fue el tema central de un trabajo reciente (Durán, 2011). En este trabajo, se modelaron todas las trayectorias de los huracanes que incidieron sobre la costa atlántica entre el periodo de tiempo entre 1949 y 2009. Con los datos numéricos se realizó un análisis estadístico de datos extremos a fin de generar mapas de periodo de retorno/marea de tormenta en cada uno de los seis estados que confirman el Golfo de México y el Mar Caribe mexicano.

Para el caso del Estado de Campeche, los resultados obtenidos para la incidencia de mareas de tormenta con periodos de retorno correspondientes a 100 y 500 años indican una muy alta peligrosidad (ver Figura A.15). De acuerdo a Durán (2011), Campeche representa el estado dentro de la vertiente atlántica de México que está expuesto a una marea de tormenta más severa. En el caso de una marea de tormenta con un periodo de retorno de 500 años, y para la zona este de Laguna de Términos, la costa de Sabancuy y el Área Natural Protegida de Los Petenes, se reportan sobre elevaciones máximas de $+3.8$ m en el nivel del mar.

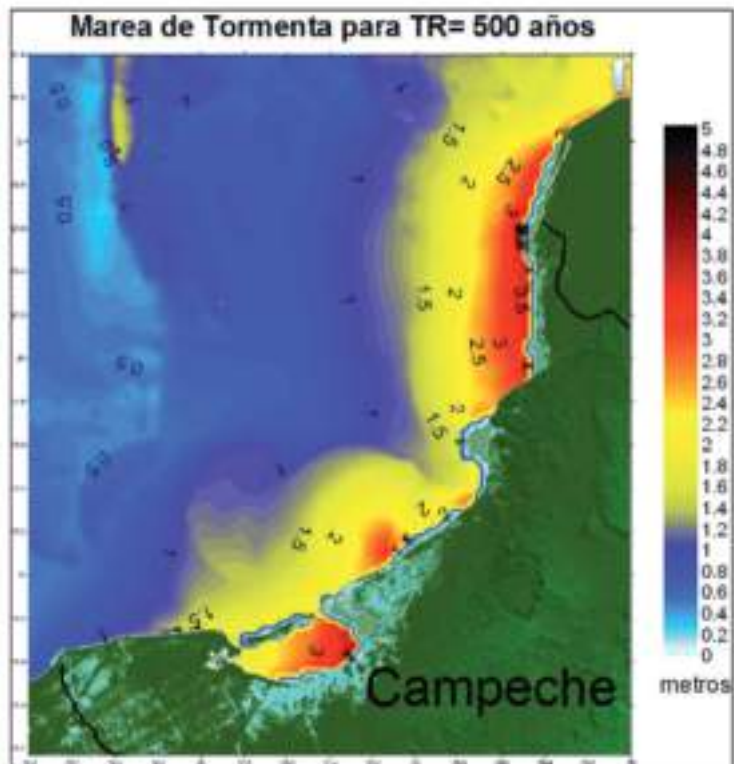
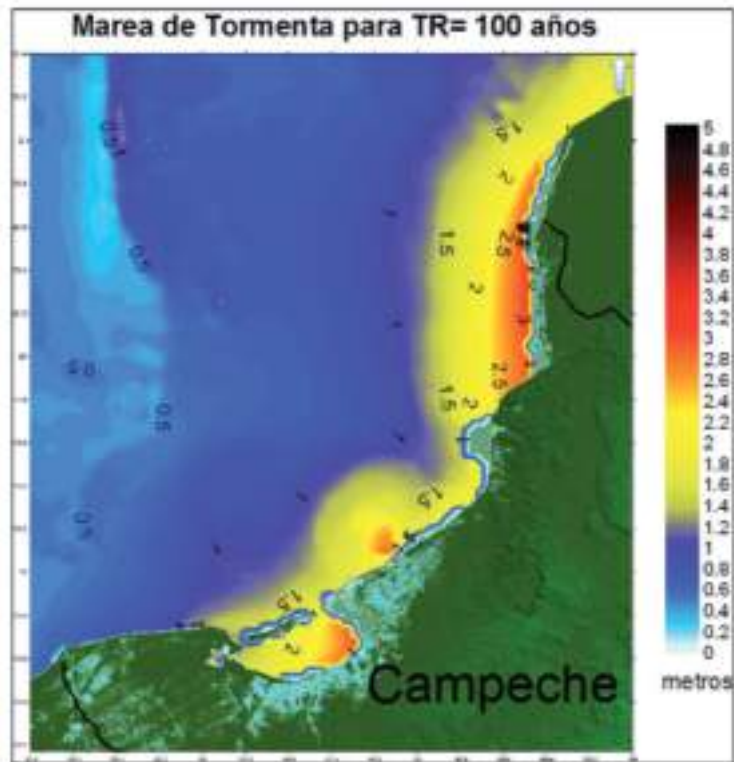


Figura A.15. Mareas de tormenta asociada a huracanes con periodos de retorno de 100 y 500 años para el Estado de Campeche (fuente: Durán, 2011)

A.1.4 Erosión costera

A pesar de que ya contamos con amplia evidencia del incremento en las temperaturas a nivel global, todavía no existe evidencia convincente de que el ascenso en el nivel del mar esté asociado a factores antropogénicos. Sin embargo, este último incremento parece ser físicamente muy probable, por lo que la implementación de políticas que consideren los efectos en las zonas costeras es aconsejable. De hecho, el IPCC ha funcionado de manera excepcional en la creación de una conciencia política y social en todos los países del mundo, generando en diversas naciones iniciativas para evaluar, mitigar y adaptarse ante los posibles impactos del cambio climático.

El incremento en la erosión costera es también catalogado como uno de los impactos del incremento en el nivel del mar en el litoral. Evidentemente, el conocimiento del nivel del mar en zonas con elevaciones bajas es primordial para un correcto diseño de obras de protección, sean estas suaves (rellenos artificiales), duras (muros verticales de contención) o combinaciones de ambas (Hamm et al., 2002). La respuesta natural de los sistemas costeros con déficit de sedimento será la inundación, esto implica el retroceso de la línea de costa delimitado por la pendiente local de la zona costera. Las pendientes en zonas con baja o nula disponibilidad de sedimentos pueden ser tan suaves como 1 a 1000, lo que resulta en un retroceso de la playa a una velocidad tres órdenes de magnitud más rápida que la que se presenta en escenarios de subida de nivel del mar (el fenómeno se amplifica).

Ahora bien, si no hay fuentes o sumideros de sedimentos alrededor del sistema costero, y si no hay gradientes en el transporte de sedimento en las direcciones transversal y longitudinal, la llamada regla de Bruun (Bruun, 1962) es válida y aplicable al 100%. Sin embargo, cabe resaltar que la condición idealizada por Bruun representa más bien la excepción de la regla.

Desde el trabajo pionero de Bird (1985), un punto de vista generalizando consiste en admitir que el 70% de las playas de arena están sujetas a un proceso de erosión, siendo la principal causa de este fenómeno el incremento en el nivel del mar (ej. Leatherman et al. 2000). Sin embargo, existen muchos sistemas costeros que durante el Holoceno, mostraron evidencia de acreción en sus playas, a pesar de estar expuestos a un incremento en el nivel del mar. Algunos ejemplos se rescatan en la costa Australiana (Short, 2003), en costas deltaicas (ej. ríos Mississippi, Ebro, Po, Yangtze) y en la costa holandesa (Cowell et al., 2003). Esto demuestra que además del proceso erosivo descrito por la regla de Bruun debe haber más mecanismos involucrados en la respuesta morfológica de una playa ante las condiciones climáticas. Así, la respuesta de un sistema costero, ante la subida del nivel del mar está determinada en gran medida por factores específicos a cada sitio de análisis. Por lo tanto, cualquier predicción de la respuesta de la playa ante el cambio climático tendrá una baja confiabilidad a menos de que se realice un estudio detallado y se tengan datos disponibles de los cambios observados en el largo plazo.

El proceso de la erosión costera es el resultado de una combinación de factores naturales y antropogénicos que tienen lugar a diferentes escalas espaciales y temporales. Respecto a los factores naturales, se encuentran principalmente la incidencia de tormentas sobre las costas, las corrientes de resaca y de litoral, y el aumento relativo del nivel medio del mar. Mientras que respecto al factor humano, la principal influencia está determinada por la destrucción de dunas (construyendo sobre ellas) y la alteración de flujos naturales de sedimento a lo largo de las costas, por medio de la colocación de estructuras perpendiculares al transporte litoral (ej. rompeolas).

En el caso del Estado de Campeche, el único estudio abocado a la investigación de la erosión costera en sus costas fue presentado por Torres Rodríguez et al. (2010), quienes a partir de fotografías aéreas, mapas topográficos en formato vectorial, ortofotografías del INEGI e imágenes de satélite de diversas resoluciones (Landsat 3, 5, 7) determinaron la tasa de erosión costera para un periodo de 1974-2008 en 8 puntos estratégicos ubicados a lo largo del litoral campechano.

La zona de interés en este estudio, comprende una extensión de 240 km de longitud medidos desde la península de Atasta en la parte Oeste de laguna de Términos, hasta la localidad de Champotón (Ver Figura A.16). Según los resultados presentados por Torres Rodríguez et al. (2010), prácticamente toda la región de estudio en el litoral de Campeche se encuentra bajo un proceso de erosión.

Cabe mencionar que toda la costa de Campeche está expuesta a eventos extremos de oleaje y mareas de tormenta inducidos por la presencia de huracanes y nortes. Estos eventos causan cambios significantes en la línea de costa (de hasta decenas de metros), y la tendencia general de la costa dependerá de su capacidad de recuperación después de los eventos. Es decir, es normal observar en el mediano plazo, periodos de acreción y erosión en los sistemas costeros. En consecuencia, para diagnosticar de mejor manera las condiciones de la línea de costa del Estado de Campeche se requiere una extensión del trabajo realizado por Torres Rodríguez et al. (2010).



Figura 4.16. Localización de la zona de estudio y localidades de interés (fuente: Torres Rodríguez et al., 2010)

En la Tabla A.8 se presenta el resumen de los resultados de Torres Rodríguez et al. (2010) para los 8 puntos estudiados, durante el periodo de tiempo de 1974-2008. De acuerdo con estos resultados, la parte este de la zona de estudio es la que se encuentra en condiciones más críticas respecto a la erosión cuantificada en estos puntos.

| Sitio | Intervalo de estudio (años) | Desplazamiento de la costa (m) | Tasa de erosión (m/año) |
|------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 1. Punta la Disciplina | 34 | -581.9 | -7 |
| 2. Playa Norte | 31 | -8.1 | -0.3 |
| 3. Club de Playa | 33 | -171 | -5.2 |
| 4. CASES | 33 | -117.7 | -3.6 |
| 5. Isla Aguada | 31 | -5.7 | -0.2 |
| 6. Sabancuy | 31 | -211.2 | -6.8 |
| 7. Punta de Xen | 28 | -124.6 | -4.4 |
| 8. Champotón | 32 | -77.2 | -2.4 |

Tabla A.8 Desplazamiento neto de la línea de costa en los 8 puntos estratégicos estimados en la costa de Campeche (fuente: Torres Rodríguez et al., 2010)

De acuerdo a la condición reportada para la erosión en estos puntos, Torres Rodríguez et al. (2010) clasifican la vulnerabilidad de Punta Disciplina, en la península de Atasta, como extrema. En la Figura A.17 se presentan las condiciones de línea de costa en los años de 1974 y 2008. En los que aparentemente se aprecia la ampliación del fenómeno erosivo en dirección Oeste-Este.

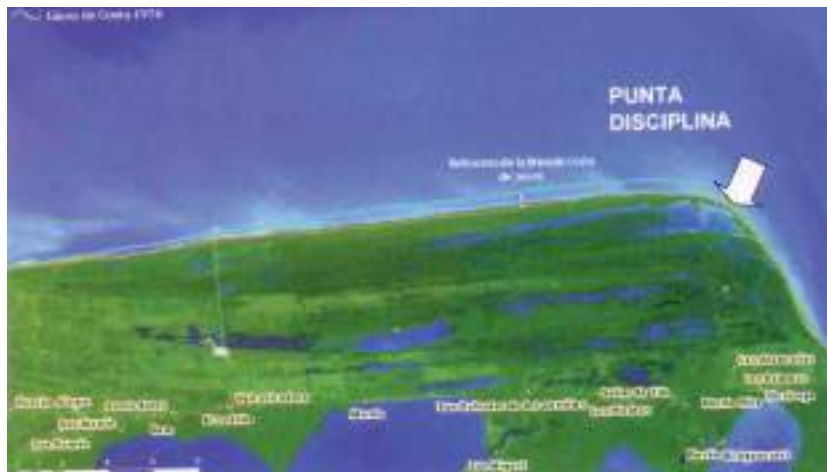


Figura A.17. Comparación de la línea de costa de 1974 a 2008 en la península de Atasta en Campeche, referida a los resultados de Punta Disciplina (fuente: Torres Rodríguez et al., 2010)

En otras localidades, como es el caso de los puntos identificados como CASES y Club de Playa, se reportan desplazamientos de la línea de costa del orden de los 117 y 171 metros, respectivamente. Las Figuras A.18 y A.19 presentan los resultados correspondientes.



Figura A.18. Identificación de zonas de erosión en la localidad de CASES, Isla del Carmen, Campeche periodo 1984 a 2004 (fuente: Torres Rodríguez et al., 2010)



Figura A.19. Identificación de zonas de erosión en la localidad de Club de Playa, Isla del Carmen, Campeche periodo 1984 a 2004 (fuente: Torres Rodríguez et al., 2010)

Respecto al punto localizado en la parte Oeste de la Isla del Carmen, identificado con el nombre de Playa Norte, se digitalizaron las líneas de costa correspondientes a los años de 1974, 1986, 1996, 2005 y 2008. Por medio de la comparación espacial de esta información, fue posible identificar los patrones de cambio de la costa en esta zona. La Figura A.20 presenta los resultados obtenidos por Torres Rodríguez et al. (2010).

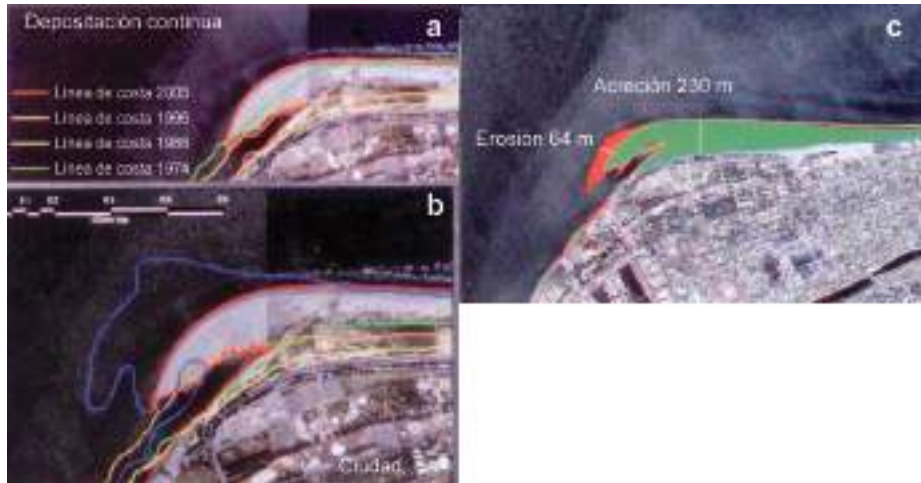


Figura A.20 Identificación de zonas de erosión/acreción en Playa Norte, Isla del Carmen, Campeche periodo 1974 a 2004, la línea azul corresponde al año 2001 (fuente: Torres Rodríguez et al., 2010)

La Figura A.21 presenta un resumen del desplazamiento de la línea de costa para los puntos analizados en el estudio macro de Márquez García et al. (2008), en la que se ilustra el desplazamiento anual promedio de erosión o depósito de sedimento para cada sitio, identificando a las playas de Atasta y Punta Disciplina como las de mayor erosión. Sin embargo, cabe resaltar que estos puntos se encuentran ubicados en las entradas mareales de Laguna de Términos, por lo que es de esperarse que se reporte una dinámica litoral muy variable en estos sitios.

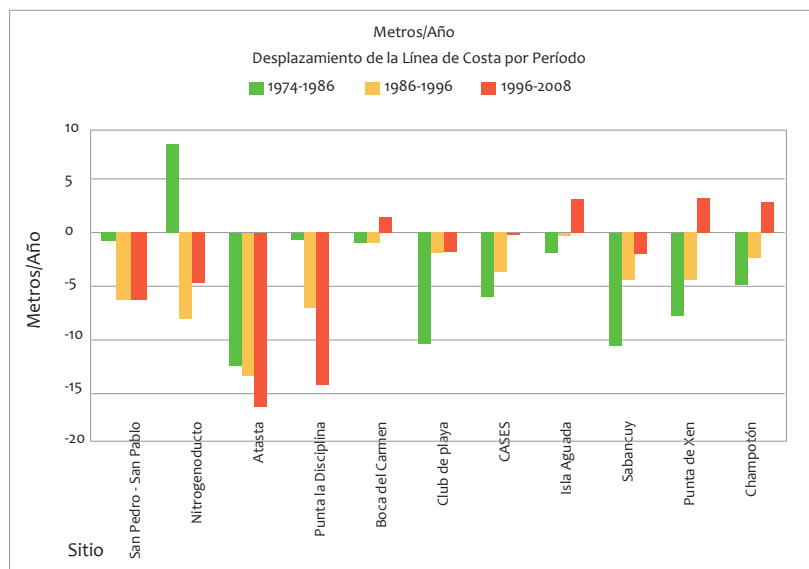


Figura A.21. Resumen de movimientos de la línea de costa a lo largo del litoral de Campeche para el periodo de tiempo entre 1974 a 2008 (fuente: Márquez García et al., 2008)

En este estudio se reportaron además los resultados de las diferencias de volumen de sedimentos por época y balance estacional (ver Tabla A.9). Se obtuvieron las mayores variaciones morfológicas de la zona litoral en los puntos Club de Playa, Punta Disciplina y CONANP 2.

| Sitio | Perfil | Volumen de sedimento estimado (m ³) | | | | | | Cálculo de balance |
|---|--------|---|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|
| | | De lluvias 2005 a nortes 2006 | De nortes 2006 a secas 2006 | De secas 2006 a lluvias 2006 | De lluvias 2006 a nortes 2007 | De nortes 2007 a secas 2007 | De secas 2007 a lluvias 2007 | |
| Desembocadura del Río San Pedro - San Pablo | 1 | 0.226 | 0.162 | -0.188 | 0.465 | 0.013 | -0.251 | 0.428 |
| | 2 | 0.054 | 0.069 | 0.407 | -0.083 | 0.058 | 0.324 | 0.828 |
| | 3 | -0.038 | 0.099 | 0.512 | -0.370 | 0.096 | 0.291 | 0.591 |
| Nitrogenoducto | 4 | 0.065 | 0.065 | -0.170 | -0.095 | 0.086 | 0.265 | 0.215 |
| | 5 | 0.146 | 0.104 | -0.202 | -0.010 | -0.133 | 0.177 | 0.081 |
| | 6 | 0.048 | -0.007 | -0.158 | 0.053 | 0.109 | -0.040 | 0.005 |
| Ducto CPTG-Atasta | 7 | 0.088 | -0.187 | -0.049 | ** | ** | 0.007 | -0.141 |
| | 8 | * | 0.079 | 0.096 | ** | ** | 0.222 | 0.397 |
| | 9 | * | 0.211 | 0.004 | ** | ** | 0.043 | 0.259 |
| Playa la Disciplina | 10 | 0.049 | -0.056 | -0.042 | 0.237 | 0.263 | -0.470 | -0.021 |
| | 11 | 0.126 | -0.241 | 0.082 | 0.221 | 0.362 | -0.075 | 0.476 |
| | 12 | 0.189 | -0.075 | -0.130 | 0.207 | 0.228 | -0.307 | 0.112 |
| Faro | 13 | 0.008 | -0.127 | -0.040 | -0.255 | 0.248 | 0.026 | -0.140 |
| Puente Zacatal | 14 | 0.002 | 0.097 | -0.016 | 0.074 | 0.071 | 0.052 | 0.280 |
| | 15 | -0.136 | 0.183 | 0.002 | 0.140 | -0.045 | -0.051 | 0.093 |
| | 16 | -0.085 | -0.147 | 0.113 | 0.125 | -0.108 | 0.178 | 0.076 |
| Playa Norte, Ciudad del Carmen | 17 | -0.032 | 0.229 | -0.069 | -0.049 | 0.013 | -0.138 | -0.046 |
| | 18 | -0.008 | 0.035 | 0.132 | -0.163 | -0.097 | 0.121 | 0.019 |
| | 19 | -0.294 | 0.159 | -0.159 | 0.041 | -0.089 | 0.067 | -0.275 |
| Km 9 carretera Isla del Carmen | 20 | 0.310 | -0.251 | 0.496 | 0.230 | -0.563 | 0.314 | 0.536 |
| Club de playa | 21 | -0.101 | 0.036 | 0.186 | 0.066 | 0.387 | -0.085 | 0.489 |
| | 22 | -0.034 | 0.418 | 0.255 | 0.699 | -1.199 | 0.851 | 0.990 |
| | 23 | -0.439 | 0.195 | 0.981 | -0.255 | -0.411 | 0.154 | 0.224 |
| Bahamita | 24 | 0.012 | 0.165 | -0.012 | -0.132 | 0.186 | 0.024 | 0.243 |
| CASES | 25 | -0.255 | -0.239 | -0.707 | 0.768 | 0.068 | -0.014 | -0.379 |
| | 26 | -0.250 | -0.103 | 0.321 | -0.202 | 0.243 | 0.024 | 0.032 |
| | 27 | 0.016 | -0.042 | 0.222 | -0.089 | 0.233 | 0.115 | 0.455 |
| km 28 carretera Isla del Carmen | 28 | 0.066 | 0.014 | -0.183 | 0.042 | 0.021 | -0.287 | -0.327 |
| San Nicolasito | 29 | -0.002 | -0.351 | 0.091 | 0.028 | -0.261 | -0.097 | -0.593 |
| Punta Real | 30 | -0.171 | 0.118 | 0.127 | -0.224 | 0.138 | 0.042 | 0.029 |
| | 31 | 0.047 | 0.029 | -0.133 | 0.274 | -0.168 | 0.131 | 0.179 |
| | 32 | 0.118 | -0.098 | 0.182 | -0.033 | 0.176 | -0.351 | -0.005 |

| Sitio | Perfil | Volumen de sedimento estimado (m ³) | | | | | | |
|---------------------------------|--------|---|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|
| | | De lluvias 2005 a nortes 2006 | De nortes 2006 a secas 2006 | De secas 2006 a lluvias 2006 | De lluvias 2006 a nortes 2007 | De nortes 2007 a secas 2007 | De secas 2007 a lluvias 2007 | Cálculo de balance |
| Isla Aguada | 33 | 0.071 | 0.140 | 0.138 | -0.176 | -0.078 | -0.018 | 0.077 |
| Km 54 carretera a Champotón | 34 | -0.034 | 0.187 | -0.123 | 0.375 | -0.416 | -0.071 | -0.082 |
| Sabancuy, campamento tortuguero | 35 | 0.018 | -0.127 | 0.067 | 0.075 | -0.122 | 0.015 | -0.073 |
| Chenkan, campamento tortuguero | 36 | 0.002 | -0.147 | -0.105 | 0.022 | -0.144 | 0.033 | -0.340 |
| El hueso | 37 | -0.222 | 0.160 | 0.276 | -0.417 | 0.132 | -0.01 | -0.085 |
| Km 134 Carretera a Champotón | 38 | -0.123 | 0.034 | 0.045 | -0.076 | 0.003 | 0.092 | -0.023 |
| Champotón | 39 | 0.006 | -0.004 | -0.026 | 0.181 | -0.217 | 0.216 | 0.157 |
| | 40 | -0.184 | 0.034 | -0.009 | 0.045 | -0.123 | 0.290 | 0.053 |
| | 41 | 0.054 | 0.114 | -0.061 | 0.035 | -0.174 | 0.160 | 0.127 |
| Punta la Disciplina | 42 | *** | -0.047 | -0.189 | -0.116 | -0.276 | -0.170 | -0.706 |
| CONANP1 | 43 | *** | *** | 0.408 | -0.532 | 0.097 | 0.232 | 0.204 |
| CONANP2 | 44 | | | | 0.676 | -0.379 | 0.503 | 0.800 |
| | 45 | *** | *** | * | 1.295 | -0.856 | -0.560 | -0.121 |
| | 46 | | | | 1.363 | -1.134 | -0.558 | -0.330 |
| CONANP3 | 47 | | | -0.095 | 1.028 | -0.832 | -0.044 | 0.056 |
| | 48 | *** | *** | -0.212 | 0.266 | -0.223 | 0.140 | -0.028 |
| | 49 | | | 0.181 | -0.670 | 0.065 | 0.524 | 0.101 |
| CONANP4 | 50 | *** | *** | *** | *** | -1.181 | 0.423 | -0.758 |
| Sabancuy-CAPA | 51 | | | | | | | Solo un muestreo |
| | 52 | *** | *** | *** | *** | *** | *** | |
| | 53 | | | | | | | |

Tabla A.9 Diferencias de volumen de sedimentos entre las épocas estacionales y cálculo de balance estacional de las playas muestreadas (fuente: Márquez García et al. 2008)

Es necesario hacer notar, que los resultados de la investigaciones realizadas por Márquez García et al. (2008) y Torres Rodríguez et al. (2010) son útiles para la estimación de la erosión costera en el Estado. Sin embargo, existen un sin número de incertidumbres asociadas a los resultados de ambos estudios, entre los que destaca la resolución de las imágenes de satélite y el error que se puede tener durante el proceso de digitalización dependiendo de la resolución espacial del pixel.

En consecuencia, y a fin de reducir la incertidumbre generada por estas técnicas de percepción remota, se recomienda el establecimiento de un programa de monitoreo de las costas campechanas, especialmente donde se encuentran instalaciones estratégicas a fin de que se pueda contar con mediciones mensuales/trimestrales de perfiles de playa y batimetrías.

Esto permitirá establecer con más certeza un diagnóstico del Estado de la zona costera del Estado de Campeche, por medio de la generación de una base de datos de mayor resolución temporal (más años) y espacial (más segmentos de costa). Ejemplos de este tipo de sistema de monitoreo los hay disponibles en todo el mundo. Con el propósito de proporcionar dos ejemplos destacables, se refiere al lector a las páginas web del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en Carolina del Norte (<http://www.frf.usace.army.mil/>) y el esfuerzo realizado por el Observatorio de las Costas del Canal de la Mancha del Reino Unido (<http://www.channelcoast.org/>).

A.2 Estudios ambientales

Los ecosistemas costeros están sujetos a muchas presiones, como son los cambios en los depósitos de nutrientes y el ingreso de contaminantes a las lagunas, ríos y estuarios, además de la introducción de especies exóticas y la variabilidad natural del clima. El cambio climático constituye una presión adicional que puede alterar o poner en riesgo estos sistemas naturales.

Existen un gran número de estudios de observación y experimentales que demuestran la vinculación entre el cambio en el clima regional y los procesos físicos o biológicos de los ecosistemas.

De confirmarse el cambio climático mundial éste resultará en aumento de la temperatura de la superficie del mar y del incremento del nivel del mar; de la disminución de la cobertura del hielo marino, así como los cambios en la salinidad, las ondas climáticas y la circulación de los océanos. Por ejemplo, se prevé que los cambios en los océanos presentarán efectos importantes de retroalimentación sobre el clima mundial y particularmente el de la zona costera inmediata.

Los ecosistemas costeros como los arrecifes de coral, marismas de agua salada, manglares y la vegetación acuática sumergida sufrirán los impactos del incremento del nivel del mar, el aumento de la temperatura de la superficie del mar, la acidificación del agua y cualquier cambio en la frecuencia e intensidad de las tormentas. Los impactos de este aumento en el nivel medio del mar sobre manglares y marismas de agua salada dependerán de la tasa de incremento en relación con la acreción vertical y el espacio para la migración horizontal, que puedan estar limitadas por el desarrollo humano y el turismo en zonas costeras.

En México, el litoral costero abarca una gran variedad de ambientes que incluyen: ríos, deltas, estuarios, lagunas, bahías, humedales, manglares y arrecifes, los cuales proporcionan una infinidad de hábitats que propician una gran diversidad biológica (De la Lanza Espino et al. 2010). En estas zonas se ubican importantes centros suburbanos y se desarrollan actividades, como la extracción de petróleo, turismo, agricultura, pesca y acuicultura, entre otras. Entre los ambientes costeros más vulnerables que han sido ubicados en el Estado de Campeche se encuentran Los Petenes. Se estima que este ecosistema por su localización en la zona intermareal, sea de los más afectados ante un incremento en el nivel medio del mar.

A.2.1 Impactos en ecosistemas costeros

Uno de los ecosistemas más vulnerables que han sufrido una mayor pérdida son los humedales costeros mexicanos, cuyos servicios ambientales no han sido estimados en todo su potencial. Estos ecosistemas actúan como amortiguadores de zonas contaminadas además de caracterizarse por su riqueza en la biodiversidad. La principal amenaza a la que estos sistemas están expuestos es la alteración del régimen de precipitaciones (ciclo hidrológico) y los flujos naturales por construcción de infraestructura petrolera y carreteras.

Dentro de los ecosistemas costeros más importantes en el Estado de Campeche, se encuentra el de Laguna de Términos, que corresponde a un cuerpo costero que por su morfología comprende la laguna costera más grande del país. Esta laguna recibe los aportes fluviales de tres ríos: Candelaria, Chumpán y Palizada que se encargan de abastecer de nutrientes a la laguna.

De acuerdo al estudio publicado por Yáñez-Arancibia et al. (1988), este cuerpo lagunar recibe más aportes fluviales y pluviales durante la temporada de lluvias que comprende el periodo de tiempo entre los meses de junio y octubre. Además de los flujos de nutrientes que llegan a la laguna vía fluvial, la hojarasca procedente del manglar representa otro aporte significativo a este ecosistema. En esta laguna se han asentado en la boca del Carmen desarrollos humanos así como las actividades pesqueras y petroleras registradas en las márgenes de la laguna. Esta situación puede inducir a una eutrofización particularmente si se incrementa el nivel del mar, favoreciendo la entrada de agua marina en la laguna.

A.2.2 Anidación de tortugas

Un posible efecto ambiental del cambio climático en las costas del Estado de Campeche, ha sido identificado respecto a la supervivencia de tortugas marinas que utilizan las playas del Estado para el desove natural y la dispersión de crías. El incremento pronosticado en el nivel medio del mar, puede traer consigo más erosión de las playas. Esto representa una potencial degradación de su hábitat y una reducción de las zonas litorales donde las tortugas marinas realizan el desove (Márquez y Jiménez, 2010).

Su ubicación geográfica y las características físicas de los sistemas costeros del Estado de Campeche, lo ubican como uno de los de mayor importancia para las tortugas marinas. De las ocho especies de tortugas marinas que existen en el mundo, siete llegan a desovar en playas mexicanas y de éstas, tres (en peligro de extinción) arriban a las costas del Estado de Campeche (UICN, 2001). Es por ello que el conocimiento de la dinámica litoral, así como la identificación de los patrones de anidación de las tortugas marinas, representan información valiosa para la realización de programas de manejo y conservación de los ecosistemas costeros.

La vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera en el Estado de Campeche fue motivo de una investigación reciente presentada por Bolongaro Crevena et al. (2010). En particular, se estudiaron los sitios correspondientes a Isla Aguada y Chenkan con longitudes de 20 y 30km, respectivamente. La selección de estos puntos se hizo para identificar la variación anual en el número de nidos de tortuga que se observaban en dos playas con características distintas, una estable y otra expuesta a procesos erosivos.

La Figura A.22 presenta la distribución espacial de los nidos a lo largo de la playa de Isla Aguada entre los años de 2004 a 2006. En los que se observa un comportamiento estable en el número de nidos entre los años 2004 y 2005, notándose un leve incremento en el año 2006. De acuerdo a las conclusiones manifiestas en el estudio de Bolongaro Crevena et al. (2010), esta variación se debe a la construcción de los espigones en los años 2004 y 2005, que de acuerdo a los autores debieron atenuar las anidaciones de las tortugas.

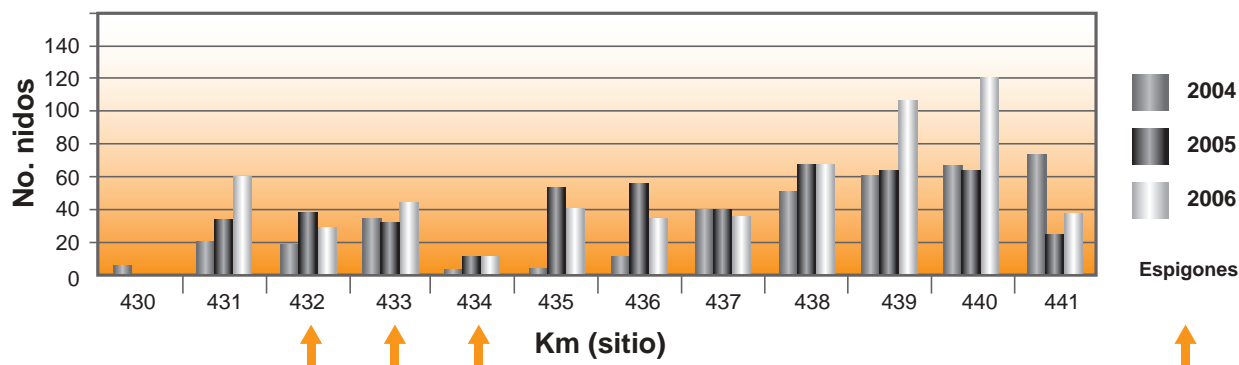


Figura A.22 Distribución espacial de las anidaciones de tortuga marina para el periodo de tiempo entre 2004-2006, Isla Aguada, Campeche (fuente: Bolongaro Crevena et al., 2010)

En el caso de la playa sujeta a procesos erosivos (Chenkan), el número de nidos de tortuga reportados a lo largo de la línea de costa es menor que en el de la playa estable. Esto se debe a la dificultad que presenta para las tortugas una playa con pendiente más pronunciada o con escarpes.

La Figura A.23 presenta la distribución espacial de los nidos a lo largo de la playa de Chenkan entre el mismo periodo de tiempo de 2004 a 2006. De hecho, es posible determinar que en ambas playas se observó el mismo patrón de comportamiento en el número de nidos, presentándose un leve incremento en el año 2006. En la

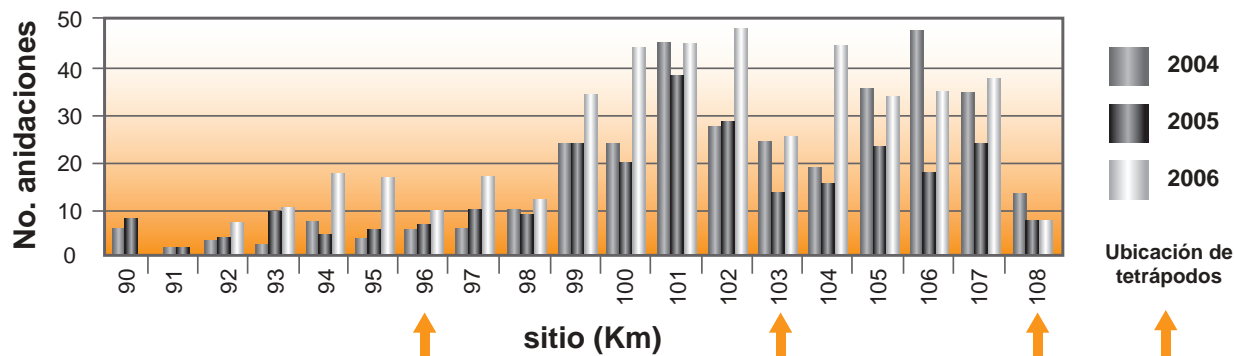


Figura A.23 Distribución espacial de las anidaciones de tortuga marina para el periodo de tiempo entre 2004-2006, Isla Aguada, Campeche (fuente: Bolongaro Crevena et al., 2010)

investigación de Bolongaro Crevena et al. (2010), también se evaluaron de forma muy cualitativa los efectos que el incremento del nivel del mar tendrían sobre las playas estudiadas, con el propósito de diagnosticar su efecto sobre los nidos de tortuga. Sin embargo, su análisis consistió en la simple proyección en los perfiles de playa medidos con las líneas de incremento del nivel del mar dadas por +40cm, +60cm +80cm y +1m. Como es evidente, los autores concluyen que un incremento en el nivel del mar puede resultar catastrófico para las tortugas marinas por la erosión que se podría observar en las playas estudiadas.

Cabe señalar que para verificar estas conclusiones es necesario implementar programas de monitoreo continuo de la morfología de playas. Dado que la respuesta morfológica de estos sistemas costeros ante el clima marítimo es altamente no lineal.



**Banco
Mundial**

www.bancomundial.org.mx