

---

**CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO  
UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO**

**ELEMENTOS AMBIENTALES  
PARA TOMADORES DE DECISIONES**

---



Yáñez-Arancibia, A., y J. W. Day, 2010. La zona costera frente al cambio climático: vulnerabilidad de un sistema biocomplejo e implicaciones en el manejo costero, p. 3-22. En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual y G.J. Villalobo-Zapata (eds.). Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche CETYS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# La zona costera frente al cambio climático: vulnerabilidad de un sistema biocomplejo e implicaciones en el manejo costero\*

*Alejandro Yáñez-Arancibia y John W. Day*

---

## RESUMEN

El enfoque de este trabajo plantea como punto central el manejo-ecosistémico y como variables esenciales, la vulnerabilidad de las costas como sistemas biocomplejos, los costos reales por desastres naturales inducidos por el cambio climático, y las estrategias de mitigación hacia un manejo integrado. El enfoque-ecosistémico es la situación que debe prevalecer cuando el hombre busca utilizar los recursos naturales e interrumpe la dinámica de los sistemas provocando los decrementos de las utilidades, todavía más ante los impactos climáticos meteorológicos. Desde el punto de vista de escalas espaciales y temporales y con la premisa de preservar la integridad ecológica del sistema, se concluye que la cuenca de drenaje en la unidad de hábitats acoplados: “*cuenca baja-humedales-delta-lagunas costeras-estuario-pluma estuarina sobre la plataforma continental*”, es el nivel ecosistémico óptimo para un enfoque exitoso de manejo integrado de la zona costera, severamente amenazada por los impactos del cambio climático. Si no se comprende este funcionamiento, nunca habrá una aproximación al manejo-ecosistémico costero y serán incomprensidos los efectos del impacto por el cambio climático.

---

\* Basado en las Conclusiones del Panel Internacional sobre Cambio Climático: La Zona Costera y sus Impactos Ecológicos, Económicos y Sociales (INECOL, NOAA, INE-Semarnat). 1er Panel 30 agosto 2007, 2do Panel 16 octubre 2008. Xalapa, Ver., México.

## INTRODUCCIÓN

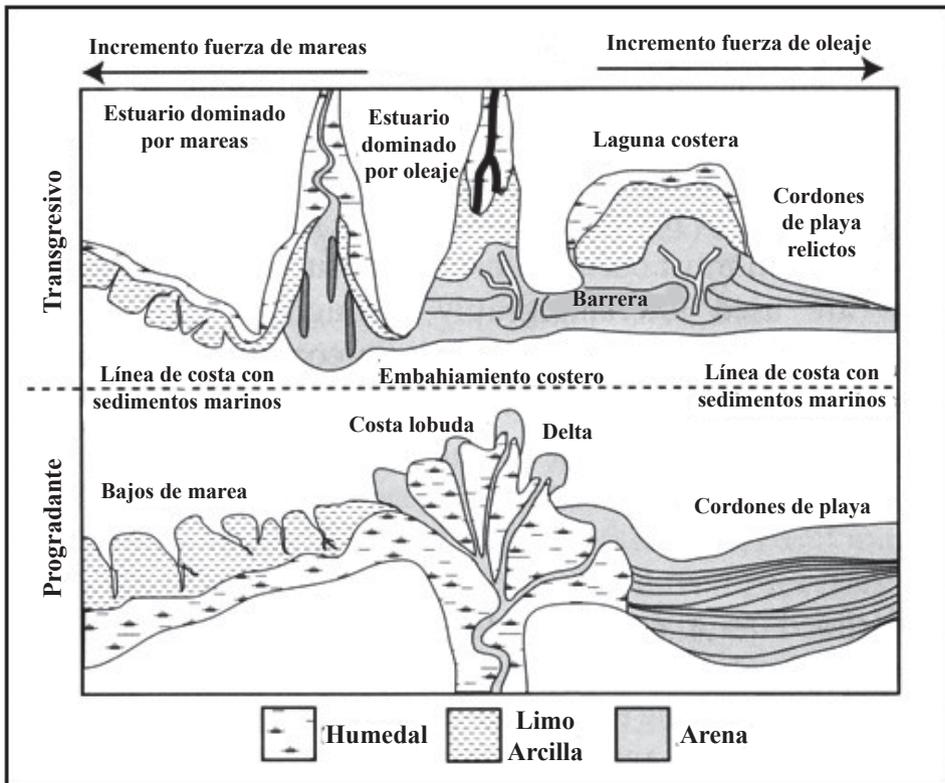
Para efecto de este capítulo, se considera la *zona costera* como una amplia eco-región con intensas interacciones físicas, biológicas y socioeconómicas, donde ocurre un dinámico intercambio de energía y materiales entre el continente, las aguas dulces, la atmósfera, y el mar adyacente; típicos de esta región son la llanura (planicie) costera, cuenca baja de los ríos, humedales, manglares, dunas, lagunas costeras, estuarios y el océano adyacente (Scura *et al.*, 1992; Yáñez-Arancibia, 1999, 2000, 2005; Schwartz, 2005). Las lagunas costeras y estuarios incluyen varios de esos ambientes, como humedales forestados o de pastizales, dunas costeras, y planicies de inundación deltaicas. Además son altamente productivos, muy vulnerables y, particularmente en costas tropicales son altamente diversos en especies y hábitats. Una gran proporción de la población humana vive aledaño a estos sistemas biocomplejos, que reciben una gran cantidad de contaminantes, y por su deterioro ambiental se incrementa su vulnerabilidad a los impactos del cambio climático (Cicin-Sain y Knecht, 1998; Schwartz, 2005; Gregory *et al.*, 2008).

La integración dinámica del gradiente que se extiende desde la planicie costera y hasta la pluma estuarina sobre la plataforma continental, es el concepto clave para un manejo-ecosistémico comprehensivo, basado en la integridad ecológica como elemento base para el desarrollo social y económico sustentable, y el referente para contender con los impactos que induce el cambio climático sobre la zona costera (Mann, 2000; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2009a). Si no se comprende la estructura ecosistémica de la zona costera, el manejo-ecosistémico parece una utopía y serán incomprendidos los efectos del impacto por el cambio climático.

### ENFOQUE ECOSISTÉMICO PARA COMPRENDER LA VULNERABILIDAD DE LA ZONA COSTERA Y EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La planicie costera se caracteriza por la heterogeneidad de humedales que presenta. Entre los humedales más representativos se encuentran los pastos sumergidos, los manglares, los bajos de mareas, llanuras de inundación deltaicas, estuarios, lagos, selva baja inundable, entre otros. En todos ellos se refleja una mezcla de suelo, agua, plantas, animales y microorganismos, con intensas interacciones biológicas y físico químicas (Maltby *et al.*, 1992; Mitsch y Gosselink, 2000; Dugan, 2005). La combinación de estas funciones y productos, junto con el valor de diversidad biológica y cultural, otorgan a estos ambientes enorme importancia para el desarrollo social y económico en cualquier latitud.

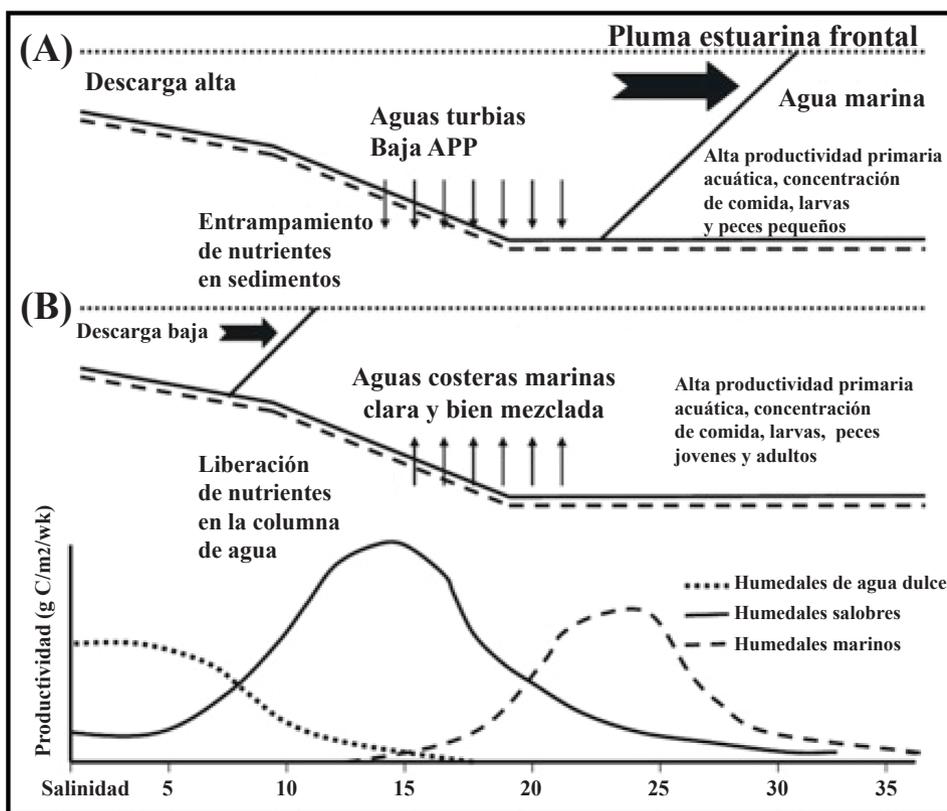
Esta llanura costera es un conjunto integrado de atributos naturales a nivel de ecosistema y recursos adyacente a la zona litoral, con dinámicas interacciones entre las tierras bajas y el mar. Normalmente se le asocia con la geografía de la cuenca baja de los ríos, y se extiende sobre la porción continental condicionado por la fisiografía de las tierras bajas, las inundaciones estacionales, y la vegetación hidrófila (figura 1). Esta subregión costera se caracteriza por: a) importantes humedales, b) alta diversidad de especies biológicas y de hábitats críticos, c) recarga



**Figura 1.** Diagrama de ambientes de depósito costero. La fuerza ambiental del oleaje erosiona los cordones de playa. La fuerza ambiental de las mareas erosiona la planicie de inundación deltaica y sus bajos. Una costa de delta lobulado es la imagen contraria del embahamiento de un estuario dominado por oleaje. Modificado de Boyd *et al.* (1992) in Yáñez-Arancibia *et al.* (2007a).

de aguas subterráneas, d) gradiente de humedales de agua dulce hasta marinos que dependen del rango de las mareas y del volumen de descarga del agua dulce, e) filtración de aguas para mitigar calidad, contaminación y eutrofización, y f) sostienen importantes actividades económicas en la zona costera (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007a).

Desde un punto de vista estructural y funcional, las figuras 1 y 2 representan el universo del paisaje de la zona costera y su dinámica, y permite visualizar los puntos de vulnerabilidad frente al impacto que induce el cambio climático, además de ofrecer el referente para el enfoque de manejo-ecosistémico de lagunas costeras y estuarios. Los pulsos de intercambio y exportación no ocurren exclusivamente siguiendo el ritmo de las mareas y los volúmenes de descarga de agua dulce, sino también ocurren en un proceso intermitente que provocan las tormentas, inundaciones, vientos, huracanes, y otros eventos climáticos meteorológicos condicionados por el cambio climático. La geomorfología general de los ambientes sedimentarios costeros resulta afectada por la importancia relativa del oleaje y las mareas, que controlan la cantidad,



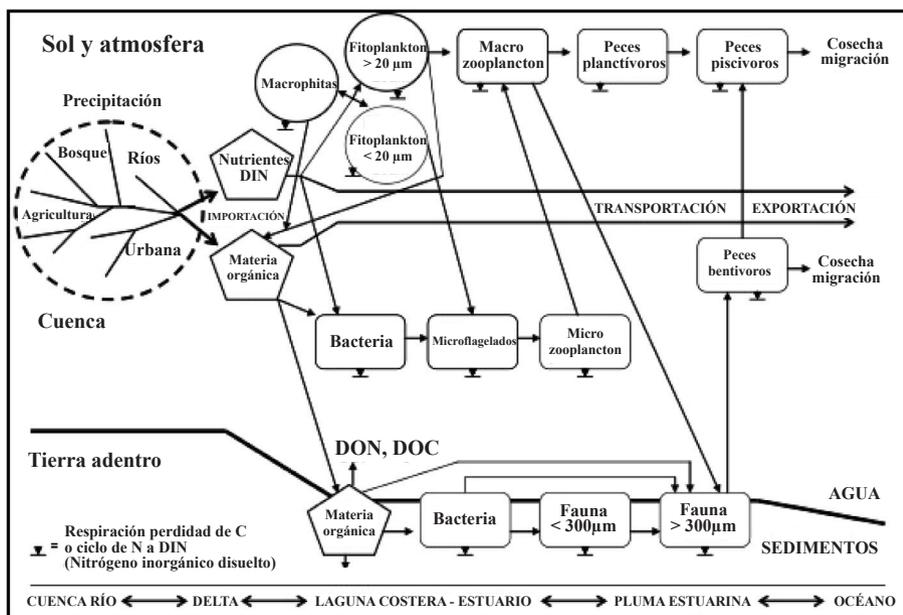
**Figura 2.** Enfoque-ecosistémico del funcionamiento de humedales. (A) Modelo conceptual de la descarga del sistema fluvio deltáico y respuestas del ecosistema estuarino. Larvas, juveniles y adultos de peces y macro invertebrados, utilizan el sistema de aguas abiertas y el gradiente de la zona frontal en la pluma estuarina (como hábitat esencial), antes y después de sus movimientos hacia los humedales de la llanura costera o hacia el océano. (B) Los pulsos físicos, químicos y biológicos, y los gradientes, modulan el funcionamiento del sistema fluvio deltáico y los efectos positivos de las inundaciones; los hábitats alternan su funcionamiento en terminos de los efectos de la salinidad sobre los tipos de humedales; la producción primaria de las plantas está en función de la salinidad, y el diagrama muestra los niveles de salinidad donde tiene lugar la sucesión de hábitats en un modelo para tres tipos de hábitat en el sistema estuarino. La productividad más alta se da en humedales salobres. Modificado de Yáñez-Arancibia *et al.*, (2007).

naturaleza, distribución y transporte de sedimentos a lo largo de la costa. Un tren de oleaje persistente genera transporte activo de sedimentos a lo largo de la costa, produciendo perfiles sedimentarios paralelos de tipo “*spits*”, barras arenosas o islas de barrera. En contraste, las mareas significativas asociadas con fuertes corrientes de mareas generalmente producen perfiles sedimentarios normales en la costa incluyendo bancos arenosos alargados, amplias bocas estuarias, vigorosos canales distributarios deltaicos, y amplias llanuras de inundación intermareales.

De esta forma, es posible distinguir entre costas dominadas por oleaje (*e.g.* deltas dominados por oleaje, estuarios dominados por oleaje, entrantes de mar hacia la planicie costera, y lagunas costeras), y costas dominadas por mareas (*e.g.* deltas dominados por mareas, estuarios dominados por mareas, y deltas mareales progradantes) (figura 1). La geomorfología condiciona la estructura y dinámica ecológica de la zona costera y es el referente para interpretar los impactos que induce el cambio climático (Yáñez-Arancibia, 2005); no sólo desde el punto de vista de forma-geológica y función-biológica, sino también en relación con los hábitats críticos (o esenciales) definidos como el rango de condiciones ambientales en el cual las especies y poblaciones pueden vivir y desarrollar su ciclo biológico (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2009b).

La figura 3 muestra diversos compartimentos en el ciclo de los nutrientes (principalmente nitrógeno) en las lagunas costeras y estuarios, los cuales han sido bien analizados por Deegan *et al.* (1994). Procesos y compartimentos importantes incluyen gran dinámica entre los nutrientes y la materia orgánica, los productores primarios, fito- y zooplancton, dinámica micro-biológica, organismos bénticos y pelágicos, transporte de nutrientes y sustancias orgánicas, y exportación a través de las bocas estuarinas sobre la pluma estuarina en la plataforma continental. La pluma estuarina es el área donde las condiciones estuarinas se extienden sobre el mar en la plataforma continental (figura 3). La pluma estuarina tiene salinidades de menos de 35 ppm, alta turbidez, gran concentración de materia orgánica particulada y disuelta y en la zona frontal, ocurre la mayor productividad primaria acuática en costas tropicales. Su magnitud y extensión depende de la magnitud y dinámica de las bocas estuarinas, la descarga de los ríos, el ritmo y rango de las mareas, las corrientes litorales, la estacionalidad de vientos, y la dinámica de importación/exportación de energía, materiales y organismos entre las aguas protegidas y el océano (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007a). La pluma estuarina es mayor cuando está asociada con sistemas deltaicos, y la productividad acuática de la pluma es un indicador de la sustentabilidad ambiental de los deltas y se correlaciona con recursos pesqueros demersales en costas tropicales (Pauly, 1986; Day *et al.*, 1997; Cardoch *et al.*, 2002; Sánchez-Gil *et al.*, 1997, 2008). La descarga de agua dulce en la zona costera puede ser superficial, como ocurre con los grandes ríos, o descarga subterránea como ocurre en zonas cársticas (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007, 2009a, 2009b, 2009c). Por lo tanto, la protección y mitigación de la zona costera y sus hábitats críticos, es un asunto de fundamental importancia para la sustentabilidad ambiental del desarrollo social y económico de las costas. Por lo tanto, la protección de la integridad ecológica de estos hábitats es un asunto de fundamental importancia para sostener los estocs de peces en el Golfo de México y el Caribe.

El enfoque-ecosistémico propuesto para este trabajo, como “una estrategia para manejar el suelo, el agua y los recursos naturales, promoviendo la conservación y el uso sustentable de manera equitativa”, fue adoptado en *The Second Conference of the Parties of the Convention on Biological Biodiversity* (CBD), como el marco básico de acción (Smith y Maltby, 2003). Para la zona costera, un trabajo muy anticipado planteando la necesidad del enfoque-ecosistémico para el manejo de lagunas costeras y estuarios, fue publicado por Day y Yáñez-Arancibia (1982). Qué es lo distintivo del enfoque-ecosistémico en términos De Fontaubert *et al.* (1996):



**Figura 3.** Modelo conceptual del flujo de nutrientes en un ecosistema estuarino, enfatizando el aporte de nitrógeno orgánico e inorgánico desde la llanura costera, y los cuatro principales patrones tróficos pelágicos y bentónicos que permiten el éxito de la producción de carnívoros superiores (recursos pesqueros). DIN= Nitrógeno inorgánico disuelto, DON= Nitrógeno orgánico disuelto, DOC= Carbón orgánico disuelto, C= Carbón. El gradiente principal es desde la cuenca baja de los ríos, hacia el delta y las lagunas costeras y estuarios, continuando a la pluma estuarina, y finalmente al océano abierto. Los puntos de vulnerabilidad mayor por el cambio climático son las fronteras de contacto inter hábitats. Tomado de Yáñez-Arancibia *et al.* (2009b).

- Provee un marco de trabajo para la planificación y la toma de decisiones.
- La sociedad se sitúa en el centro del manejo de la biodiversidad.
- Se enfatiza en los beneficios funcionales que ofrece el ecosistema.
- Se enfatiza en el manejo de la biodiversidad más allá de los límites de las áreas naturales protegidas.
- Las áreas protegidas son reconocidas como de vital importancia para la conservación.
- El enfoque es flexible con respecto a escalas espaciales y temporales.
- La sociedad juega un papel importante en el manejo del suelo, del agua y los recursos extraíbles.
- El manejo debe considerar los efectos reales y potenciales de las actividades de desarrollo en ecosistemas vecinos.
- Reconoce las ventajas económicas de un manejo racional y articulado.
- El manejo debe ser descentralizado al menor nivel de decisión posible (municipal?).

Por lo tanto el enfoque-ecosistémico es de principal importancia para contender con el manejo-ecosistémico de lagunas costeras y estuarios y sus planes de protección, mitigación y adaptación frente a los impactos que induce el cambio climático.

El cambio climático y sus efectos sobre la zona costera está normando fuertemente el manejo-ecosistémico. Los conceptos avanzan progresivamente y actualmente el manejo-ecosistémico enfatiza principios comunes destacando que un manejo efectivo debe: 1) integrar los componentes estructurales y funcionales del ecosistema, los usos, los recursos, y los usuarios, 2) guiar soluciones sustentables, 3) ser precavido evitando acciones deletéreas, 4) ser adaptativo buscando enfoques efectivos basados en experiencias, 5) ser actualizado al aplicar ciencia y tecnología para restaurar/rehabilitar humedales costeros, 6) internalizar los impactos de la crisis alimentaria, energética y climática sobre la zona costera, (Costanza, 1994; Boesch *et al.*, 2001; Boesch, 2006; Day *et al.*, 2005, 2007, 2008, 2009; Day y Yáñez-Arancibia, 2009; Yáñez-Arancibia *et al.* 2006, 2009a, 2009b, 2009c). Estos principios tienen importantes implicaciones para enfrentar la crisis costera en cualquier latitud. Aunque el marco para integrar objetivos de manejo existe, la habilidad técnica para la evaluación cuantitativa frente a múltiples tensores y estrategias es primaria, y todavía se aprecia un estado emergente de desarrollo metodológico integrado, particularmente lo que concierne a planificación ambiental estratégica, y a la restauración/rehabilitación en los principales ecosistemas costeros del Golfo de México y el Caribe, (que gravemente NO están incluyendo las variables del impacto del cambio climático). La realidad frente a esta última observación, debe enfrentarse a un nuevo paradigma, basado en siete principios necesarios para una visión sustentable del manejo costero enfrentado a las variables que induce el cambio climático (Costanza *et al.*, 2006; Day *et al.*, 2007, 2008, 2009): 1) permitir que el agua decida su curso, 2) evitar barreras severas que interrumpen la comunicación de las aguas de la planicie costera con el océano, 3) restaurar el capital natural, 4) utilizar los recursos sedimentarios del sistema fluvio deltáico para restaurar la costa, cambiando la perspectiva actual de aislar el río de la planicie deltaica (error sistemático en Mississippi-Louisiana, y en Tabasco-Campeche), 5) internalizar la crisis económica en las decisiones de manejo referente al desarrollo industrial, 6) internalizar la crisis de desigualdad social en la zona costera referente al desarrollo turístico, y 7) restaurar el funcionamiento de sistema fluvio deltáico para mitigar la contaminación (propiciando el metabolismo natural de depuración de aguas residuales), y las inundaciones naturales (que son benéficas para la integridad ecológica de la zona costera), por ejemplo, Nueva Orleans en Louisiana y Villahermosa en Tabasco.

## **CONCLUSIONES E IMPLICACIÓN HACIA EL MANEJO COSTERO**

Las lagunas costeras y estuarios son marcadamente diferentes de otros ecosistemas marino costeros, debido a que son ambientes de interacciones entre los ríos y el mar. Son sistemas biocomplejos, abiertos, dinámicos, dominados por variables físicas que inducen las principales fuentes de energía que modulan la estructura funcional de estos sistemas. Funcionan normalmente en

los umbrales de estrés de la mayoría de los parámetros físico-químicos que los caracterizan, y eso los hace más vulnerables aún a los impactos que marca el cambio climático. Si los impactos del hombre en las cuencas hidrológicas cambian la calidad del agua y sedimentos que entran al sistema, las consecuencias serán severas para el medio ambiente costero. A nivel de ecosistema biocomplejo las lagunas costeras y estuarios presentan las siguientes características generales (Day y Yáñez-Arancibia, 1982; Day *et al.*, 1989; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007a): Son altamente productivos. Son ecológicamente complejos. Son ecológicamente estables coexistiendo en un medio físicamente variable. Tienen diversas fronteras abiertas e intensas interacciones con ecosistemas vecinos. La tabla 1 resume la *Vulnerabilidad* de esos ecosistemas. La tabla 2 resume los *Costos de los Impactos* causados por el cambio climático. La práctica política habitual es la estimación de costos al impacto directo, pero la columna de la derecha muestra que los costos ocultos indirectos, a mediano y largo plazo, sugieren una marcada sub estimación “real” del costo de los impactos por el cambio climático.

**Tabla 1.** Vulnerabilidad natural e inducida por el cambio climático en lagunas costeras y estuarios.

1. Los mecanismos que propician una eficiente trampa de nutrientes, también contribuyen con éxito como trampa de contaminantes. Estos mecanismos son alterados por impacto antrópico o eventos climático-meteorológicos; la turbulencia provocada reincorpora contaminantes a la columna de agua.
2. La destrucción de macrofitas como pastos de pantanos o bosques de manglar disminuye dramáticamente la productividad natural, la fuente de alimento, la biomasa pesquera, la integridad del hábitat, y magnifica el efecto destructivo de los eventos de tormenta.
3. Las cadenas tróficas en aguas someras son muy susceptibles de interferencia por el hombre y por el cambio climático. Generalmente hay una preferencia por los niveles tróficos superiores (carnívoros), que dependen de algunas especies claves de niveles tróficos inferiores consumidores de detritus orgánico y restos vegetales.
4. La mayoría de las especies (animales y vegetales) están viviendo al límite de sus rangos de tolerancia. Estos organismos pueden ser excluidos del sistema por estrés adicional como el causado por contaminación, anoxia, sobreexplotación pesquera, impacto ambiental antrópico, o por el cambio climático.
5. Los ambientes sedimentarios estabilizados son importantes por favorecer el ciclo natural de los nutrientes, como áreas de crecimiento de humedales, prevenir exceso de turbidez en la columna de agua, y como hábitats de organismos bentónicos. Eventos climático-meteorológicos severos inducen erosión en estos ambientes.
6. La condición somera provoca un estado natural de eutrofización. Razón que los hace vulnerables a cualquier proceso natural o inducido que contribuya a incrementar la demanda química o bioquímica de oxígeno.
7. La zona más valiosa y productiva de estos sistemas es la región intermareal y somera de los humedales costeros. Esta región de frontera es altamente impactada por el cambio de uso de suelo (como construcción de bordos, dragados, rellenos, reconversión en agricultura), y por el cambio climático (como fuerte oleaje, vientos, erosión litoral).
8. Las lagunas costeras y estuarios son un usuario más de agua dulce y sedimentos, y lo requieren para su óptimo funcionamiento. La zona de baja salinidad es importante para alimentación, reproducción y protección, de muchas especies vegetales y de peces y macro invertebrados. La presencia de un gradiente de salinidad es esencial para el ciclo de vidas de numerosas especies que utilizan estos sistemas desde el mar o desde aguas continentales. El cambio climático está desarticulando estacionalmente los gradientes de parámetros físicos químicos.

**Tabla 2.** Costos por riesgo y desastres sobre los ecosistemas costeros y sus recursos naturales.

<b>Evento o condición</b>	<b>Impacto y costos directos</b>	<b>Impacto y costos ocultos</b>
	Pérdida de recursos viables naturales comerciales (sembradíos, árboles, agricultura, pesquerías. Mortandad de plantas y animales.	Declinación del recurso comercial (forestal, agrícola, pesquero). Incremento de riesgo de incendios por árboles muertos. Incremento de la vulnerabilidad a invasión de plagas.
Viento, oleaje e inundación.	Pérdida de árboles en parques y residencias.	Incremento en la demanda de electricidad por calefacción o enfriamiento. Efectos psicológicos. Pérdida de vegetación nativa.
	Diseminación invasiva de plantas y animales exóticos. Sustitución por abundancia de especies oportunistas.	Alteración de hábitats. Incremento de la vulnerabilidad a invasión de plagas.
	Pérdida de hábitats.	Pérdida de biodiversidad. Incremento en número de plantas y animales amenazados o en peligro. Riesgo de Áreas Naturales Protegidas (ANP).
	Erosión de suelos y bancos ribereño-deltáicos y pérdida de tierras.	Degradación de la calidad de agua. Azolve de distributarios. Pérdida de cobertura vegetal. Incremento de temperatura del agua. Incremento de turbidez. Abatimiento del oxígeno disuelto. Contaminación de fuentes no-puntales (plaguicidas, herbicidas, fertilizantes, sistema séptico, otros).
Daño o destrucción del paisaje.	Erosión de playas, dunas y humedales.	Pérdida de hábitats litorales (dunas, playas, humedales). Desestabilización de cimientos de construcción (daño y riesgo de deterioro futuro de infraestructura). Incremento en demanda de fortificaciones costeras, con efecto potencial adverso. Pérdida de playas recreativas y de oportunidades turísticas. Pérdida del turismo y de empleos.
Disturbio de ecosistemas naturales.	Pérdida de bosques viejos únicos, dunas, pantanos, erosión de desembocadura de ríos y otros ecosistemas costeros.	Alteraciones permanentes o pérdida de hábitats a futuro. Incremento de especies amenazadas o en peligro. Extinción o exclusión de especies. Pérdida de resiliencia y mayor vulnerabilidad a eventos futuros. Sobre estimación de la capacidad de asimilación del ecosistema.

**Tabla 2 (continuación).** Costos por riesgo y desastres sobre los ecosistemas costeros y sus recursos naturales.

Evento o condición	Impacto y costos directos	Impacto y costos ocultos
Pérdida de sedimentos de la cuenca baja, distributarios y estuario. Asolve en lagunas costeras.	Intrusión salina en aguas superficiales o freáticas.	Incremento en turbidez. Acumulación de contaminantes en sedimentos. Decremento del oxígeno disuelto. Pérdidas de vegetación acuática, vertebradas e invertebrados. Decremento de capacidad de circulación de canales distributarios. Pérdida de canales de navegación. Incremento en costos de dragado. Incremento a riesgos futuros de inundación. Declinación de pesquerías comerciales y recreativas.
Disturbio de ecosistemas naturales.	Incremento de agua dulce dentro del estuario.	Pérdida de disponibilidad de agua para humanos y animales. Pérdida de especies dulceacuícolas. Pérdida de sembradíos en llanura costera. Sustitución de cultivos adaptables. Alteración de hábitats.
	Fragmentación de islas de barrera.	Declinación de especies marinas. Incremento de especies de agua dulce. Incremento de materia orgánica y decremento de oxígeno disuelto. Declinación de la pesquería estuarina. Simplificación del ecosistema por pérdida de biodiversidad.
	Contaminación de hábitats en el largo-plazo por liberación de contaminantes e inundación salobre.	Pérdida de hábitats. Pérdida de propiedades privadas o públicas. Pérdida de Áreas Naturales Protegidas (APN). Daño o pérdida de infraestructura diversa.
	Incremento de la vulnerabilidad de ecosistemas costeros a eventos subsecuentes. Pérdida de resiliencia. Sobre estimación de la capacidad de asimilación.	Pérdida de hábitats. Incertidumbre en recuperación de la vida silvestre. Incremento del número de especies amenazadas o en peligro.
		Pérdida de hábitats a futuro o alteración permanente. Incremento en número de especies amenazadas o en peligro. Extinción o exclusión de especies animales y vegetales.

<b>Tabla 2 (continuación). Costos por riesgo y desastres sobre los ecosistemas costeros y sus recursos naturales.</b>		
<b>Evento o Condición</b>	<b>Impacto y Costos Directos</b>	<b>Impacto y Costos Ocultos</b>
Viento, oleaje, ascenso del nivel del mar, lluvias, inundaciones. Daño ambiental en aumento por persistencia severa.	Descarga de fuente-puntual de contaminación en el aire, agua y canal de navegación (químicos, basura, aguas negras, materiales tóxicos).	Pérdida de recursos acuáticos. Declinación de pesquería comercial y recreativa. Impacto a la salud y seguridad humana.
	Descarga de fuente no-puntual de contaminación en el agua, canal de navegación y sedimentos (pesticidas, herbicidas, fertilizantes, descarga urbana, falla del sistema séptico).	Pérdida de recursos acuáticos. Declinación de pesquería comercial y recreativa. Impacto a la salud y seguridad humana.
	Liberación de basura, acumulación de desechos sólidos en el medio ambiente, por el evento o por esfuerzos de limpieza.	Degradación de la calidad del agua. Pérdida de humedales por relleno de tierras bajas. Degradación de la calidad del aire por putrefacción o por quemas de basura. Decremento de la estética natural del paisaje.
	Pérdida del acceso a la playa (daño de senderos, terrazas, muelles). Esfuerzos de reconstrucción.	Declinación de las actividades recreativas ( <i>e.g.</i> pesca, canotaje). Pérdida de turismo e impacto económico.
	Esfuerzos de reconstrucción.	Relleno no regulado de humedales y otros habitats sensitivos. Pérdida de habitats. Disposición no regulada de tierras suburbanas para construcciones de casas de emergencia post evento. Prácticas de diseminación de construcciones sin regulación de la resiliencia-urbana a futuros eventos.
	Daño de largo-plazo a maquinaria, vehículos e infraestructura, debido a inundaciones, intrusión de sedimentos, derrumbes, o daños mecánicos similares	Decremento sostenido del presupuesto fiscal y recursos para prevención, mitigación, restauración, o subsidios. Encarecimiento sostenido de la energía, alimentos e insumos. Prevalece política coyuntural de alto costo.

La tabla 3 resume *Estrategias de Mitigación* para contender con el problema del cambio climático. Para los tomadores de decisiones, si no se comprende este funcionamiento, nunca habrá una aproximación al manejo ecosistémico de estos ambiente costeros y serán incomprendidos los efectos del impacto por el cambio climático.

## **LAGUNAS COSTERAS, ESTUARIOS Y HUMEDALES SON INTENSAMENTE UTILIZADAS POR LOS HUMANOS**

Revisando los problemas del manejo de lagunas costeras y estuarios, se aprecia que el tópico más frecuente de preocupación es la sobrecarga de nutrientes. La aplicación de nutrientes en la agricultura, especialmente compuestos de nitrógeno, provoca gran incremento en la producción fitoplanctónica. La cantidad de producción primaria que no es consumida por el pastoreo, es atrapada en el fondo y se descompone, utilizando oxígeno y creando aguas estratificadas deficientes en oxígeno. Esto puede causar mortalidad masiva de organismos bentónicos. También, la turbidez y la alta biomasa fitoplanctónica bloquean la penetración de la luz y provoca la muerte de la vegetación macrofita sumergida. Los efectos de largo plazo pueden causar la pérdida de la producción de peces y macro invertebrados y, a menudo, la pérdida del potencial recreativo porque las aguas se hacen turbias y distróficas. Adicionalmente, el cambio de uso del suelo -actividad frecuente en la zona costera- altera sustancialmente el ciclo del nitrógeno y eso magnifica los impactos inducidos por el cambio climático (Downing *et al.*, 1999).

La reducción del aporte de nutrientes desde las ciudades y desde la agricultura, es un asunto costoso. Es un proceso de varias etapas (Day *et al.*, 2009). *Primero*, es necesario educar al público para preocuparse del problema. *Segundo*, es necesario obtener un consenso sobre los detalles del problema y de los pasos necesarios para remediarlo, teniendo en cuenta los frecuentes conflictos de interés a distintos niveles de la población. *Tercero*, sólo entonces los políticos podrán encontrar el fundamento para disponer de recursos necesarios para la solución. *Cuarto*, el siguiente paso es la implementación de la solución tecnológica, después de lo cual es fundamental implementar un programa de monitoreo que será capaz de evaluar la efectividad de los pasos y decisiones tomadas

El uso intenso de lagunas costeras y estuarios, acoplado con los impactos que provoca el cambio climático y los efectos sinérgicos residuales, han provocado un deterioro y desintegración ambiental, que complica el manejo-ecosistémico y el desarrollo costero óptimo hacia el futuro. La consecuencia de este uso intenso y los impactos adicionales por el cambio climático, han alterado directamente la estructura y el funcionamiento de estos ecosistemas (Day *et al.*, 2008; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2009a, 2009b). Desde el enfoque de manejo-ecosistémico, se presenta una síntesis de cómo los humanos y el cambio climático impactan el funcionamiento de estos sistemas biocomplejos (tablas 1, 2, 3)

**Tabla 3.** Técnicas de mitigación para proteger recursos naturales en la zona costera ante el impacto del cambio climático.

<b>Playas</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ordenanza que restringe el retiro de material de relleno después de la tormenta (material acumulado en una determinada zona, se repetirá en la próxima tormenta).</li> <li>2. Prohibición de actividades que pudieran reducir o alterar la configuración de playas, islas de barrera, y altitud de las dunas (como remoción de vegetación o construcción de estructuras –formales o artesanales- que desvían el transporte de sedimentos).</li> <li>3. Favorecer la fuente de sedimentos y/o procesos de transporte que mantienen -de manera natural- las barreras arenosas, bajos de mareas, y línea de costa (como el uso adecuado de depósitos del dragado para canales de navegación).</li> <li>4. Prohibición de la remoción de pastos marinos de la zona intermareal (como remoción –por estética- de la vegetación sumergida adyacente a la playa).</li> <li>5. Restaurar las playas post-evento en áreas que proveen hábitats críticos para tortugas marinas y aves costeras.</li> <li>6. Análisis de vulnerabilidad de hábitat críticos para establecer prioridades pre- y post- tormenta para protección y restauración de hábitats en alto riesgo.</li> <li>7. Restauración de la vegetación sobre la playa e islas de barrera después de la tormenta para prevenir pérdida de sedimentos y para favorecer la recuperación de dunas y playas.</li> <li>8. Establecimiento de una línea base comprensiva de las características ecológicas y los procesos que aseguran que las medidas de mitigación están diseñadas apropiadamente y sean capaces de fundamentar un monitoreo post-tormenta.</li> </ol>
<b>Humedales</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ordenanza que protege los humedales costeros y zonas de amortiguamiento frente a los desarrollos.</li> <li>2. Análisis de vulnerabilidad de los humedales, para establecer prioridades de restauración post-evento, y restringir actividades que pueden degradar o destruir humedales importantes.</li> <li>3. Rehabilitar (árboles, arbustos, hierbas), captar sedimentos, control de especies exóticas, para restaurar humedales que proveen funciones críticas (como amortiguamiento para las comunidades costeras, y hábitat para especies amenazadas).</li> <li>4. Desarrollo de planes para remover estructuras, chatarra, embarcaciones abandonadas, que impiden la dinámica costera que favorece la “salud” de los humedales y persistencia de hábitat críticos.</li> <li>5. Favorecer los procesos para la acreción de sedimentos, que de manera natural restauran los humedales costeros (como también la redistribución adecuada de sedimentos obtenidos por dragados en canales de navegación).</li> <li>6. Establecimiento de una línea base comprensiva para entender, ecológicamente, que los humedales son “usuarios naturales” de agua y sedimentos.</li> </ol>
<b>Bosques</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Manejo forestal costero para reducir el daño que provocan los vientos y la erosión litoral.</li> <li>2. Manejo de la composición de especies (como cultivo y mantenimiento de especies de árboles más tolerantes a las tormentas en áreas urbanas pobladas). En los trópicos son recomendables los manglares. En latitudes intermedias son recomendables pinos de hojas largas.</li> <li>3. Uso de quema controlada para minimizar acumulación de combustibles. Esto ayuda en el manejo de malezas y favorece el regreso de plantas herbáceas deseables.</li> <li>4. Desarrollo de planes y regulaciones pre-tormenta para operar quemas controladas y remover fragmentos de árboles.</li> <li>5. Desarrollo de nidos artificiales y cavidades para compensar la carencia por pérdida de los árboles durante y después de la tormenta.</li> <li>6. Establecimiento de una línea base comprensiva para explorar la opción, ecológica, de introducción de árboles en áreas normalmente no forestadas.</li> </ol>

**Tabla 3 (continuación).** Técnicas de mitigación para proteger recursos naturales en la zona costera ante el impacto del cambio climático.

<p><b>Pesquerías</b> Moluscos y crustáceos</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ordenanza y planes para clausurar la pesquería de ostiones, mejillones y almejas post-tormenta (debido a los altos niveles eventuales de microorganismos patógenos). Colaborar con los pescadores en planes de contingencia y subsistencia temporal después de la tormenta.</li> <li>2. Propiciar el desarrollo de planes de negocio para acomodar la clausura temporal de las pesquerías.</li> <li>3. Desarrollo de planes para depositar material calcáreo post- evento (como conchas) hacia la rehabilitación de hábitats adecuados en el restablecimiento de “camas de reclutamiento” de moluscos y crustáceos.</li> </ol>
<p><b>Pesquerías</b> Camarones</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desarrollo de planes para la provisión de hielo y generación de electricidad en los centros de desembarque del recurso, bodegas de almacenamiento refrigerado, y en embarcaciones que manejan captura viva.</li> <li>2. Recuperar/reconstruir estructuras y otras facilidades tierra adentro para reducir futuras pérdidas en el almacenaje del recurso post- evento.</li> <li>3. Remoción de la basura post-desastre en las áreas de pesca y canales de navegación, para prevenir daños en las artes de pesca y embarcaciones. Este recurso se captura en el mar adyacente y en áreas protegidas (como bahías cerradas, lagunas, estuarios, muy vulnerables al impacto físico).</li> <li>4. Desarrollo de planes de compensación post-desastre (fondo de emergencia) para recuperar la infraestructura pesquera (embarcaciones, maquinaria, artes de pesca).</li> </ol>
<p><b>Pesquerías</b> Peces</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El impacto sobre las pesquerías de altura es mucho menor (como recurso vivo), comparado con las otras pesquerías. Sin embargo, el impacto sobre la infraestructura es similar a la pesquería del camarón. Los planes de compensación post-desastre son similares.</li> </ol>
<p><b>Pesca</b> <b>deportiva</b> (turismo asociado)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desarrollo de estrategia alternativa para reemplazar el aspecto recreativo, importante en la economía local.</li> <li>2. Desarrollo de planes de construcción y recuperación de embarcaciones y otras facilidades, mejor adaptadas a los efectos de tormentas.</li> </ol>
<p><b>Calidad</b> <b>de agua</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desarrollo de planes para minimizar descarga de contaminantes durante la tormenta (como residuos líquidos o sólidos de las terminales pesqueras, de los centros urbanos, de otras industrias), y facilidades de recuperación de la calidad.</li> <li>2. Al calcular la descarga permisible de contaminantes de fuentes puntuales y no puntuales, considerar el efecto acumulativo del contaminante en los sedimentos en bahías, lagunas y estuarios, que podrían ser removidos durante las tormentas.</li> <li>3. Desarrollo de estándares normativos y medidas de emergencia para prevenir la liberación de contaminantes tóxicos durante las tormentas.</li> <li>4. Desarrollo de tecnologías ambientales para depuración de aguas residuales (como el uso de humedales para el tratamiento secundario y terciario de las aguas, con lo cual se fortalece el paisaje, se previene la subsidencia sedimentaria, se amortigua la costa contra eventos de tormenta y ascenso del nivel del mar, se genera nuevos hábitats críticos para la flora y la fauna, y son mucho más baratas que las plantas convencionales de tratamiento de aguas).</li> </ol>

## LAGUNAS COSTERAS, ESTUARIOS Y HUMEDALES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

El calentamiento global implica diversas consecuencias para los hábitats de la zona costera (IPCC, 2007). Se espera que la temperatura de la superficie del océano se incremente, con los mayores cambios hacia las latitudes altas. Este incremento provocará gran cantidad de evaporación próxima al ecuador induciendo un ciclo hidrológico más vigoroso. Las latitudes intermedias tendrán mayor incremento en evaporación, mientras que las altas latitudes, y algunas zonas tropicales montañosas, tendrán mayor incremento en precipitación, y en el caso de los trópicos se asocian con mayor frecuencia e intensidad de huracanes. Como resultado, el gradiente de salinidad costera norte-sur se podrá incrementar, creando condiciones menos salinas hacia el norte y condiciones más salinas en latitudes tropicales-subtropicales. Pero el impacto más significativo seleccionado en UNCED Río'92 y de atención urgente en la zona costera, ha sido el acelerado ascenso del nivel medio del mar.

El IPCC (2007) predice una elevación del nivel del mar de aproximadamente 40 a 45 centímetros para el año 2100, debido a la expansión térmica del océano y el derretimiento de los hielos sobre el continente. En lugares donde el ambiente costero es adyacente a pantanos salobres, manglares, u otros humedales, es posible que las comunidades naturales puedan migrar tierra adentro al ritmo de la elevación de las aguas; pero si la migración no es posible, como ocurre con diferentes macrofitas, ese hábitat morirá al ser inundado a un ritmo mayor a su tolerancia adaptativa a las inundaciones, dejando el desarrollo socio económico costero expuesto a los efectos de las tormentas e inundaciones (Day *et al.*, 2008). Bajo el escenario de 50 centímetros de elevación del mar para fines del siglo XXI, se estima que las islas del Caribe estarán bajo severa presión ambiental, y más de 2 000 millas<sup>2</sup> de humedales en México y 4 000 millas<sup>2</sup> en los Estados Unidos, se perderán.

Algunos reportes recientes difieren con la proyección conservadora del IPCC (2007). Por ejemplo, se sugiere que la elevación del mar podría ser tan alto como 100 centímetro para el año 2100 (Rahmstorf, 2007) o incluso entre 80 y 200 centímetros (Pfeffer *et al.*, 2008); que la frecuencia e intensidad de huracanes rebasará el 80% (Hoyos *et al.*, 2006) y que la subsidencia sedimentaria en humedales costeros podrá llegar a más de 3.5 milímetros por década (McKee, 2008). Estos trabajos recientes ofrecen información verdaderamente preocupante. Con esto, muchos desarrollos urbanos costeros en el Golfo de México estarán en el franco umbral del drama ambiental (*e.g.* Tampa, Mobile, Nuevo Orleans, Galveston, Corpus Christi, Tuxpan, Panuco, Veracruz, Alvarado, Villahermosa, Ciudad del Carmen, Chetumal, entre otros), especialmente por la severidad sinérgica de las inundaciones episódicas asociadas con tormentas severas y lluvias intensas. Todas estas ciudades costeras están vinculadas con lagunas costeras y estuarios, altamente vulnerables al cambio climático global (tabla 1). En los trópicos, muchas áreas de la planicie costera litoral, actualmente con asentamientos urbanos e industriales, serán prácticamente inhabitables y los costos por desastres serán muy elevados (tabla 2). La degradación ambiental de los hábitats costeros actuales, en incremento, sólo exacerbarán estos efectos ecológicos y económicos (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2009a), y la restauración de los humedales

costeros existentes se torna urgente para mitigar el ascenso del nivel del mar (tabla 3) (Day *et al.*, 2009; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007b).

## ENFOQUE-ECOSISTÉMICO HACIA EL MANEJO COSTERO

Con 75% de superficie del planeta cubierta de agua, además de gran cantidad de aguas subterráneas, la Tierra es un planeta acuático. Un planeta azul con agua en estado sólido, líquido, gaseoso; almacenada en la atmósfera, en los continentes y en el mar. El único lugar del planeta donde converge el agua proveniente de la atmósfera (lluvia, granizo), del continente (superficial y subterráneo) y del océano, es en la región geográfica conocida como la *zona costera*. Aquí es el punto de reunión del agua dulce, el agua salada y la atmósfera. Son tres grandes fronteras ambientales naturales que le otorgan a la zona costera una condición *sui generis*, única. La zona costera es una porción geográfica considerable que abarca el mar adyacente e incluye toda la llanura costera hacia el interior del continente.

El enfoque de este trabajo indica como punto central el manejo-ecosistémico y como variables esenciales, la vulnerabilidad de las costas como sistemas biocomplejos (tabla 1), los costos reales por desastres naturales o inducidos (tabla 2), y las estrategias de mitigación hacia un manejo integrado (tabla 3). El desarrollo social y económico debe comprender los requerimientos para un manejo en términos holísticos del ecosistema, en lugar de insistir en alguna especie biológica, un uso, o actividad en particular. El enfoque-ecosistémico integrado es la situación que debe prevalecer cuando el hombre busca utilizar los recursos naturales e interrumpe la dinámica de los sistemas provocando el decremento de las utilidades. Desde el punto de vista de escalas espaciales y temporales y con la premisa de preservar la integridad ecológica del sistema, concluimos que la cuenca de drenaje en la unidad de habitats acoplados: “*cuenca baja-humedales-delta-lagunas costeras-estuario-pluma estuarina sobre la plataforma continental*”, es el nivel ecosistémico óptimo para un enfoque exitoso de manejo integrado de lagunas costeras y estuarios, severamente amenazados por los impactos del cambio climático. Algunos principios fundamentales que pueden guiar el manejo ecosistémico frente a los impactos del cambio climático son:

- a) Preservar la estructura básica del ecosistema y asegurar la dinámica de su funcionamiento,
- b) Utilizar las entradas naturales de energía al sistema,
- c) Plantear el desarrollo social y económico integrado con la dinámica natural,
- d) Incorporar técnicas y métodos de ingeniería ecológica para restaurar/rehabilitar habitats esenciales degradados,
- e) Definir a largo plazo las capturas sustentables de los recursos naturales extraíbles,
- f) Definir a corto y medio plazo los efectos del impacto del cambio climático sobre la zona costera, particularmente en regiones del Golfo de México y Caribe y,
- g) Establecer vigilancia del funcionamiento del sistema por medio de un monitoreo permanente.

## LITERATURA CITADA

- Boesch, D. F., 2006. Scientific requirements for ecosystem-based management in the restoration of Chesapeake Bay and coastal Louisiana. *Ecological Engineering*, 26 (1): 6-26.
- Boesch, D. F., E. Burreson, W. Dennison, E. Houde, M. Kemp, V. Kennedy, R. Newell, K. Paynter, R. Orth, y R. Ulanowicz, 2001. Factors in the decline of coastal ecosystems. *Science*, 293: 1589-1590.
- Boyd, R., R. Dalrymple, y B. A. Zaitlin, 1992. Classification of clastic coastal depositional environments. *Sedimentary Geology*, 80: 139-150
- Cardoch, L., J. W. Day, y C. Ibáñez, 2002. Net primary productivity as an indicator of sustainability in the Ebro and Mississippi deltas. *Ecological Applications*, 12 (4): 1044-1055.
- Cicin-Sain, B., y R. W. Knecht, 1998. Integrated Coastal and Ocean Management. UNESCO and University of Delaware. Island Press, Inc., Washington DC, 517 p.
- Costanza, R., 1994. Ecological economics and the management of coastal and estuarine systems, p. 387-394. In: K. R. Dyer and R. J. Orth (eds.), *Changes in Fluxes in Estuaries: Implications from Science to Management*. ECSA/ERF Symposium, Institute of Marine Studies, University of Plymouth. Olsen & Olsen, International Symposium Series, 485 p.
- Costanza, R., W. J. Mitsch, y J. W. Day, 2006. A new vision for New Orleans and the Mississippi delta: applying ecological economics and ecological engineering. *Frontiers in Ecology*, 4 (9): 465-472.
- Day, J. W., y A. Yáñez-Arancibia, 1982. Coastal lagoons and estuaries: ecosystem approach. *Ciencia Interamericana*, 22 (1-2): 11-25.
- Day, J. W., y A. Yáñez-Arancibia (eds.), 2009. *The Gulf of Mexico: Ecosystem-based Management*. The Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas A & M University Press, College Station, TX (in press).
- Day, J. W., C. A. S. Hall, W. M. Kemp, y A. Yáñez-Arancibia, 1989. *Estuarine Ecology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 558 p.
- Day, J. W., J. F. Martin, L. Cardoch, y P. H. Temple, 1997. System functioning as a basis for sustainable management of deltaic systems. *Coastal Management*, 25 (2): 115-153.
- Day, J. W., J. Barras, E. Clairain, J. Johnston, D. Justic, G. P. Kemp, J. Y. Ko, R. Lane, W. J. Mitsch, G. Steyer, P. Templet, y A. Yáñez-Arancibia, 2005. Implications of global climatic change and energy cost and availability for the restoration of the Mississippi delta. *Ecological Engineering*, 24: 253-266.
- Day, J. W., D. F. Boesch, E. Clairain, G. P. Kemp, S. B. Laska, W. J. Mitsch, K. Orth, H. Mashriqui, D. J. Reed, L. Shabman, C. A. Simenstad, B. J. Streever, R. R. Twilley, C. C. Watson, J. T. Wells, y D. F. Whigham, 2007. Restoration of the Mississippi delta: lessons from hurricanes Katrina and Rita. *Science*, 315: 1679-1684. [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)
- Day, J. W., R. R. Christian, D. M. Boesch, A. Yáñez-Arancibia, J. Morris, R. R. Twilley, L. Naylor, L. Schaffner, y C. Stevenson, 2008. Consequences of climate change on the ecogeomorphology of coastal wetlands. *Estuaries and Coasts*, 31: 477-491.
- Day, J. W., A. Yáñez-Arancibia, y W. J. Mitsch, 2009. Management approach to address water quality and habitat loss problems in coastal wetlands: Ecotechnology and ecological engineering. *Ocean Yearbook*, 23: 389-402. The University of Chicago Press. 990 p.
- Deegan, L. A., T. Finn, C. Hopkinson, A. Giblin, B. Peterson, B. Fry, y J. Hobbie, 1994. Flow model analysis of the effects of organic matter-nutrient interactions on estuarine trophic dynamics, p. 273-281. In: K. R. Dyer and R. J. Orth (eds.), *Changes in Fluxes in Estuaries: Implications from Sci-*

- ence to Management. ECSA/ERF Symposium, Institute of Marine Studies, University of Plymouth. Olsen & Olsen, International Symposium Series, 485 p.
- De Fontaubert, A. C., D. R. Downes, y T. S. Agardy, 1996. Biodiversity in the Seas: Implementing the Convention on Biological Diversity in Marine and Coastal Habitats. IUCN Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 82 p.
- Dugan, P. (ed.), 2005. Guide to Wetlands. A Firefly Book, Ltd., Ontario, Canada, 304 p.
- Downing, J. A., M. McClain, R. R. Twilley, J. M. Melack, J. Elser, N. N. Rabalais, W. M. Lewis, R. E. Turner, J. Corredor, D. Soto, A. Yáñez-Arancibia, J. A. Kopaska, y R. H. Howarth, 1999. The impact of accelerating land-use change on the N-Cycle of tropical aquatic ecosystems: current conditions and projected changes. *Biogeochemistry*, 46: 109-148.
- Gregory, K. J., I. G. Simmons, A. J. Brazel, J. W. Day, E. A. Keller, A. G. Sylvester, y A. Yáñez-Arancibia, 2008. Environmental Science: A Student's Companion. SAGE Publications Ltd, London UK, 442 p.
- Hoyos, C. D., P. A. Agudelo, P. J. Webster, y J. A. Curry, 2006. Deconvolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity. *Science*, 312: 94-97.
- IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. The Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Maltby, E., P. J. Dugan, y J. C. Lefeuve, (eds.), 1992. Conservation and Development: The Sustainable use of Wetland Resources. Proceedings of the Third International Wetlands Conference, Rennes, France, 19-23 September 1988. IUCN, Gland Switzerland, 219 p.
- Mann, K. H., 2000. Ecology of Coastal Waters with Implications for Management. Blackwell Science Inc., Malden Massachusetts, 406 p.
- McKee, K., 2008. Sea level rise 1991-2009. United States Geological Service. <http://www.sealeel.colorado.edu/results.phb>
- Mitsch, W. J., y J. G. Gosselink, 2000. Wetlands, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 920 p.
- Pauly, D., 1986. Problems of tropical inshore fisheries: fishery research on tropical soft bottom communities and the evolution of its conceptual base, p. 29-37. In: E. M. Borgese and N. Ginsburg (eds.). Ocean Yearbook, 6: 29-37. The University of Chicago Press, 686 p.
- Pfetter, W. T., J. T. Harper, y S. O'Neal, 2008. Kinematics constraint on glacier contributions to 21<sup>st</sup> Century Sea-Level-Rise. *Science*, 321: 1340-1343.
- Rahmstorf, S. 2007. A semi-empirical approach to predicting sea-level rise. *Science*, 315: 368-370.
- Sánchez-Gil, P., y A. Yáñez-Arancibia, 1997. Grupos ecológicos funcionales y recursos pesqueros tropicales, p. 357-389. In: D. Flores Hernández, P. Sánchez-Gil, J. C. Seijo y F. Arrequin (eds.). Análisis y Diagnóstico de los Recursos Pesqueros Críticos del Golfo de México. Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX Serie Científica 7. 496 p.
- Sánchez-Gil, P., A. Yáñez-Arancibia, M. Tapia García, J. W. Day, C. A. Wilson, y J. H. Cowan, 2008. Ecological and biological strategies of *Etropus crosotus* and *Citharichthys spiloterus* (Pleuronectiformes Paralichthyidae) related to the estuarine plume, Southern Gulf of Mexico. *Journal of Sea Research*, 59 (3): 173-185.
- Scura, L. F., T. E. Chua, M. D. Pido, y J. N. Paw, 1992. Lessons for integrated coastal management: The Asian experience, p. 1-68. In: T. E. Chua and L. F. Scura (eds.), Integrative Framework and Methods for Coastal Area Management. ICLARM Conference Proceedings 37.

- Smith, R. D., y E. Maltby, 2003. Using the Ecosystem Approach to Implement the Convention on Biological Diversity: Key Issues and Case Studies. IUCN Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 118 p.
- Schwartz, M. (ed.), 2005. The Encyclopedia of Coastal Sciences, Springer, Dordrecht, The Netherlands. 1211 p.
- UNCED, 1992. United Nations Conference on Environment and Development. Agenda 21, Chapter 17. Rio de Janeiro, Brazil.
- Yáñez-Arancibia, A., 1999. Terms of reference towards coastal management and sustainable development in Latin America: Introduction to special issue on progress and experiences. *Ocean & Coastal Management* 42 (2-4): 77-104.
- Yáñez-Arancibia, A., 2000. Coastal management in Latin America. Chapter 28: 447-456. *In*: C. Shepard (ed.), The Seas at The Millennium: An Environmental Evaluation. Elsevier Science Ltd. 3 vols. 2400 p.
- Yáñez-Arancibia, A., 2005. Middle America, coastal ecology and geomorphology, p. 639-645. *In*: M. Schwartz (ed.), The Encyclopedia of Coastal Sciences. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 1211 p.
- Yáñez-Arancibia, A., A. L. Lara-Domínguez, P. Sánchez-Gil, y J. W. Day, 2007a. Estuary-sea ecological interactions: a theoretical framework for the management of coastal environment, p. 271-301. *In*: K. Withers and M. Nipper (eds), Environmental Analysis of the Gulf of Mexico. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Special Publication No. 1, Texas A&M University-Corpus Christi, 700 p.
- Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day, R. R. Twilley, y J. W. Mitsch, 2007b. Enfoque-ecosistémico para restaurar humedales costeros ante los cambios globales. *Ambientico*, 165: 35-38.
- Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day, W. J. Mitsch, y D. F. Boesch, 2006. Following the ecosystem approach for developing projects on coastal habitat restoration in the Gulf of Mexico. Commission on Ecosystem Management Newsletter 5, 2006, Highlights News, CEM-IUCN, Gland Switzerland. [www.iucn.org/themes/cem/documents/cem/membres\\_2006/restoration\\_esa\\_a.yanez\\_arancibia\\_nov2006.pdf](http://www.iucn.org/themes/cem/documents/cem/membres_2006/restoration_esa_a.yanez_arancibia_nov2006.pdf)
- Yáñez-Arancibia, A, J. J. Ramírez-Gordillo, J. W. Day, y D. Yoskowitz, 2009a. Environmental sustainability of economic trends in the Gulf of Mexico: What is the limit for Mexican coastal development?, Chapter 5: 82-104. *In*: J. Cato (ed.) Ocean and Coastal Economy of the Gulf of Mexico, The Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A&M University Press, College Station, TX, 110 p.
- Yáñez-Arancibia, A, J. W. Day, B. A. Knoppers, y J. A. Jiménez, 2009b. Coastal lagoons and estuaries: ecosystem-based management. *In*: L. M. Fanning & R. Mahon (eds.) Marine Ecosystem Based Management in the Caribbean. The University of Dalhousie, Nova Scotia Canada, and the University of West Indies, Barbados. (in press).
- Yáñez-Arancibia, A, J. W. Day, y B. Currie-Alder 2009c. The Grijalva-Usumacinta river delta functioning: challenge for coastal management. *Ocean Yearbook*, 23: 473-501. The University of Chicago Press, 990 p.



Sánchez Montante, O., 2010. Elementos oceánicos que impactan la hidrología costera, p. 23-32. En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeth, 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.

CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Elementos oceánicos que impactan la hidrología costera

*Orzo Sánchez Montante*

---

## RESUMEN

En esta sección se describen los elementos de la interacción océano-atmósfera que impactan la hidrología costera y los recursos hídricos disponibles. En este contexto se recopilan los resultados que se han encontrado en el dominio público, derivado de los estudios de la interacción océano-atmósfera y su impacto en el cambio climático, así como también de las proyecciones de las variables oceánicas en escenarios de cambio climático. En el desarrollo del texto se hace hincapié en la relación bilateral que existe entre las variaciones en los procesos que conforman el ciclo hidrológico del agua y los elementos oceánicos que impactan en el cambio climático actual a través de los procesos de interacción océano-atmósfera.

## INTRODUCCIÓN

Aún cuando aproximadamente 10% de la superficie terrestre esta constituida por glaciares y casi el 80% del agua continental (agua dulce) es almacenada en la forma de hielo (Untersteiner, 1984), la mayor parte de los recursos hídricos son originados por la precipitación meteorológica, en sus diferentes formas (agua líquida y sólida). En términos medios, el territorio mexicano percibe una precipitación de alrededor de los 700 mm por año (García, 2003). Aproximadamente 72% se evapora y el resto constituye la recarga de los reservorios por escurrimiento fluvial (25%) e infiltración subterránea (3%) (Conagua, 2007). La mayor parte de la precipitación (67%) se presenta durante los meses del verano (mayo-octubre) (Mosiño y García, 1974). La disponibilidad del recurso se evalúa en términos de la cantidad natural del agua *per capita*. La distribución regional de la precipitación en México depende en gran medida de la proximidad a las costas, del relieve orográfico y de las características sinópticas de la circulación atmosférica (García, 2003). No obstante la región sureste del país tiene una disponibilidad 7 veces mayor que el resto del país (Conagua, 2007). Los estudios recientes indican variaciones relativas a la precipitación total anual, de incremento en las zonas áridas, semiáridas (1.8%) y lluviosas (0.9%) pero también de decremento de 1.2% en las regiones húmedas (Mendez *et al.*, 2008).

Los recursos hídricos son transportados en forma natural a través del ciclo hidrológico mediante flujos de vapor atmosférico, corrientes oceánicas, descargas de ríos, escurrimientos e infiltraciones subterráneas. El transporte de estos recursos se realiza entre los diversos reservorios en que se almacenan, tales como glaciares, cuencas oceánicas y fluviales, estuarios, lagos, mantos acuíferos y otros reservorios de ingeniería humana. El transporte efectivo entre un reservorio y otro es considerada la recarga del mismo. Los recursos hídricos son considerados renovables en el supuesto de que existen fuentes de recarga para estos, excepto de aquellos que yacen en bolsones de aguas subterráneas fósiles. Es decir, acuíferos existentes, que actualmente por modificaciones climáticas o cambios orográficos ocurridos en tiempos geológicos, ya no tienen fuente de recarga (Davis y De Weist, 1967). Los volúmenes de recarga y las razones de transferencia entre uno y otro reservorio son muy variables en tiempo y espacio a lo largo del planeta (Chahine, 1992).

Actualmente hay una gran preocupación por mitigar los impactos que se perciben en estos recursos debido a diferentes factores tales como la degradación de las zonas costeras adyacentes a centros urbanos y turísticos, las altas tasas de explotación de recursos naturales, entre otros los pesqueros, los altos índices de contaminación e impacto ambiental en sus ecosistemas y los cambios ambientales que inciden en la distribución y abundancia de humedales y de la fauna marino costera (peces, aves y mamíferos). La acción conjunta de estos factores induce una mayor vulnerabilidad de los recursos hídricos a los efectos del cambio climático global. La magnitud del impacto potencial asociado a éste depende tanto de las tendencias de variación en el volumen y calidad del agua de las recargas que son transportados por los distintos flujos hidrológicos, como de las características propias del sistema y de su capacidad para sobrellevar las presiones antropogénicas ejercidas sobre el sistema. Por lo que se puede anticipar que la pre-

servación de los recursos hídricos dependerá de la forma en que se aplique la gestión de manejo y las adaptaciones al cambio climático actual.

Es preciso tener presente que el vapor de agua, una de las formas de existencia de los recursos hídricos, es uno de los gases de invernadero que mayormente contribuyen al calentamiento global del planeta en conjunto con otros gases tales como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y ozono ( $\text{O}_3$ ). La conformación de nubes, en la que interviene el vapor de agua, es uno de los procesos hidrológicos que se llevan a cabo en una de las escalas temporales más rápidas en el clima terrestre. La nubosidad y el ambiente de vapor de agua en el que estas se encuentran, modulan el balance de radiación del planeta, por lo que los modelos climáticos y los pronósticos acertados del tiempo atmosférico requieren de una cuidadosa representación paramétrica de los procesos hidrológicos que se presentan en las nubes. En contraparte, el desarrollo de la estructura dinámica y termodinámica del océano es responsable de la modulación del clima en escalas largas de tiempo. De tal forma, los procesos de interacción océano-atmósfera son responsables de la rectificación temporal de los procesos hidrológicos de alta frecuencia que incide en las variaciones del clima de baja frecuencia. Asimismo los procesos costeros que intervienen en el ciclo hidrológico del agua se llevan a cabo en distintas escalas espacio-temporales. El impacto potencial en la hidrología costera relativo al cambio climático actual, está intrínsecamente relacionado con la acción de los procesos de interacción océano-atmósfera en el entendido de que estos modulan el clima. La determinación de las tendencias en los procesos hidrológicos es la tarea actual de la modelación climática regional en escenarios de cambio climático (Conde, 2003; Gay *et al.*, 2006; Bindoff *et al.*, 2007).

## **INTERACCIÓN OCÉANO-ATMÓSFERA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO ACTUAL**

La tendencia de calentamiento del clima actual ha sido evidenciada por las diversas observaciones del incremento de las temperaturas oceánicas y atmosféricas, derretimiento de glaciares y el incremento del nivel del mar. Estas condiciones tienen asociadas variaciones de mayor amplitud en los niveles de inundación y en la intensidad de vientos y corrientes dominantes, las cuales inducen un mayor grado de erosión costera y de intrusión de agua marina en los reservorios de agua continental con una consecuente degradación de humedales (Titus, 1987). Una menor extensión en estos ecosistemas representa también una menor retención de carbono, mayor liberación de dióxido de carbono y otros gases de invernadero responsables de más del 60% de las tendencias de calentamiento en el cambio climático actual. Asimismo los humedales representan sistemas ecológicos de protección al paisaje costero (natural y urbano) de primera línea. Las playas, dunas, estuarios y manglares, entre otros humedales costeros están integralmente adaptados de forma natural para mitigar los incrementos del nivel mar, la intensidad del oleaje, corrientes y vientos dominantes. No obstante, los cambios previstos como resultado del cambio climático se realizan con mayor rapidez en comparación con el índice de cambio natural a los que estos sistemas están adaptados. En algunas regiones se suma

el impacto de tormentas, incrementando aún más la amplitud de las variaciones de las condiciones físicas antes mencionadas además del régimen local de precipitación y de los consecuentes escurrimientos pluviales e infiltraciones subsuperficiales. La amplitud y la gravedad de los impactos de tormentas, incluidas las inundaciones por temporales y las sobre-elevaciones instantáneas del nivel mar, se ha previsto como un efecto asociado al cambio climático actual. Aunque no está bien entendido si un incremento en la actividad de tormentas es una respuesta de retroalimentación positiva o negativa del clima oceánico-atmosférico.

Asociado a la formación de nubes y la existencia de la biosfera terrestre, el albedo actual de la Tierra (aproximadamente igual a 0.3) actúa en conjunto con el efecto invernadero confirmando al planeta una temperatura cerca de 5 veces mayor a la del punto de congelación del agua (Webster, 1994). Razón por la cual la mayor cantidad de agua en el planeta se encuentra en forma líquida. Es bien sabido que los océanos contienen en una gran extensión la mayor parte del agua líquida del planeta, y que debido a las propiedades salinas del agua marina, funcionan como un factor regulador del balance de las distribuciones de calor, momento y la densidad de una gran cantidad de gases que intervienen en la actividad atmosférica, tales como el oxígeno y  $\text{CO}_2$  entre otros. Por lo que en términos generales funciona como regulador del clima global, más aún si se considera la diversa biósfera que alberga y que es en gran medida el responsable del intercambio de sustancias climatológicamente activas con la atmósfera. Es mediante este proceso de intercambio que la biosfera marina contribuye en la modulación de las características de la superficie del planeta a través de la constitución de gases en la atmósfera y la turbidez del océano.

Así por ejemplo, el  $\text{CO}_2$  absorbido en el océano mediante la fotosíntesis es transferido en un gran porcentaje hacia la atmósfera, a través de un ciclo regular y estable, no obstante una porción menor es sedimentada y almacenada en las profundidades del océano y retenida en periodos que exceden los 500 años. El secuestro de  $\text{CO}_2$  que constituye la bomba a largo plazo de esta misma sustancia, es en gran medida dependiente de la estructura y distribución de la comunidad de plancton que a su vez depende de las condiciones del clima. Otro ejemplo en el que también interviene de manera importante la comunidad de plancton, reside en la producción de dimetilsulfuro, el cual es un gas de azufre producido por el plancton y que los océanos liberan continuamente en pequeñas cantidades hacia la atmósfera, en donde se oxida para formar partículas que reflejan la radiación solar tanto de forma directa como a través del aumento en la densidad de gotas de agua que forman las nubes. En este sentido el azufre de origen oceánico funciona como un gas de anti-invernadero, es decir de efecto contrario al efecto invernadero, debido a su contribución en el aumento de nubosidad la cual absorbe parte de la radiación solar que incidiría en el mar en condiciones sin nubosidad. El resultado de este proceso es el de un menor calentamiento de la superficie del mar e incluso en la prolongación de los episodios de eventos meteorológicos extremos.

No obstante el océano actúa en forma bidireccional a la tendencia de cambio climático actual. El incremento de las concentraciones de los gases de invernadero y en consecuencia el de la temperatura, atmosférica y oceánica, son características del cambio climático actual que

inducen un incremento en el régimen regional de mezcla oceánica vertical, afectando de este modo la disponibilidad de nutrientes para el fitoplancton y en última instancia para la producción pesquera. Por su parte el incremento en las concentraciones oceánicas de  $\text{CO}_2$ , aumenta la acidez del agua marina, impidiendo a los corales generar carbonato cálcico o la transformación de calcio necesaria para la supervivencia de los moluscos y el plancton calcáreo. La excedente absorción de  $\text{CO}_2$  en complemento con una alta absorción de nutrientes, principalmente nitrógeno proveniente de la quema de combustibles fósiles y el vertimiento de residuos y fertilizantes agrícolas, producen bajas concentraciones de oxígeno en el agua marina. Estas condiciones de hipoxia no son favorables para la sobrevivencia de peces, moluscos y otros organismos marinos, lo que ha dado como resultado la conformación de “zonas muertas” en el océano.

## CONDICIONES ACTUALES

La tendencia de calentamiento global observada en décadas pasadas es consistente con los patrones de cambio observados en el océano, tal como el contenido de calor oceánico, salinidad, nivel del mar, expansión térmica, evolución de las masas de agua y parámetros biogeoquímicos. Estos cambios son también consistentemente asociados con las variaciones observadas en los procesos del ciclo hidrológico, tales como régimen de precipitación, densidad del vapor de agua atmosférica, tasas de evaporación y descarga de ríos. Sin embargo, se tienen incertidumbres significativas en las tendencias de las variables hidrológicas, debido principalmente a las limitaciones en espacio y tiempo de la resolución espacial y temporal de las redes de monitoreo (Houghton *et al.*, 2001).

## CONTENIDO DE CALOR OCEÁNICO

El cambio en el contenido de calor oceánico representa el cambio en el promedio vertical de la temperatura de un volumen de agua marina. Esta variable oceanográfica es utilizada para determinar la cantidad de calor que fluye a través de la superficie oceánica hacia la atmósfera y que es absorbida por ésta en el proceso de evaporación. La condensación del vapor de agua liberado en este proceso de evaporación por flujo de calor latente, dispone energía calorífica que se manifiesta en la intensificación de la circulación del viento y de la precipitación atmosférica. Es en este contexto que el contenido de calor oceánico superficial, hasta 200 m de profundidad, es una variable que está siendo utilizada para pronosticar la intensificación repentina de huracanes (Mainelli *et al.*, 2008).

En el periodo de 1961 a 2003, la temperatura global del océano se incremento en  $0.10^\circ\text{C}$  desde la superficie hasta los 700 m de profundidad. Esto es 7.4 veces menor que el calentamiento estimado en la atmósfera, desde la superficie hasta la troposfera media. De acuerdo IPCC (tercer reporte de cálculos), el contenido de calor oceánico se ha incrementado en la profundidad media de 3 000 m, equivalente a la energía promedio global absorbida de  $0.2 \text{ Wm}^{-2}$  en el periodo 1961-2003. Aproximadamente 65% de esta energía es absorbida en los primeros

700 m de profundidad (Willis *et al.*, 2004). Las observaciones del contenido de calor oceánico indican una variabilidad interdecadal superpuesta a una tendencia de largo plazo. Relativa al periodo 1961-2003, el periodo 1993-2003 se caracterizó por las máximas razones de calentamiento. Posterior al periodo del año 2003 se ha venido registrando un decremento en las tasas de calentamiento.

## CAMBIO EN EL NIVEL DEL MAR

El volumen de los océanos se ha incrementado como consecuencia del calentamiento global que induce la expansión térmica del agua marina. El resultado de esta expansión marca la tendencia de incremento del nivel del mar en las últimas décadas. La altura del nivel del mar en las zonas costeras determina los niveles de inundación de las planicies costeras. El incremento en la altura de esta variable induce un decremento en las descargas de ríos, principalmente en costas de escasa pendiente. De tal manera que los niveles de inundación no solo son determinados por el potencial arribo del agua marina sobre las planicies costeras, sino también por el aumento del nivel de agua en las cuencas fluviales. En estas condiciones los suelos de las zonas costeras inundables se saturan, los mantos acuíferos se salinizan, afectando la producción intermareal de los ecosistemas costeros y en última instancia el intercambio de gases en las regiones de humedales (Webster, 1994). Incrementado el nivel del mar se exacerban los riesgos de las planicies costeras al impacto de las tormentas.

Durante los últimos 100 años, el nivel del mar se ha elevado en el promedio global entre 10 y 20 cm, o bien 1 a 2 mm/año (Bindoff *et al.*, 2007). En el periodo de 1993 a 2003, utilizando mediciones de altimetría satelital, se ha evaluado un incremento de  $3.1 \pm 0.7$  mm/año, sin embargo no está bien entendido si este incremento es debido a fluctuaciones en la variabilidad interdecadal o de más largo plazo (Davis y De Wiest, 1967). Las tasas de cambio registradas en el Golfo de México varían de 3 a 5 mm/año en las costas de Texas y Louisiana así como en otras regiones costeras del Golfo de México nororiental. Estas variaciones han sido asociadas a las diferencias regionales en la extracción de agua del subsuelo e hidrocarburos submarinos, la compactación de suelos fangosos, efectos isostáticos y de subsidencia así como también por levantamientos tectónicos.

Las proyecciones de los modelos climáticos en los próximos 100 años indican que el calentamiento global acelere la razón de incremento del nivel del mar principalmente debido al derretimiento de los glaciares y en menor grado a la expansión térmica del agua oceánica (Bindoff *et al.*, 2007). El rango de los modelos de proyección de los más recientes cálculos en el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) abarca incrementos de 9 a 88 cm en el promedio global para el 2100. Estas proyecciones son consistentes con estudios previos (Houghton *et al.*, 2001). Aunque la emisión de los gases de invernadero sean estabilizados, la razón de cambio del nivel del mar continúa aumentando en el promedio global más allá del 2100. Esto debido al tiempo que requieren los océanos y las capas de hielo para aproximarse a las condiciones de equilibrio con la atmósfera. Las diferencias regionales en el movimiento

terrestre y el impacto climático en la presión atmosférica y los vientos a lo largo de la costa producen diferencias en el nivel del mar relativo a los márgenes continentales. Incertidumbres del nivel del mar local futuro son mayores al 50% que para el promedio global del nivel del mar (Houghton *et al.*, 2001).

## **CIRCULACIÓN OCEÁNICA**

Las corrientes oceánicas, los frentes costeros y las regiones de surgencias o sumergencias son de gran importancia en la distribución y producción de ecosistemas marinos. Las características de estos componentes de la circulación oceánica son susceptibles de variación en respuesta a las fluctuaciones en temperatura, precipitación, descarga de ríos, salinidad y viento. El incremento en el flujo de agua continental tiene como resultado una estratificación más estable, un potencial incremento en las corrientes de densidad y un potencial decremento en el flujo vertical de nutrientes. Estas condiciones favorecen el incremento de la productividad biológica en algunos sistemas permitiendo que los organismos permanezcan en la zona fótica. Estos cambios ocurren en un intervalo de escalas que varían de la escala pequeña de mezcla turbulenta a la circulación de gran escala. Por lo que el estudio de su proyección en modelos que consideran escenarios de cambio climático ha sido complicado.

El análisis de los datos de salinidad entre 1955 y 1998 mostrados en Bindoff *et al.* (2007), indica tendencias coherentes caracterizadas por un decremento de salinidad en las latitudes subpolares principalmente del Océano Pacífico y un incremento en las regiones someras de las latitudes tropicales de los océanos Atlántico e Índico. Estas tendencias son consistentes con los cambios en el régimen de precipitación, induciendo transportes atmosféricos meridionales de vapor de agua más intensos de los trópicos hacia los polos y zonales del Pacífico hacia el Atlántico. No obstante, no hay indicios de cambios en la circulación oceánica. Únicamente se han identificado calentamientos en algunos patrones semipermanentes de la circulación oceánica regional subsuperficial (circulación circumpolar profunda) y superficiales (corrientes de frontera oeste del Atlántico y Pacífico norte).

## **REGIMEN DE PRECIPITACIÓN ATMOSFÉRICA**

En la escala global, cambios en la producción de vapor de agua, nubosidad y extensión de capas de hielo modulan el balance de radiación del planeta y con este la respuesta del clima al incremento en las concentraciones de gases de invernadero. De la misma forma, el incremento en la temperatura, es quizás el impacto potencial de mayor importancia en el efecto de la distribución global de la precipitación y la frecuencia de tormentas y sequías severas. No obstante la determinación de las variaciones y las tendencias de la precipitación sobre los océanos es aún una tarea pendiente ya que se tienen limitaciones de cobertura espacio-temporal de los monitoreos.

## TORMENTAS COSTERAS

El número de huracanes en años consecutivos ha estado variando por un factor mayor que 3. Aun cuando las tendencias en la frecuencia de ocurrencia de huracanes no son atribuidas al cambio climático actual, se tiene identificada una modulación importante por parte del modo de variación interdecadal en la variabilidad de huracanes en el Atlántico Norte, resultando en una alta actividad ciclónica durante el periodo de 1941-1965 y la década de los 90 (Landsea, 1993). Nguyen y Walsh (2001) prevén la posibilidad de que disminuya la frecuencia de ocurrencia de ciclones tropicales en el Atlántico Norte, durante el futuro próximo, debido a la tendencia actual de la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical a permanecer por encima de la media climatológica, especificando una condición climatológica cálida característica de condiciones de El Niño, en las cuales se ha observado una baja actividad ciclónica en el Atlántico Norte (Pielke y Landsea, 1998). Aun cuando ha sido difícil identificar efectos del cambio climático en la frecuencia de ocurrencia de huracanes, se espera que la intensidad de los vientos en un huracán se incrementen como resultado de la permanencia de altas temperaturas superficiales del océano. Las investigaciones de Knutson y Manabe (1998) y Knutson y Tuleya (1999) mostraron que un incremento del 5-10% en la intensidad del viento de huracanes es posible con un calentamiento de 2.2 °C en la superficie del mar. Para un huracán moderado, un incremento semejante en la intensidad del viento se traduce en un incremento del 25% en el poder destructivo de los vientos. La altura del oleaje de tormenta puede incrementarse en la misma proporción, amplificándose los impactos en la hidráulica costera. Otras investigaciones sugieren que los ciclones que ocurrirán en el Atlántico Norte serán de mayor intensidad (Kerr, 1999). Además de los cambios potenciales en la frecuencia de ocurrencia y la intensidad de los ciclones tropicales, las precipitaciones costeras torrenciales y las mareas de tormentas excedentes resultan en un incremento mayor del nivel del mar, lo cual representa una mayor vulnerabilidad de las líneas de costa.

## CONCLUSIÓN

Los recursos hídricos mantenidos por el ciclo hidrológico del agua son renovados en gran parte por el régimen de precipitación atmosférica. Como resultado de las condiciones del relieve orográfico y de la distribución espacial de la precipitación en el territorio mexicano, la región sureste está caracterizada por una disponibilidad de agua 7 veces mayor que el resto del país. Los estudios de proyección de las tendencias de cambio en el régimen de precipitación indican un panorama que favorece la renovación del recurso hídrico en las zonas áridas, semiáridas y lluviosas. Sin embargo está previsto un decremento de la precipitación en las regiones húmedas.

Las variaciones en las condiciones oceánicas que han sido identificadas consistentemente con el cambio climático actual son: incremento en el contenido de calor oceánico, incremento del nivel del mar, cambio en la distribución de la salinidad y cambio en las concentraciones de los componentes bioquímicos. Estas características no son espacialmente uniformes a lo

largo del planeta, en algunas regiones los incrementos son más intensos que los valores medios reportados, y en algunos otros las variaciones pueden tener una tendencia contraria a la tendencia media. El impacto que estos elementos oceánicos tienen sobre los procesos hidrológicos costeros es, directamente debido al riesgo de incremento en los niveles de inundación, e indirectamente, debido al potencial incremento de los flujos sinópticos de vapor de agua, asociado a los cambios en la distribución de la salinidad de los océanos, y en escalas regionales, debido a la tendencia de cambio del régimen de precipitación por presentarse tormentas más intensas y de menor duración. Por lo que una cuantificación acertada del impacto potencial en los recursos hídricos regionales requiere del monitoreo constante de las variables ambientales que caracterizan el sistema marino-costero.

## AGRADECIMIENTOS

Al apoyo otorgado para la realización del proyecto SIP 20090608 del Instituto Politécnico Nacional.

## LITERATURA CITADA

- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley, y A. Unnikrishnan, 2007. Observations: Oceanic climate change and sea level. *In*: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Chahine, M., 1992. The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 359: 373-380.
- Conde, C., 2003. Cambio y Variabilidad Climáticos. Dos Estudios de Caso en México. Tesis para obtener el Doctorado en Ciencias de la Tierra. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. 227 p.
- Conagua, 2007. Estadísticas del agua en Mexico, Semarnat.
- Davis S., y R. De Wiest, 1967. Hidrogeología, Ed. Ariel. Barcelona, España.
- García, E., 2003. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. Investigaciones Geográficas, Boletín No. 50, Instituto de Geografía. UNAM, México.
- Gay, C., C. Conde, y O. Sánchez, 2006. Escenarios de Cambio Climático para México. Temperatura y Precipitación. [www.atmosfera.unam.mx/cambio/escenarios/escenarios\\_3A\\_mapas\\_y\\_datos.htm](http://www.atmosfera.unam.mx/cambio/escenarios/escenarios_3A_mapas_y_datos.htm).
- Houghton, J.T., *et al.* (eds.), 2001. *Climate Change the Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and NY, USA, 881 p.
- Kerr, R.A., 1999. Big El Niños ride the back of slower climate change. *Science*, 283: 1108-1109.
- Knutson, T. R., y S. Manabe, 1998. Model assessment of decadal variability and trends in the tropical Pacific Ocean. *J. Climate*, 11: 2273-2296.
- Knutson, T. R., y R. E. Tuleya, 1999. Increased hurricane intensities with CO<sub>2</sub> induced warming as simulated using the GFDL hurricane prediction system. *Climate Dyn.*, 15: 503-519.

- Landsea, C. W., 1993. A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 1703-1713.
- Mendez, J., J.J. Navar, y V. Gonzalez, 2008. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. Investigaciones Geográficas, *Boletín del Instituto de Geografía*, 65 (2008) 38-55.
- Mainelli, M., M. DeMaria, L. Shay, y G. Goni, 2008. Application of oceanic heat content estimation to operational forecasting of recent Atlantic category 5 hurricanes. *Weather and Forecasting*, 23: 3-16.
- Mosiño, P.A., y E. García, 1974. The climate of Mexico. World survey of climatology. p. 345-404. In: R. A. Bryson and F. K. Hare (eds.) *Climates of North America* vol. II. London, Elsevier.
- Nguyen K.C., y K.J. Walsh, 2001. Interannual, decadal, and transient greenhouse simulation of tropical cyclone-like vortices in a regional climate model of the South Pacific. *Journal of Climate*, 14: 30043-3054.
- Pielke Jr. R.A., y C.W. Landsea, 1998. Normalized hurricane damages in the United States, 1925-1997. *Weather and Forecasting*, 13: 351-361.
- Titus, J., 1987. Sea level rise and wetland loss: an overview. In: EPA (Environmental Protection Agency). *Greenhose effect sea level rise and Coastal Wetlands*. USA. 35 p.
- Untersteiner, N., 1984. The cryosphere. p. 121-137. In: J. T. Houghton (ed.) *The Global Climate*, Cambridge University Press, New York.
- Webster, P.J., 1994. The role of hidrologycal processes in ocean-atmosphere interactions. *Reviews of Geophysics*, 32(4): 427-476.
- Willis, J.K., D. Roemmich, y B. Cornuelle, 2004. Interannual variability in upper-ocean heat content, temperature and thermosteric expansion on global scales. *J. Geophys. Res.*, 109, C12036, doi:10.1029/2003JC002260.

Azuz Adeath I., 2010. Evidencias de cambios de largo plazo en algunas variables climáticas de los estados costeros de México. p. 33-60. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Evidencias de cambios de largo plazo en algunas variables climáticas de los estados costeros de México

*Isaac Azuz Adeath*

---

## RESUMEN

Las políticas públicas orientadas a la gestión integral de la zona costera, que consideren en el largo plazo los efectos potenciales del cambio climático, requieren estudios de carácter regional, que permitan evidenciar y cuantificar los fenómenos que se manifiestan en la región litoral, con el fin de proponer estrategias de mitigación o adaptación. A partir del análisis descriptivo y correlacional de los registros mensuales de la temperatura máxima reportada en los estados costeros de México durante el período 1971-2009, en conjunto con información referente a la temperatura superficial del mar y los índices de algunas anomalías de largo plazo, el presente capítulo busca identificar si el calentamiento global de la superficie terrestre y marina, es una señal del cambio climático visible en los estados costeros mexicanos. Los resultados mostraron que durante los últimos años, los estados costeros de México han experimentado una tendencia al calentamiento. Dicho comportamiento se puede observar de manera más marcada en la región del Pacífico y Mar de Cortés. Se observó la influencia de las temperaturas superficiales oceánicas sobre los estados costeros, particularmente en la costa oeste, donde los estados de Nayarit y Oaxaca presentaron un aumento significativo de la temperatura máxima, cuando el análisis se realizó por mes, a lo largo de los 39 años de registro. Por el momento y dada la longitud del registro analizado, no es posible establecer con claridad si los incrementos observados se pueden atribuir al cambio climático global o a fenómenos de interacción océano-atmósfera de carácter oscilatorio con frecuencias del orden de décadas. Los resultados plantean la necesidad de adecuar los referentes de planeación para la adecuada gestión de estos espacios territoriales.

## INTRODUCCIÓN

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), reporta que la temperatura global de la superficie terrestre ha aumentado  $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$  entre 1906 y 2005 (Trenberth *et al.*, 2007); por su parte, entre 1961 y 2003 la temperatura global de los océanos ha experimentado un incremento de  $0.1^{\circ}\text{C}$  en las capas que se extienden desde la superficie hasta 700 m de profundidad (Bindoff *et al.*, 2007).

Se asume que este calentamiento global reciente del planeta tiene su origen en el efecto invernadero que producen diferentes gases atmosféricos (*e.g.* dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , metano  $\text{CH}_4$ , óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$ , alocarbonos y exafluoruro de azufre  $\text{SF}_6$ ), cuyo incremento se ha asociado a las actividades y estilos de vida que el ser humano adoptó a raíz de la revolución industrial, y la influencia que el desarrollo de la civilización ha tenido en el balance de las fuerzas radiantes del planeta.

Si bien, a lo largo de las diferentes eras geológicas la tierra ha pasado por estados de calentamiento y enfriamiento global, Caldeira y Wicket (2003) estiman, que de continuar con las tasas actuales de emisión/captura de carbono atmosférico dentro de 300-400 años se habrán liberado 5 000 gigatoneladas de Carbono. Este sería un nivel nunca antes experimentado por el planeta en los últimos 50 millones de años, produciendo condiciones similares a la era Cenozoica, en la cual, la actividad volcánica intensa y continua, produjo una temperatura media que impedía la formación de hielo en los polos (Zachos *et al.*, 2008).

La gestión marina y costera como un proceso de múltiples escalas, debe tener presentes estos antecedentes del comportamiento geológico de la tierra, pero con un enfoque que le permita actuar en escalas de interés para el ser humano.

En el largo plazo, las modificaciones globales que se pudieran presentar en el clima del planeta tendrán importantes consecuencias sobre las regiones litorales, entre las que se deben resaltar:

- Un aumento acelerado (en escalas de tiempo geológicas) del nivel medio del mar, como consecuencia de la expansión térmica del océano y por el derretimiento de los hielos polares.
- Modificaciones de los regímenes pluviométricos, y en la intensidad y frecuencia de los eventos meteorológicos extremos, como consecuencia de las alteraciones en los patrones de circulación del océano y la atmósfera.
- Modificaciones en el pH del océano (acidificación) como consecuencia de la incorporación de más carbono en los ciclos biogeoquímicos.
- Modificaciones en la distribución de salinidad y temperatura de las capas superficiales y medias del océano.

De acuerdo con el IPCC, durante el siglo XX, el nivel medio del mar ha aumentado a una tasa global de  $1.7 \pm 0.5$  mm/año, presentando una importante variación en escalas de décadas. Para el periodo 1993-2002, mediciones de altimetría satelital establecieron aumentos de  $3.1 \pm 0.7$  mm/año en dicho nivel (Bindoff *et al.*, 2007).

Como consecuencia de estos fenómenos de largo plazo, son de esperarse impactos de diferentes magnitudes y extensiones geográficas, cuando menos en los siguientes aspectos:

- Aumento de la vulnerabilidad (social, económica y ecológica) y la probabilidad de riesgo de las regiones costeras.
- Cambios en los flujos sedimentarios, de nutrientes y en el transporte de contaminantes (*e.g.* modificaciones en los aportes de sedimentos de origen terrestre hacia la costa, intensificación de los procesos erosivos en las playas, aumento en los aportes de fosfatos, nitratos, contaminantes y residuos, asociados con actividades realizadas en tierra)
- Cambios en los patrones de las corrientes oceánicas, vientos, nubosidad, precipitación y zonas de surgencia, cuyas repercusiones pueden ser importantes en la distribución, presencia, estacionalidad e incluso sobrevivencia de especies biológicas tanto de importancia comercial (*e.g.* pesquerías) como ecológica (*e.g.* especies endémicas).
- Alteraciones en la biota marina y costera (*e.g.* blanqueamiento de los corales, cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas de microorganismos, modificaciones en la distribución de zonas de humedales, en particular de manglares, etc.).
- Modificaciones en las plagas y enfermedades en los ámbitos de la salud humana, la producción pesquera, acuícola, ganadera y forestal.
- Impactos sobre zonas de cultivo (*e.g.* extensión y periodicidad de los ciclos de cultivo) y sobre la viabilidad de mantener productos agrícolas “históricos” o “tradicionales”.
- Impactos generales en el ámbito socio-económico (incluida infraestructura).

Sin perder la perspectiva global, para afrontar estos retos de gestión en el largo plazo, es necesario contar con datos y estudios de carácter regional para, tal como lo indica Twilley (2007), evaluar los impactos del cambio climático que ocurren de manera local y que pueden tomar muchas formas de acuerdo al lugar que se analice.

En el caso particular de las zonas costeras y marinas de México, la disponibilidad de datos locales (registrados *in situ*) que permitan hacer análisis regionales (amplia cobertura espacial) y de largo plazo (extensas series temporales) es limitada y carente de una aproximación multidisciplinaria. Iniciativas recientes como la instalación de la Comisión Nacional Coordinadora de Investigación Oceanográfica (CONACIO) en el 2006 y el Observatorio Marino Costero Jacques-Yves Cousteau en el 2009, buscan subsanar esta deficiencia de información.

El objetivo del presente capítulo es presentar un análisis descriptivo de diferentes variables climáticas que se registran en la zona costera, en conjunto con información oceánica y atmosférica de gran escala, enfocado en los cambios de largo plazo (respecto a valores promedio) que ya pudieran estarse manifestando a escala regional.

Si bien este estudio se centra en el comportamiento de las temperaturas máximas mensuales registradas en los estados costeros de México, se complementa con información de las anomalías en la temperatura superficial del mar y en algunos índices de oscilaciones de largo plazo y fenómenos episódicos de gran escala como las condiciones de “El Niño” y “La Niña”, fundamentales para entender los procesos de interacción océano/atmósfera (ver en esta misma obra una descripción de dichos procesos en Sánchez-Montante, p. 23-32).

Para el caso de los estados costeros de México se consideró el registro mensual de la temperatura máxima promedio por estado, para el periodo 1971-2009 (SMN-Conagua, 2010).

En el caso de las variables oceánicas y atmosféricas de gran escala se consideró información de los siguientes fenómenos y procesos:

- a) Datos mensuales del índice de la Anomalía Multidécada del Atlántico (MOA).
- b) Datos mensuales del índice de la Anomalía Decadal del Pacífico (PDO).
- c) Datos mensuales del índice de “El Niño” (ENSO).
- d) Datos mensuales de la anomalía de la temperatura superficial del mar para el Hemisferio Norte (TSS).

En México el tema del impacto del cambio climático en las zonas costeras se ha tratado a partir de diferentes aproximaciones:

- a) Desde la óptica de las políticas públicas (*e.g.* Estrategia Nacional de Cambio Climático, 2007; Programa Especial de Cambio Climático 2009 y Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático);
- b) Desde la perspectiva de las condiciones y acciones del país (*e.g.* Martínez *et al.*, 2004);
- c) Con una visión ecosistémica (*e.g.* Yañez-Arancibia *et al.*, 2010);
- d) Con un enfoque ambiental (*e.g.* Vazqu ez-Botello *et al.*, 2010);
- e) Definiendo estrategias de adaptación (*e.g.* Levina *et al.*, 2007);
- f) Como un elemento para la gestión costera (*e.g.* Rivera-Arriaga *et al.*, 2010).

En este sentido el presente estudio buscó responder a las preguntas:   existe un incremento significativo en la temperatura de los estados costeros de México? ,   Cuáles serían las posibles causas que lo originan? y   Qué consecuencias podría tener dicho calentamiento sobre los procesos de gestión marina y costera?.

A continuación se describe y analiza por métodos estadísticos, el comportamiento de las temperaturas máximas mensuales de los estados costeros utilizando valores mensuales, promedios anuales y por década.

Se complementa el estudio con algunos análisis de correlación utilizando las anomalías de temperatura superficial del mar, tanto sus valores mensuales como los promedios anuales y los índices de oscilaciones multidécada para el Pacífico y el Atlántico.

## **COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO EN LOS ESTADOS COSTEROS**

La ubicación geográfica, dimensión, orientación, fisiografía, longitud de la línea de costa, extensión y tipo de cubierta vegetal, entre otros, son factores naturales que condicionan la distribución de temperaturas al interior de los distintos estados costeros de México.

La medición de dichas temperaturas a su vez, puede verse afectada por la ubicación de las estaciones de monitoreo (*e.g.* altitud, distancia a los centros urbanos o a la línea de costa, etc.);

por el estado que guarden y por la calidad original de los instrumentos de medición (*e.g.* antigüedad, mantenimiento, exactitud y precisión) y también por factores humanos (*e.g.* pérdida de algún registro, errores en las lecturas, etc.).

En este sentido los datos que se manejan en el presente estudio son promedios estatales por mes, de la temperatura máxima, obtenidos a partir de los registros de las estaciones definidas en la tabla 1. Se considera que este promediado espacial cumple con los requisitos de representatividad de la temperatura media del estado, eliminando posibles fluctuaciones locales.

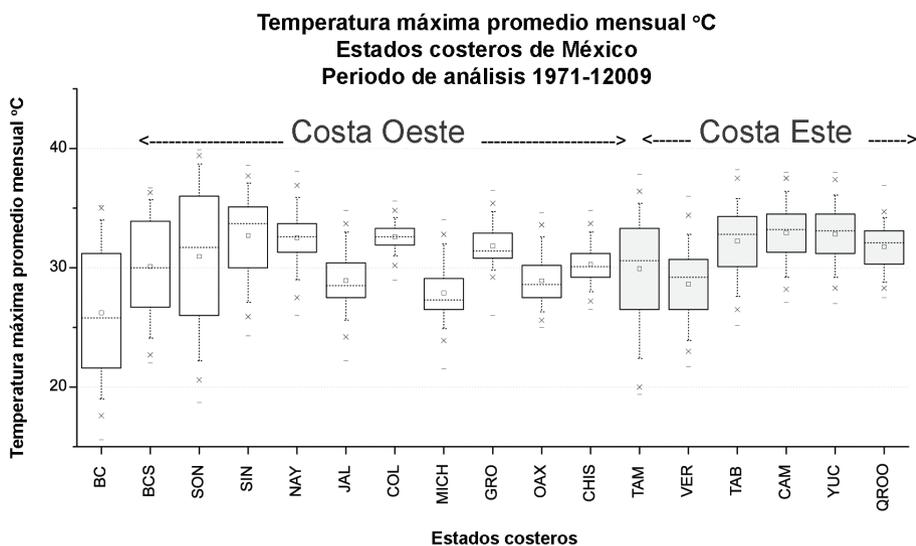
El análisis integrado de la información mensual de la temperatura máxima de los estados costeros durante el periodo 1971-2009 arroja resultados interesantes (figura 1). En primer lugar, se puede observar que los estados costeros más norteños de ambas costas (*i.e.* BC, SON, TAM) presentan en general las mayores fluctuaciones de temperatura. En el otro extremo, los estados de la región de la península de Yucatán (*i.e.* CAM, YUC, QROO), presentan temperaturas medianas y niveles de fluctuación muy similares, junto con el estado vecino (Tabasco). Los estados del Pacífico Central y Sur (*i.e.* NAY, JAL, COL, MICH, GRO, OAX, CHI) presentan niveles de fluctuación bajos y similares, con temperaturas promedio alrededor de los 30 °C ± 2.5 °C.

El análisis de grupos realizado sobre los estados costeros (figura 2), mostró regiones con comportamientos similares de la temperatura máxima a lo largo del registro, sobresale la región del Mar de Cortés y los estados correspondientes al Pacífico Sur (Guerrero, Oaxaca y Chiapas). También se observa la marcada diferencia del estado de Michoacán respecto a sus estados vecinos y en general respecto a todos los estados costeros. En el caso de la costa este, la formación de grupos es menos marcada por presentar una mayor homogeneidad en el comportamiento global, sin embargo se debe resaltar la similitud más elevada, la cual corresponde a los estados de Tamaulipas y Yucatán.

El análisis de las series de tiempo individuales para cada estado presenta características importantes de describir, como serían las modulaciones de largo plazo (*e.g.* 5 a 10 años) presentes de manera marcada en las señales de los estados limítrofes del Golfo de California en la costa oeste y de Tabasco, Campeche y Yucatán en la costa este. Estas modulaciones pierden intensidad conforme se analizan los estados del Pacífico Central y Sur, y de la parte norte del Golfo de México y el Mar Caribe. Las siguientes figuras muestran dicho comportamiento (figura 3).

**Tabla 1.-** Relación de estaciones climatológicas por entidad federativa en 2006  
(Conagua-Semarnat, 2007)

Baja California (BC)	73	Jalisco (JAL)	129	Sonora (SON)	143
Baja California Sur (BCS)	130	Michoacán de Ocampo (MICH)	125	Tabasco (TAB)	55
Campeche (CAM)	51	Nayarit (NAY)	35	Tamaulipas (TAM)	141
Chiapas (CHIS)	124	Oaxaca (OAX)	85	Veracruz de Ignacio de la Llave (VER)	120
Colima (COL)	32	Quintana Roo (QROO)	41	Yucatán (YUC)	66
Guerrero (GRO)	131	Sinaloa (SIN)	44		



**Figura 1.** Diagrama de cajas elaborado a partir de la temperatura máxima mensual reportada para los estados costeros de México durante el periodo 1971-2009. Elaboración propia a partir de información de SMN-Conagua, 2010.

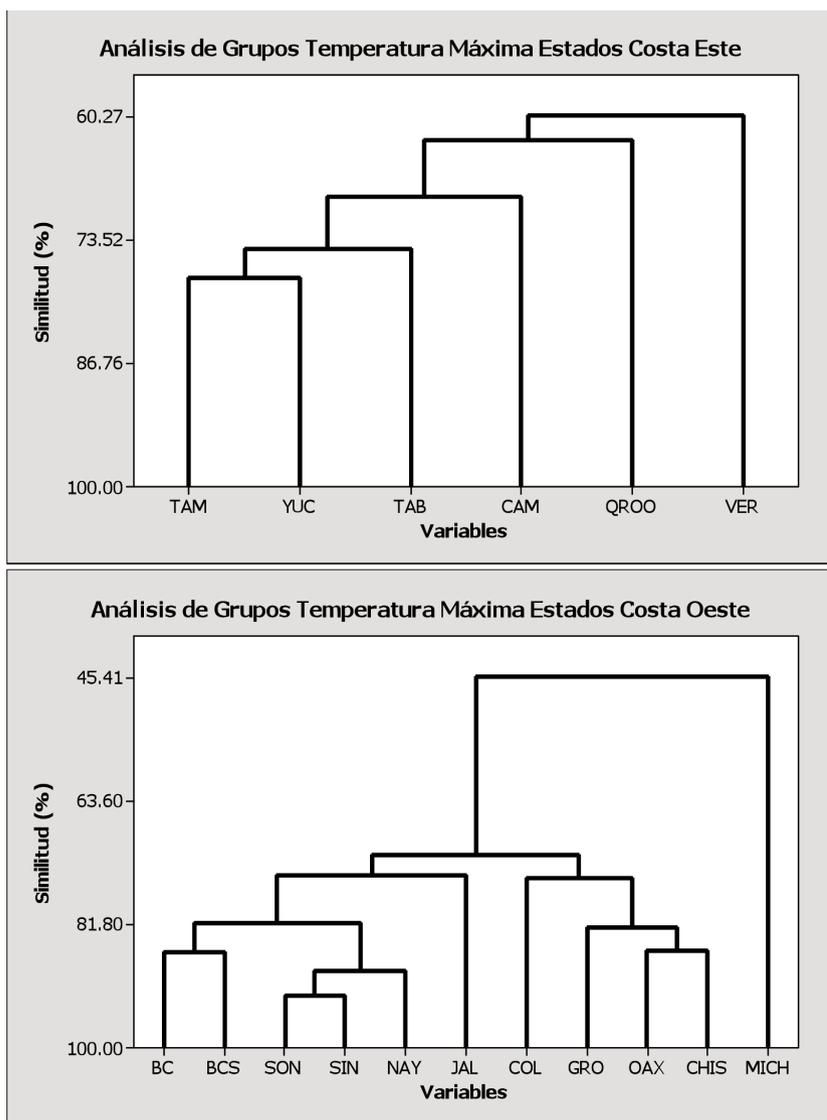
Con el fin de eliminar las señales de corto plazo, los registros fueron filtrados con un doble suavizado, considerando 60 valores. El análisis individual de estas series y su suavizado de largo plazo (5 años) muestra un comportamiento cíclico diferente para las costas este y oeste de México.

En general para la costa oeste, se observan estructuras crecientes con periodos mayores a la longitud del registro, a excepción del estado de Michoacán donde se observa una estructura en gran parte del registro decreciente. Sobresale la estructura semi-sinusoidal (altura de la onda) de los estados de Sonora y Jalisco con una extensión aproximada de 20 años (figura 4).

Por su parte los estados de la costa este, con excepción de Tamaulipas, presentan estructuras sinusoidales más marcadas. Es interesante observar el comportamiento de los estados de Campeche, Tabasco y Veracruz, donde se observa una onda con un periodo de 20 años, la cual presenta un desfase casi perfecto entre los estados de Campeche y Veracruz, sugiriendo un movimiento en sentido sur-norte de esta onda de calor (figura 5).

Para todos los estados costeros de México se identificaron los meses que experimentaron la mayor temperatura máxima a lo largo del registro 1971-2009 y se estableció la década en la cual ocurrían dichos valores, el resultado de este análisis se presenta en la siguiente gráfica (figura 6). Se aprecia claramente que más del 50% de los meses más cálidos (56.3%) han ocurrido en la última década.

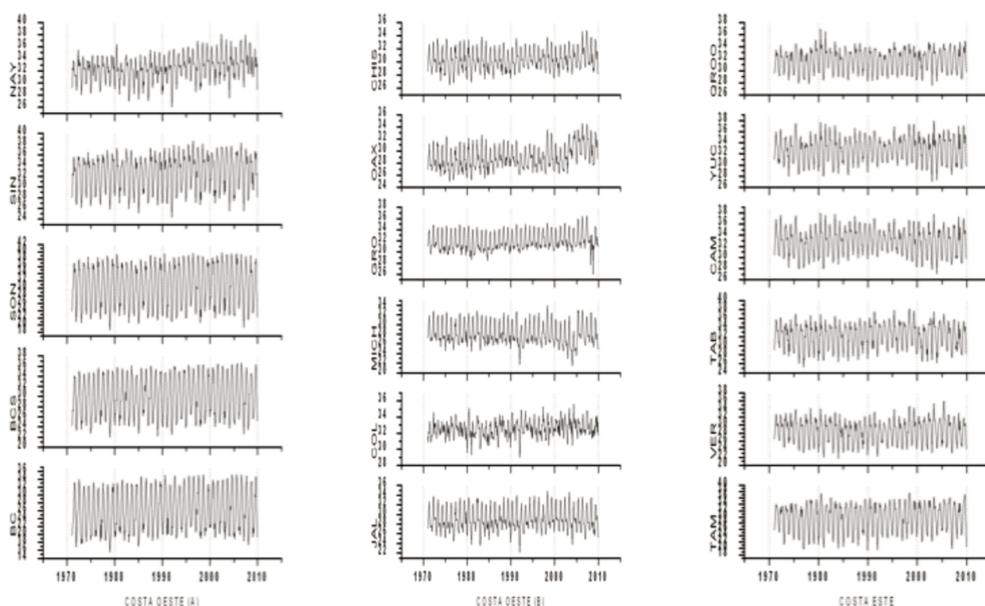
Al promediar los valores de la temperatura máxima mensual por década, se observa en general un mayor incremento en las temperaturas de los estados de la costa oeste (con excepción de Michoacán) que en los correspondientes al Golfo de México y Mar Caribe (tabla 2).



**Figura 2.** Análisis de grupos para la temperatura máxima en los estados de la costa este (superior) y la costa oeste (inferior).

La diferencia de temperaturas promedio entre el periodo de 2001 a 2009 respecto al de 1971 a 1980, muestra valores extremos de 2.15°C en Oaxaca, 1.58°C en Baja California y 1.36°C en Nayarit. Para la costa este, Veracruz, Campeche y Yucatán prácticamente no presentan ninguna diferencia.

Cuando se analizan los valores promedio anuales, se observa en primer lugar que los estados costeros presentan temperaturas 2 o 3 °C superiores al conjunto de todos los estados de la República Mexicana, teniendo la costa este temperaturas promedio mayores. En la figura 7 se



**Figura 3.** Series temporales de la temperatura máxima mensual de los estados costeros de México durante el periodo 1971-2009. Columna izquierda y central: estados de la costa oeste. Columna derecha: estados de la costa este. Elaboración propia a partir de información de SMN-Conagua, 2010.

presentan los valores promedio anuales y como referencia el promedio general para cada costa durante el periodo 1971-1990.

A partir del año 1992, donde se observa un marcado descenso en las temperaturas máximas en ambas costas, se puede observar un incremento gradual de la temperatura, el cual se manifiesta de manera más marcada en la costa oeste del país.

Si bien la figura 7 muestra como referencia el promedio de temperaturas del periodo 1971 a 1990, el incremento en las temperaturas de la costa oeste es significativo, incluso cuando el valor de referencia es el promedio de todo el periodo de estudio (1971-2009). Las figuras 8 y 9, muestran las anomalías de temperatura de ambas costas respecto a dicho valor promedio (1971-2009), junto con el modelo de regresión lineal correspondiente.

Para la costa Oeste, después de una relativa estabilidad de las temperaturas entre los años 1986 y 1991, y una disminución relativamente importante de las mismas generalizada (ambas costas y a nivel nacional) en el año 1992, se observa un calentamiento generalizado hasta el año 2009.

Para ambas costas a partir del año 1992, las temperaturas anuales han estado mayoritariamente por arriba del promedio de temperaturas registrado entre 1971 y 1990.

Cuando se realiza el análisis a partir del promedio (1971-2009) de las temperaturas máximas promedio mensuales, se observa la clara influencia de las temperaturas superficiales oceánicas.

### Estados del Pacífico y Mar de Cortés

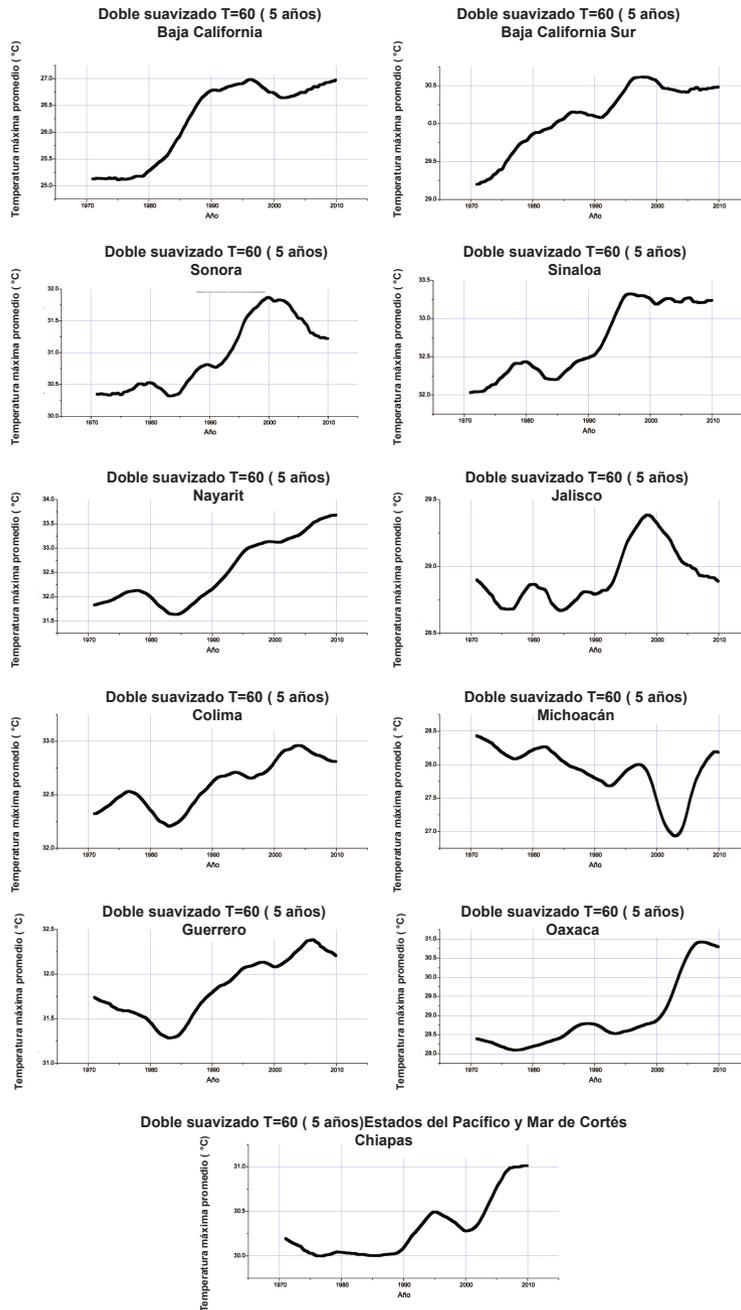
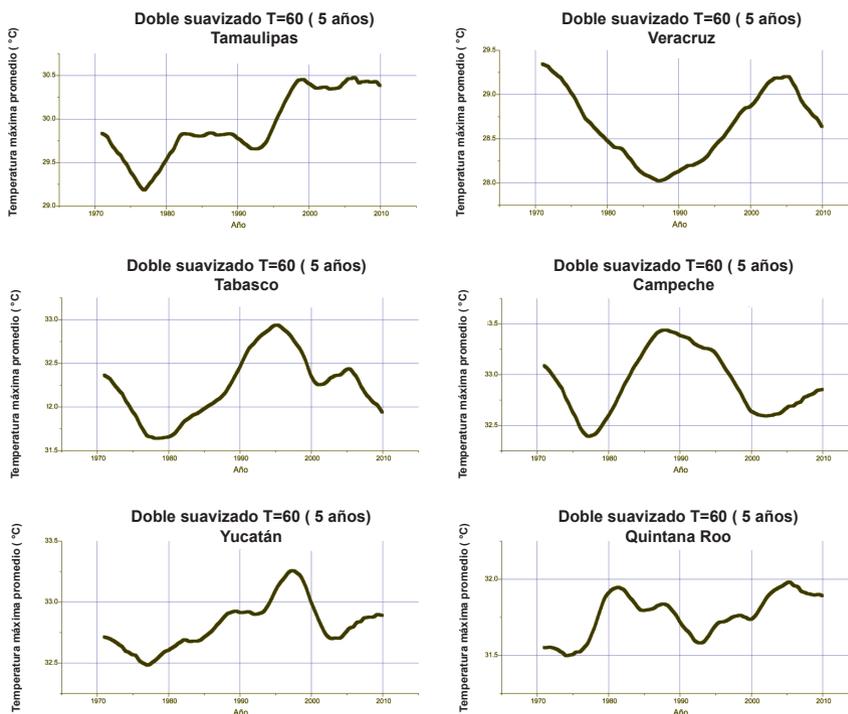
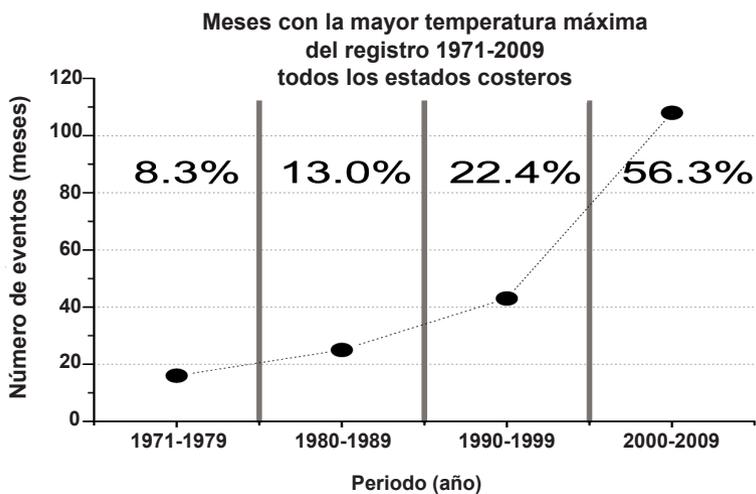


Figura 4. Doble suavizado de las series de tiempo de los estados de la costa oeste ( $T=60$ ).

**Estados del Golfo de México y Mar Caribe**



**Figura 5.** Doble suavizado de las series de tiempo de los estados de la costa oeste T=60.



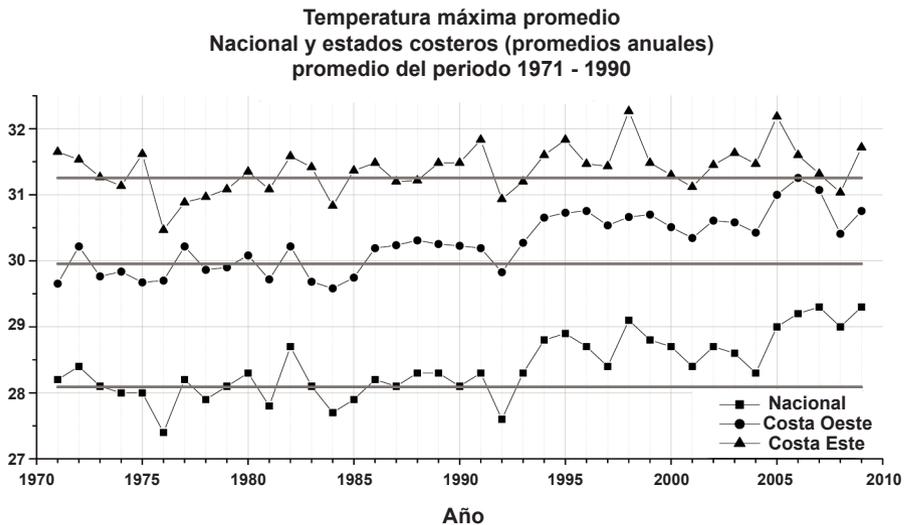
**Figura 6.** Distribución por década de los meses más cálidos del registro en todos los estados costeros.

**Tabla 2.** Valores promedio por década de las temperaturas máximas promedio mensuales ( °C)

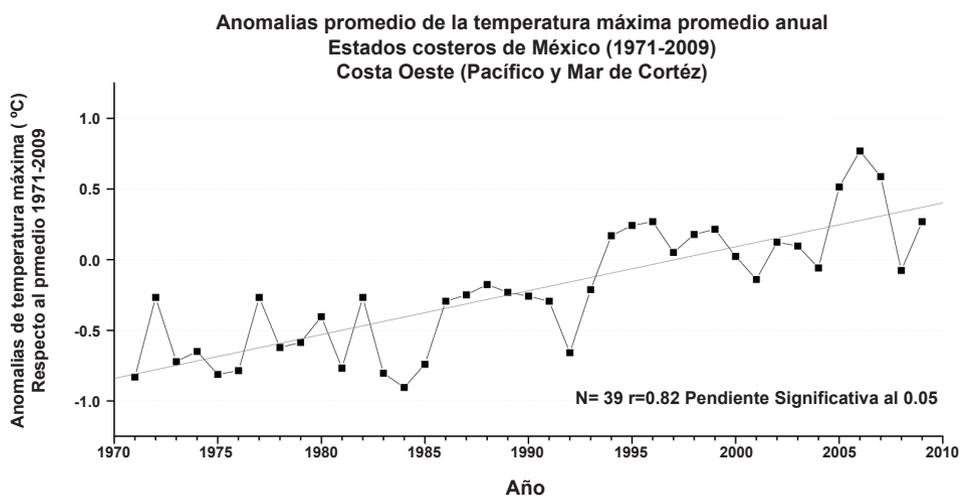
Estados costa este											
Periodo	BC	BCS	SON	SIN	NAY	JAL	COL	MICH	GRO	OAX	CHIS
71 a 80	25.17	29.55	30.48	32.27	32.05	28.80	32.44	28.21	31.61	28.19	30.05
81 a 90	26.21	30.06	30.55	32.33	31.78	28.74	32.36	29.06	31.46	28.62	29.97
91 a 00	26.82	30.45	31.37	33.06	32.89	29.18	32.69	27.85	32.03	28.63	30.42
01 a 09	26.75	30.39	31.47	33.22	33.41	29.00	32.92	27.39	32.28	30.35	30.75
Dif. 71-80 con 01-09	1.58	0.84	0.99	0.95	1.36	0.19	0.48	-0.82	0.67	2.15	0.70

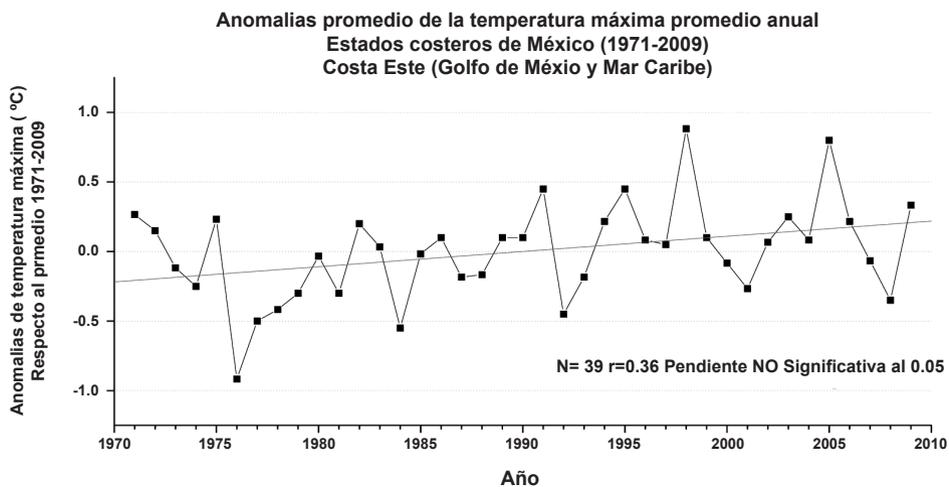
Estados costa oeste						
Periodo	TAM	VER	TAB	CAM	YUC	QROO
71 a 80	29.49	28.91	31.89	32.65	32.59	31.65
81 a 90	29.86	28.15	32.04	33.23	32.79	31.82
91 a 00	30.04	28.51	32.79	33.05	33.14	31.64
01 a 09	30.36	29.00	32.23	32.72	32.74	31.96
Dif. 71-80 con 01-09	0.87	0.09	0.34	0.08	0.16	0.32



**Figura 7.** Valores promedio anuales de la temperatura máxima mensual. Se presenta el promedio durante el periodo 1971-1990.



**Figura 8.** Anomalía de la temperatura máxima promedio anual para la costa oeste respecto al promedio 1971-2009.



**Figura 9.** Anomalía de la temperatura máxima promedio anual para la costa este respecto al promedio 1971-2009.

Para la costa oeste se presenta una evolución ascendente (de los estados del sur hacia los del norte) de las temperaturas máximas mensuales, iniciando en Chiapas en el mes de abril (en promedio el mes más cálido del año, considerando todo el registro de observaciones) y concluyendo en Baja California en el mes de agosto (tabla 3).

La variabilidad de temperaturas máximas mensuales mostradas por los estados que limitan con el Golfo de California (*i.e.* Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa) con valores de la desviación estándar entre 3.1 y 5.6 °C, es la mayor de todo el país.

En contraste, los estados del Pacífico Sur (*i.e.* Guerrero, Oaxaca y Chiapas), presentan una variabilidad muy similar, con valores de la desviación estándar entre 1.4 y 1.5 °C, este elemento también será una evidencia de la influencia de las temperaturas superficiales oceánicas.

En el caso de la costa este, los estados presentan una distribución mensual de temperatura más uniforme, presentándose las mayores temperaturas en el mes de mayo, salvo en el estado costero más norteño de la región del Golfo de México (Tamaulipas), cuyo máximo se alcanza hasta junio (tabla 4).

Esta “onda” de calor que se va desplazando de manera marcada en los estados de la costa oeste en sentido sur-norte entre los meses de abril y agosto, en conjunto con la homogeneidad temporal de la distribución de los meses de calor máximo en la costa este, mas el desfase temporal mostrado por el estado de Tamaulipas, ponen de manifiesto la clara influencia de las temperaturas superficiales oceánicas sobre los estados costeros.

El comportamiento mensual de la temperatura superficial del océano (promedio 1970-2000) se presenta en la figura 10, iniciando en la esquina superior izquierda por enero y concluyendo en la esquina inferior derecha por diciembre.

**Tabla 3.** Valores promedio (1971-2009) de las temperaturas máximas promedio mensuales registradas en los estados costeros. Se remarca la mayor temperatura máxima mensual registrada a lo largo de los diferentes meses del año en cada estado costero.

Se presentan los estados de la costa oeste.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
BC	19.86	20.76	22.14	24.43	26.95	30.57	33.11	33.36	31.86	27.85	23.64	20.13
BCS	24.45	25.62	27.12	29.18	30.89	33.41	35.10	35.32	34.39	32.12	28.47	25.18
SON	22.97	24.78	27.42	30.95	34.66	38.27	37.20	36.24	35.63	32.51	27.55	23.26
SIN	27.81	29.19	30.98	33.44	35.57	36.76	35.53	34.93	34.60	34.01	31.39	28.27
NAY	29.56	30.70	32.26	33.97	35.32	34.77	33.00	32.88	32.74	32.93	31.95	30.03
JAL	26.05	27.68	29.94	31.88	32.94	31.09	28.58	28.49	28.28	28.37	27.62	26.22
COL	31.44	32.13	32.53	33.39	34.00	33.47	32.73	32.73	32.13	32.36	32.42	31.77
MICH	25.73	27.13	29.30	31.14	31.65	29.30	27.14	27.04	26.81	26.99	26.68	25.78
GRO	30.83	31.85	32.34	34.33	34.34	31.47	31.12	30.99	29.76	30.80	31.09	30.78
OAX	27.09	28.16	30.16	31.45	31.48	29.53	28.76	28.92	28.39	28.10	27.75	27.14
CHIS	28.69	29.74	31.55	32.66	32.51	30.76	30.41	30.44	29.92	29.35	28.97	28.43

**Tabla 4.** Valores promedio (1971-2009) de las temperaturas máximas promedio mensuales registradas en los estados costeros. Se remarca la mayor temperatura máxima mensual registrada a lo largo de los diferentes meses del año en cada estado costero.

Se presentan los estados de la costa este.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TAM	29.93	24.53	26.06	28.43	30.39	31.62	31.09	30.07	29.97	29.15	28.13	26.52
VER	24.45	25.78	28.70	31.01	32.44	31.35	30.16	30.30	29.64	28.37	26.63	24.79
TAB	28.38	29.52	32.54	34.50	35.70	34.55	34.06	33.97	33.23	31.63	30.18	28.61
CAM	29.83	31.18	33.51	35.38	36.19	34.68	34.07	33.97	33.32	32.14	30.93	29.83
YUC	29.83	31.03	33.17	34.86	35.84	34.61	34.07	34.14	33.50	32.11	30.84	29.79
QROO	29.16	30.09	31.55	32.92	33.82	33.06	33.06	33.34	32.84	31.65	30.36	29.31

La influencia de las temperaturas superficiales del océano sobre las temperaturas de los estados costeros se verificó a partir del análisis de las matrices de correlación entre las anomalías de temperaturas máximas (respecto al periodo 1971-2009 para los estados costeros) como de la superficie oceánica. Adicionalmente se consideraron en este análisis fenómenos de gran escala como las oscilaciones de décadas tanto de Pacífico (PDO) (figura 11) como del Atlántico (AMO) (figura 12), a través de sus respectivos índices (ver tablas 5 y 6).

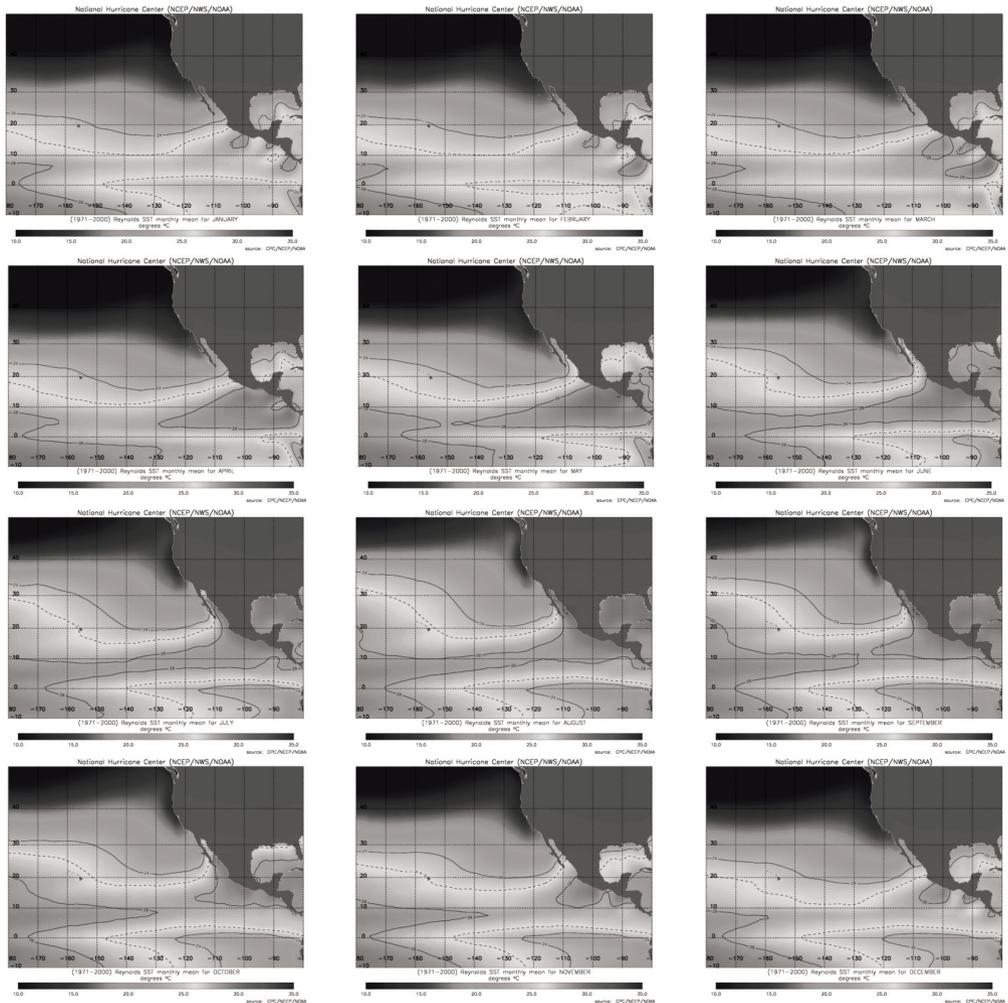
El clima de muchas partes del mundo está dominado por un número pequeño de centros de presión (alta y baja) relativamente permanentes en el hemisferio Norte y Sur, por ejemplo: las Aleutianas, Asia, Pacífico, Islandia, las Azores, etc., que permiten calcular índices para establecer patrones climáticos de la atmósfera y el océano a gran escala (Barange, 2002).

La oscilación del Atlántico Norte es una alteración de gran escala de la masa atmosférica, con periodos de recurrencia de aproximadamente 10 años, siendo la principal fuente de variabilidad climática del Hemisferio Norte. Dicho fenómeno puede ser discernible a partir de la observación de las variaciones en la presión atmosférica a nivel del mar en esta región del planeta (Hurrell, 1995; Barange, 2002).

La oscilación de décadas del Pacífico (PDO), presenta ciclos de 20 a 30 años y es la responsable de los procesos de interacción océano-atmósfera del Pacífico Central y Norte. Este fenómeno tiene un comportamiento similar al de “El Niño”, pero en el caso del primero con periodos mucho mayores. Las fases cálidas del PDO se caracterizan por la existencia de temperaturas anormalmente frías en la región central del Pacífico Norte y temperaturas inusualmente cálidas en la costa oeste del continente americano. Solamente se han podido registrar dos ciclos completos desde 1890 (Mantua *et al.*, 1997; Hare y Mantua, 2000; Mantua y Hare, 2002; Barange, 2002).

Para los estados de la costa este, la AMO resulta particularmente significativa para Tamaulipas y Quintana Roo y se correlaciona de manera moderada con los promedios anuales de las temperaturas máximas de los estados costeros (ver tabla 5 y figuras 13 y 14).

Los estados de la costa oeste muestran correlaciones más significativas con la temperatura superficial del mar (TSS) que con el índice de la oscilación del Pacífico Norte (PDO). Sobre-

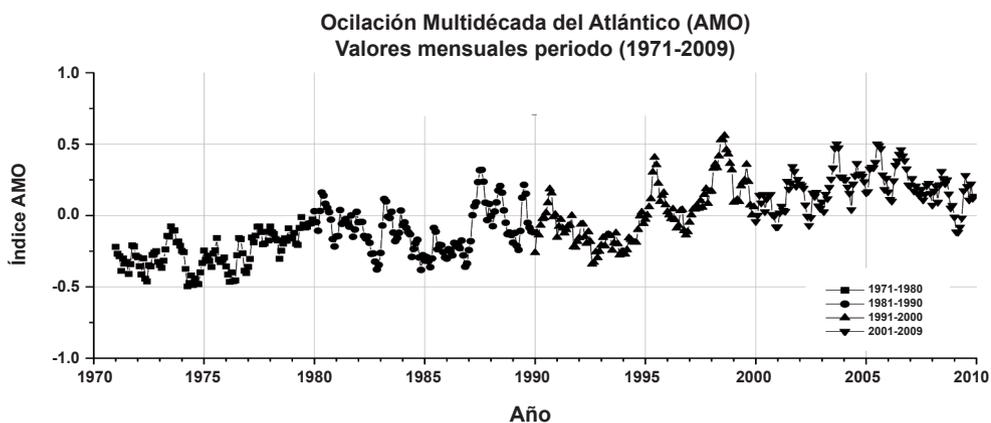


**Figura 10.** Representación mensual de la temperatura superficial del océano para el periodo 1970-2000. Fuente de las imágenes: <http://www.nhc.noaa.gov/aboutst.shtml>.

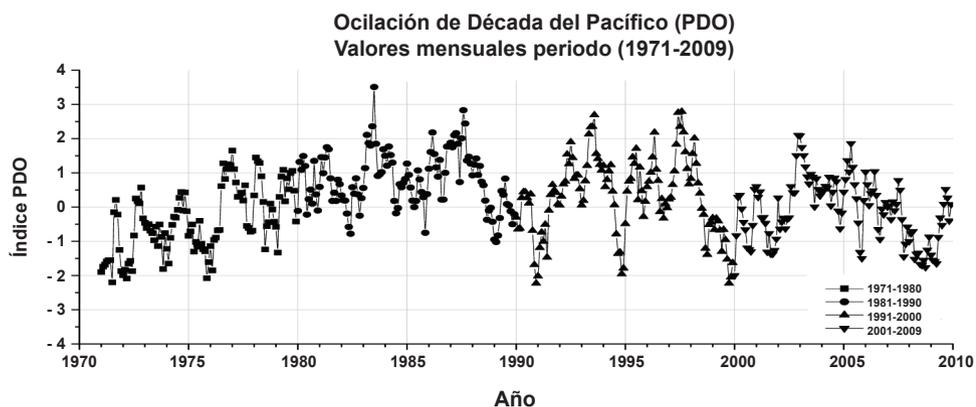
salen los valores de los estados de Nayarit, Baja California Sur y Sinaloa (ver tabla 6 y figuras 15 y 16).

Como complemento a estos datos, se realizó el análisis del comportamiento por mes (a lo largo de todo el registro 1971-2009) para todos los estados costeros. Se ajustó un modelo de regresión lineal y se evaluaron los casos (meses) en los cuales la pendiente era significativa con un 95% de confianza. Los resultados se presentan en la siguiente tabla (tabla 7).

La tabla 7 muestra que en el caso de Nayarit y Oaxaca todos los meses del año del registro presentaron una tendencia creciente (aumento de temperatura) significativa, para el caso de la costa oeste, dichos estados son seguidos por Baja California (9 meses con aumento significativo) y Chiapas (8 meses); en el caso de Michoacán se presentaron 4 meses con pendientes



**Figura 11.** Índice anual de la Anomalía del Atlántico Norte (AMO).  
(Fuente de los datos: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>).



**Figura 12.** Índice anual de la Anomalía del Pacífico (PDO).  
(Fuente de los datos: <http://jisao.washington.edu/pdo/>).

significativas decrecientes (disminución de temperatura), siendo el único estado costero que presentó este comportamiento.

En el caso de la costa este, Campeche y Tabasco no presentaron ningún mes con aumento estadísticamente significativo de la temperatura y los que mayor número de meses presentaron fueron: Quintana Roo, Tamaulipas y Yucatán con 3 meses cada uno.

Las siguientes figuras muestran el comportamiento particular de algunos estados costeros y los meses en los cuales las temperaturas presentaron las pendientes más significativas.

**Tabla 5.** Matriz de correlación entre las temperaturas máximas promedio anuales de los estados de la costa este, la anomalía multidécada del Atlántico (AMO) y la temperatura superficial del mar (TSS).

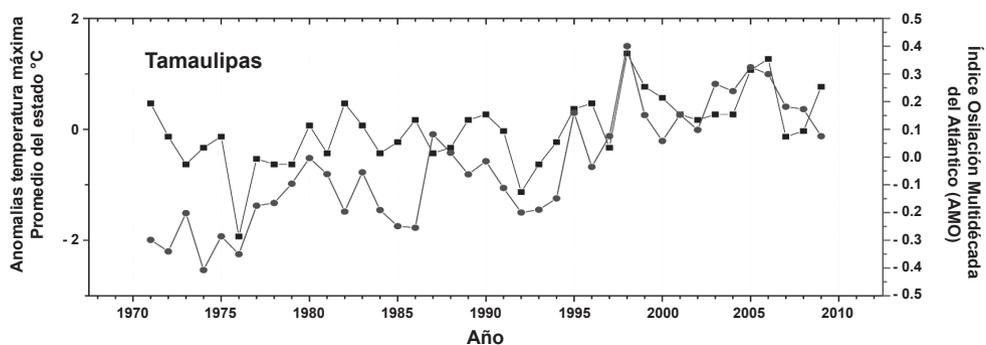
	TAM	VER	TAB	CAM	YUC	QROO	AMO	TSS
TAM	1.00	0.53	0.47	0.20	0.55	0.30	0.64	0.58
VER	0.53	1.00	0.40	-0.17	0.15	0.12	0.24	0.16
TAB	0.47	0.40	1.00	0.46	0.51	0.15	0.25	0.33
CAM	0.20	-0.17	0.46	1.00	0.47	0.29	-0.09	0.02
YUC	0.55	0.15	0.51	0.47	1.00	0.29	0.36	0.31
QROO	0.30	0.12	0.15	0.29	0.29	1.00	0.45	0.42
AMO	0.64	0.24	0.25	-0.09	-0.09	0.45	1.00	0.91
TSS	0.58	0.16	0.33	0.02	0.02	0.42	0.91	1.00

**Tabla 6.** Matriz de correlación entre las temperaturas máximas promedio anuales de los estados de la costa este, el índice de la oscilación del Pacífico Norte (PDO) y la temperatura superficial del mar (TSS).

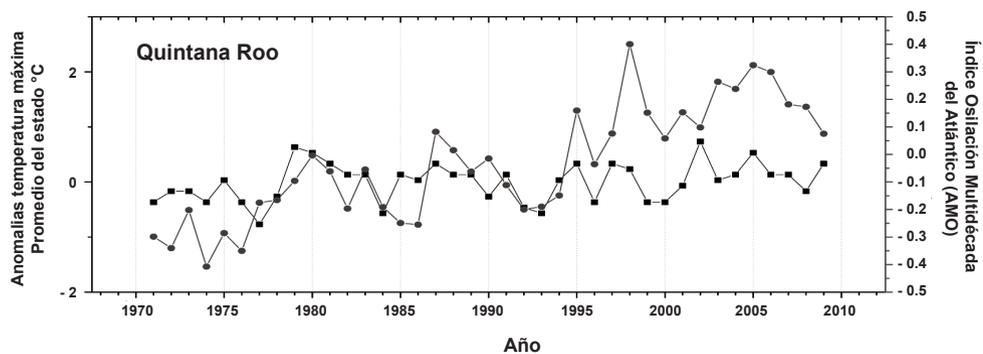
	BC	BCS	SON	SIN	NAY	JAL	COL	MICH	GRO	OAX	CHIS	PDO	TSS
BC	1.00	0.72	0.61	0.54	0.53	0.18	0.32	-0.31	0.42	0.38	0.29	0.18	0.65
BCS	0.72	1.00	0.73	0.78	0.61	0.42	0.37	-0.15	0.41	0.38	0.39	0.36	0.70
SON	0.61	0.73	1.00	0.85	0.71	0.63	0.41	-0.21	0.49	0.39	0.25	-0.02	0.67
SIN	0.54	0.78	0.85	1.00	0.83	0.65	0.42	-0.04	0.61	0.46	0.53	0.07	0.69
NAY	0.53	0.61	0.71	0.83	1.00	0.59	0.55	-0.08	0.70	0.63	0.71	-0.23	0.71
JAL	0.18	0.42	0.63	0.5	0.59	1.00	0.30	0.22	0.39	0.26	0.28	0.24	0.45
COL	0.32	0.37	0.41	0.42	0.55	0.30	1.00	-0.32	0.61	0.45	0.44	0.04	0.50
MICH	-0.31	-0.15	-0.21	-0.04	-0.08	0.22	-0.32	1.00	0.02	-0.08	0.03	-0.16	-0.32
GRO	0.42	0.41	0.49	0.61	0.70	0.39	0.61	0.02	1.00	0.59	0.71	0.01	0.60
OAX	0.38	0.38	0.39	0.46	0.63	0.26	0.45	-0.08	0.59	1.00	0.71	-0.11	0.66
CHIS	0.29	0.39	0.25	0.53	0.71	0.28	0.44	0.03	0.71	0.71	1.00	0.02	0.60
PDO	0.18	0.36	-0.02	0.07	-0.23	-0.24	-0.04	-0.16	0.01	-0.11	0.02	1.00	0.16
TSS	0.65	0.70	0.67	0.69	0.71	0.45	0.50	-0.32	0.60	0.66	0.60	0.16	1.00

La Oscilación del Sur “El Niño” (ENSO) es una alteración global del sistema océano-atmósfera en la cual la atmósfera responde a las anomalías de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Ecuatorial e impacta a todo el planeta (Alexander *et al.*, 2002).

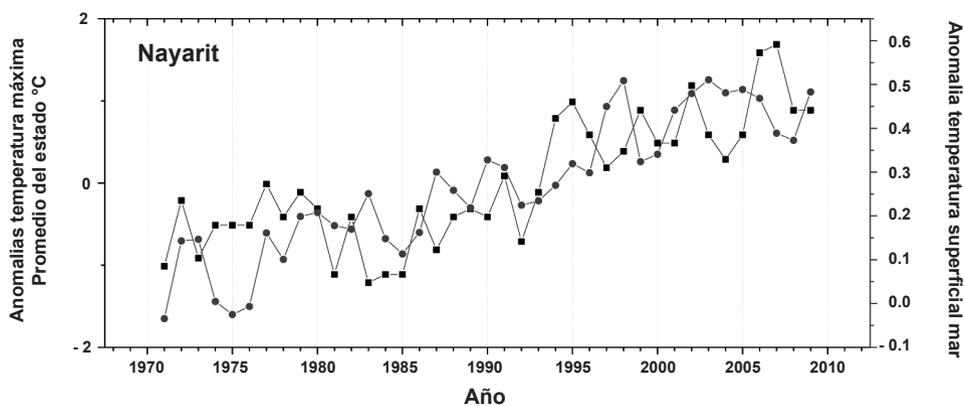
Estos eventos, se caracterizan por un movimiento a gran escala de aguas cálidas del Pacífico ecuatorial en dirección oeste-este, misma que produce una alteración episódica (cuasi-decadal) de los patrones de circulación de los vientos, temperaturas y precipitación, alterando de manera significativa la climatología del Pacífico tropical y gran parte de la costa oeste del continente



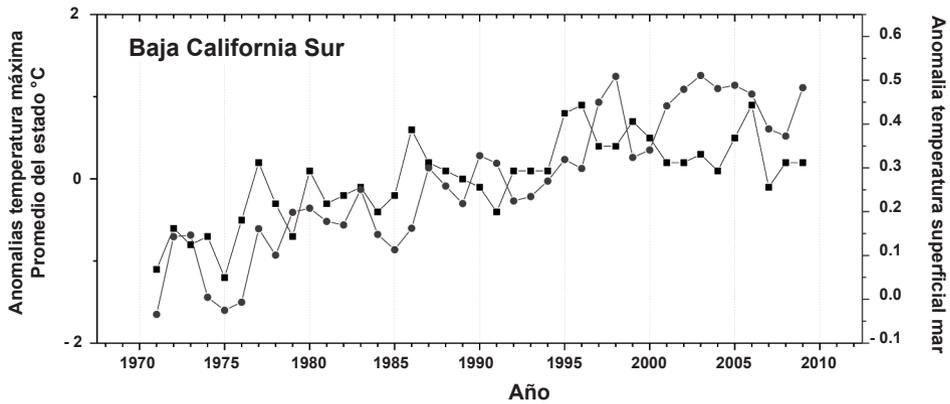
**Figura 13.** Anomalía de temperaturas e índice de la oscilación multidécada del Atlántico (AMO) para el estado de Tamaulipas.



**Figura 14.** Anomalía de temperaturas e índice de la oscilación multidécada del Atlántico (AMO) para el estado de Quintana Roo.



**Figura 15.** Anomalía de temperaturas atmosféricas y anomalía de temperatura superficial del mar (TSS) para el estado de Nayarit.



**Figura 16.** Anomalía de temperaturas atmosféricas y anomalía de temperatura superficial del mar (TSS) para el estado de Baja California Sur.

Americano (Gershunov y Barnett, 1998; Knauss, 2005) y también de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte (Smith *et al.*, 2007).

El Índice Oceánico de “El Niño” (ONI) se define como las anomalías respecto a un nivel de referencia, del promedio corrido trimestral de la temperatura superficial del océano en la región 3.4 del Pacífico (Smith *et al.*, 2008), y ha sido empleado para determinar las condiciones “El Niño” y “La Niña”. La NOAA establece que cuando el ONI, durante 5 meses consecutivos, tenga valores por arriba de 0.5, se está en una condición “El Niño” y cuando dicho valor sea inferior a -0.5 se tiene una condición “La Niña” (NOAA-NCPE, 2010).

La figura 18 muestra la clara relación entre los valores del Índice Oceánico de “El Niño” y las anomalías de la temperatura superficial del mar.

Se aprecia en general una clara correspondencia entre los valores elevados del Índice del Niño y los picos máximos en las temperaturas superficiales del mar, particularmente para los años 1973, 1983, 1988 y 1998, con sus correspondientes disminuciones durante los periodos “La Niña”. Adicionalmente, el comportamiento del Índice del Niño a finales del 2009 permite pronosticar temperaturas elevadas del océano para los años 2010 y 2011.

En virtud de la aparente relación que guardan las temperaturas de los estados costeros con la temperatura superficial del mar, se decidió investigar el comportamiento de estas variables en conjunto con el Índice Oceánico de “El Niño”. La figura 19 muestran dichos resultados.

Sin poder establecer un patrón general claro, se observa que por lo regular a un máximo del Índice de “El Niño”, le sigue un incremento en las temperaturas de los estados costeros, con un desfase aproximado de 5-6 meses. También se observa el impacto del niño 1997-1998 en las temperaturas de ambas costas.

**Tabla 7.** Valores de significancia de la pendiente de los modelos de regresión lineal para cada mes durante 1971 - 2009.

Estadística	Estado	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM	No. de meses significativos
tealc	BC	2.42	NS	2.95	2.23	4.41	NS	2.38	5.33	4.81	2.50	3.04	NS	6.71	9
Pvalue		0.021		0.005	0.032	0.000		0.022	0.000	0.000	0.017	0.004		0.000	7
tealc	BCS	NS	NS	2.54	NS	5.05	3.27	3.17	5.33	2.60	NS	3.21	NS	6.36	7
Pvalue				0.015		0.000	0.002	0.003	0.000	0.013		0.003		0.000	
tealc	CAM	NS	0												
Pvalue															
tealc	CHIS	3.55	5.49	NS	3.22	NS	2.45	2.41	4.35	2.62	NS	NS	2.75	4.67	8
Pvalue		0.001	0.000		0.003		0.019	0.021	0.000	0.013			0.009	0.000	
tealc	COL	NS	NS	NS	2.27	2.8	2.14	2.06	2.45	NS	NS	2.86	NS	3.37	6
Pvalue					0.029	0.006	0.039	0.046	0.019			0.007		0.002	
tealc	GRO	2.50	3.72	NS	NS	NS	NS	4.55	5.90	NS	NS	2.09	NS	3.90	5
Pvalue		0.017	0.001					0.000	0.000			0.044		0.000	
tealc	JAL	NS	2.96	NS	NS	NS	NS	2.35	1						
Pvalue									0.005					0.024	
tealc	MICH	NS	NS	-2.16	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-3.07	-2.78	-2.98	-2.18	4
Pvalue				0.037							0.004	0.008	0.005	0.036	
tealc	NAY	3.27	4.05	4.05	6.81	8.20	5.31	3.19	5.22	3.86	3.21	4.36	2.19	7.87	12
Pvalue		0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.035	0.000	
tealc	OAX	3.85	5.61	3.15	4.25	3.02	4.71	6.00	6.13	4.71	4.63	3.71	5.42	5.93	12
Pvalue		0.000	0.000	0.003	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	

**Tabla 7 (continuación).** Valores de significancia de la pendiente de los modelos de regresión lineal para cada mes durante 1971 - 2009.

Estadística	Estado	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM	No. de meses significativos
tcalc	QROO	NS	2.63	NS	NS	NS	NS	NS	3.08	4.36	NS	NS	NS	NS	3
Pvalue		0.012							0.004	0.000					
tcalc	SIN	NS	NS	NS	2.88	6.51	4.19	2.52	4.82	3.58	NS	3.16	NS	5.68	7
Pvalue				0.007	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.001		0.003		0.000	
tcalc	SON	NS	NS	2.26	2.23	5.80	3.78	NS	2.59	NS	NS	2.57	NS	5.23	6
Pvalue				0.030	0.032	0.000	0.001		0.014			0.014		0.000	
tcalc	TAB	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0
Pvalue															
tcalc	TAM	NS	2.43	NS	NS	NS	2.61	NS	3.06	NS	NS	NS	NS	3.78	3
Pvalue		0.020					0.013		0.004					0.001	
tcalc	VER	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	2.34	NS	NS	NS	NS	NS	1
Pvalue									0.025						
tcalc	YUC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	4.89	4.03	2.16	NS	NS	NS	3
Pvalue									0.000	0.000	0.037				

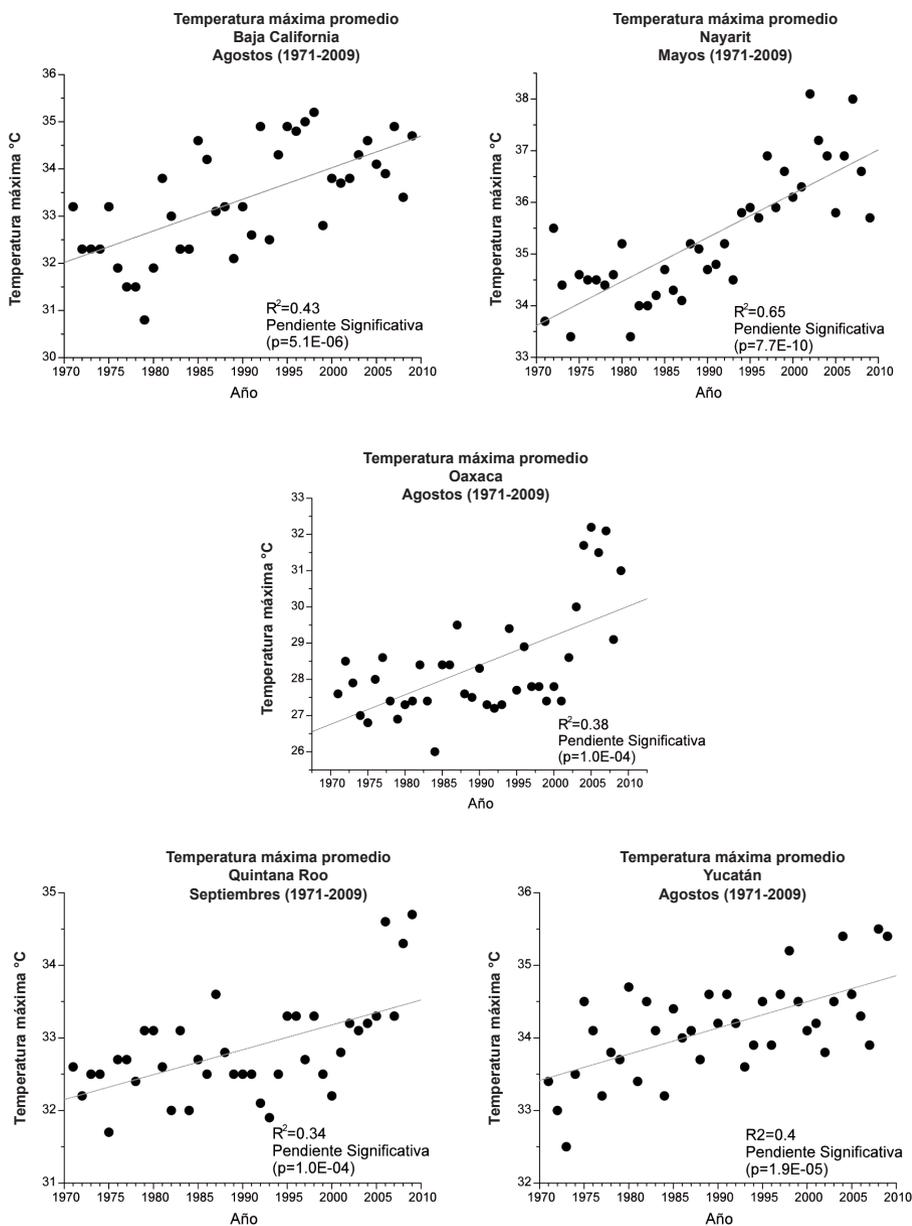
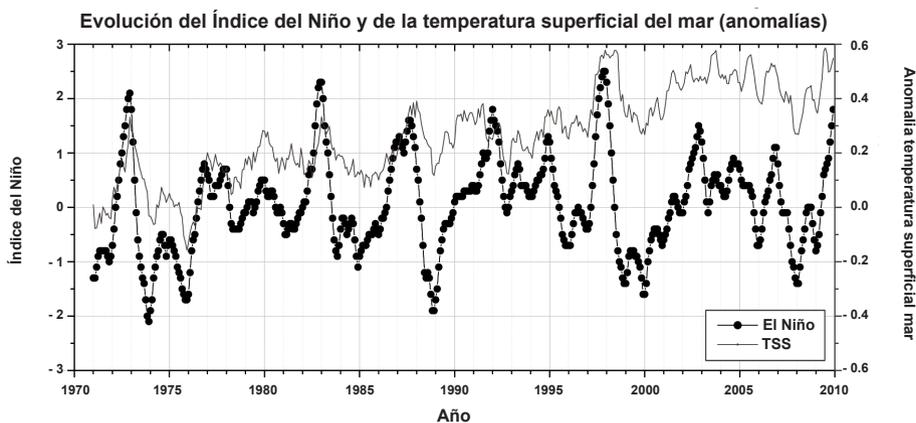


Figura 17. Estados costeros para los cuales la pendiente de la ecuación de regresión presentó los valores más altos de significancia al analizar los datos de la temperatura máxima promedio durante el periodo 1971-2009. Parte superior y centro: costa oeste. Parte inferior: costa este.

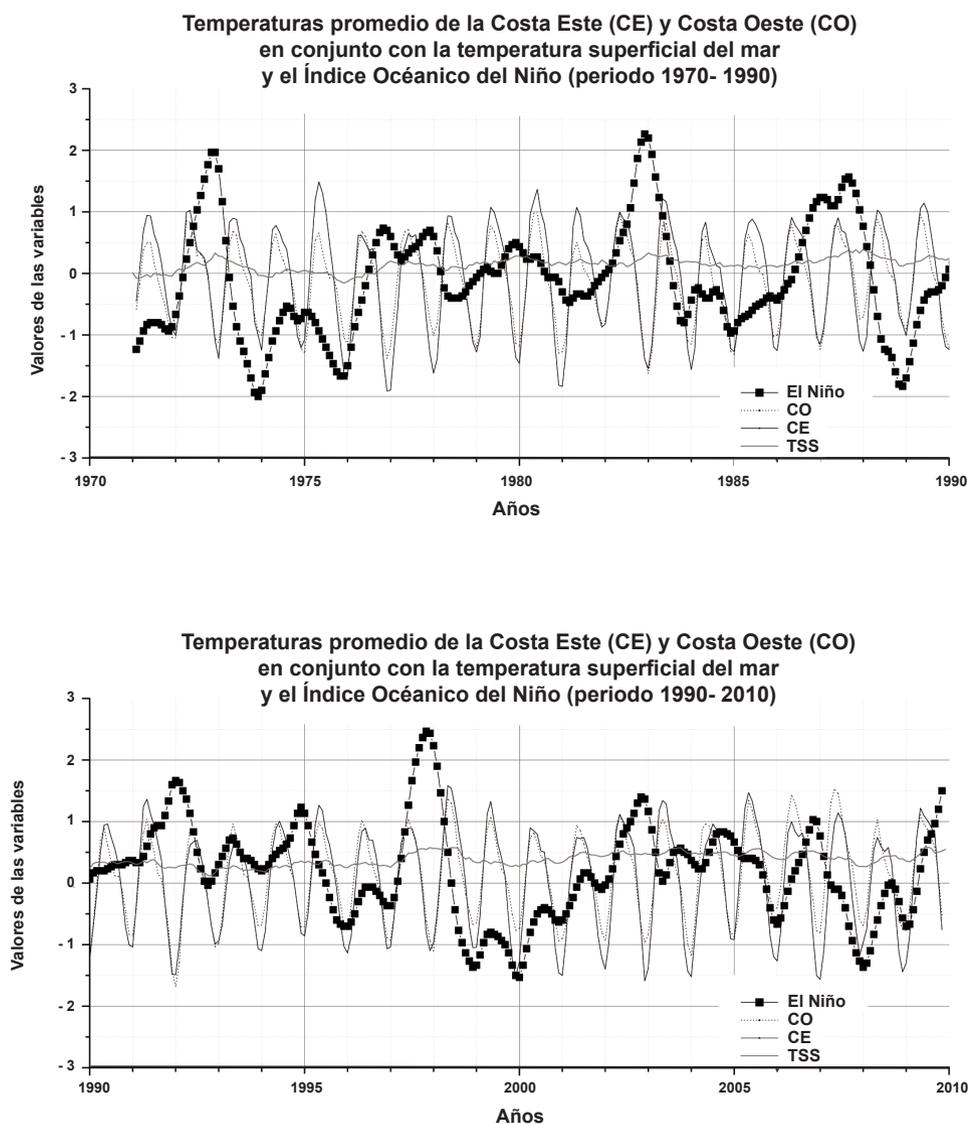


**Figura 18.** Evolución temporal del Índice de “El Niño” y de las anomalías de temperatura superficial del mar (TSS) para el hemisferio norte. (Fuente de la información: [http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml) y <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/anomalies/index.html#anomalies>).

## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES

El análisis realizado a los datos de las temperaturas máximas mensuales de los estados costeros de México durante el periodo 1971-2009, permite establecer las siguientes observaciones:

- a) Existen fenómenos de largo plazo (*i.e.* periodos mayores a 10 años) observables en el registro de temperatura de los estados costeros, los cuales modulan su climatología. Para la costa este es posible observar en algunos estados ondas de mayor frecuencia que para la costa oeste, donde las ondulaciones se presentaron en su fase creciente durante el periodo de análisis (con excepción del estado de Michoacán). (ver figuras 4 y 5).
- b) El 56% de los meses más cálidos de todo el registro, considerando todos los estados costeros han ocurrido en la década del 2000 al 2009. (ver figura 6).
- c) Existen diferencias de temperatura importantes desde el punto de vista ambiental entre los promedios por década principalmente para la costa oeste (ver tabla 2). Sin embargo, el análisis de varianza realizado no mostró que dichas diferencias fueran significativas al 95% de confianza.
- d) Los valores promedio anuales de las anomalías de temperatura máxima para los estados de la costa oeste, presentan una pendiente significativa creciente (ver figura 8). El incremento de temperatura máxima observado en el periodo 1971-2009 es ligeramente superior a 1 °C para esta región del país.
- e) Salvo en los estados de Campeche, Michoacán y Tabasco, todos los demás presentaron, cuando menos durante uno de los meses estudiados (a lo largo de todo el registro), un incremento significativo en su temperatura máxima (ver tabla 7). En el caso del estado



**Figura 19.** Comportamiento de las temperaturas promedio de la costa este (CE), costa oeste (CO), temperatura superficial del mar (TSS) e Índice de “El Niño”.  
 Figura superior: Años 1970-1990. Figura inferior: Años 1990-2010.

de Michoacán, los datos mostraron durante 4 meses tendencias significativas decrecientes (disminución de la temperatura máxima).

f) En los estados de Nayarit y Oaxaca, el análisis mensual durante todo el periodo del registro, mostró una pendiente significativa creciente, es decir un aumento de la temperatura en todos los meses, siendo los casos extremos: mayo para Nayarit, donde se registra un aumento mayor a los 3 °C y agosto para Oaxaca, donde dicho incremento es de 2.5 °C.

- g) Existe una clara correspondencia entre el comportamiento de la temperatura superficial del mar y la temperatura atmosférica de los estados costeros. Es posible observar para la costa oeste el desplazamiento en sentido sur-norte de la onda de calor (ver tablas 3, 4 y figura 10).
- h) Con excepción de Tabasco y Campeche, la Anomalía Multidécada del Atlántico presenta una mayor correlación con las temperaturas de los estados de la costa este que la temperatura superficial del mar (ver tabla 5).

El análisis realizado con los valores promedio anuales de la temperatura máxima mensual, permite concluir, por una parte, que existe evidencia estadística significativa de aumento en la temperatura de los estados costeros de la costa oeste y por la otra, en el caso de los estados de la costa este, si bien la tendencia de los datos es creciente, la pendiente de la misma no es significativa.

Cuando el análisis se realiza por mes, considerando todos los meses del registro, también se observa que en la mayoría de los estados costeros de la costa oeste, durante la mayoría de los meses, también existe una tendencia creciente significativa. Para esta región de la costa del país, los casos excepcionales se observan en los estados de Nayarit, Oaxaca (dónde todos los meses presentan tendencias crecientes significativas) y Michoacán (dónde los meses con pendientes significativas indicaron descenso de la temperatura máxima).

El análisis de los meses más cálidos por estado mostró una clara influencia de las temperaturas oceánicas sobre las atmosféricas en todos los estados costeros (tablas 3 y 4; figura 10).

Si bien la longitud del registro analizado no permite hacer conclusiones inequívocas sobre el impacto del cambio climático global sobre las temperaturas máximas de los estados costeros, la evidencia de correspondencia entre el comportamiento del promedio de la temperatura superficial del mar (la cual de acuerdo a los registros de largo plazo sí se encuentra en una fase creciente) y la temperatura atmosférica de dichos estados sugiere que en el mediano plazo este efecto podrá ser detectable.

## **RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN MARINA Y COSTERA**

- a) La gestión marina y costera, como un proceso de planeación estratégica de largo plazo, deberá migrar del uso de aproximaciones lineales, a visiones sistémicas de carácter variable, en las cuales se contemplen patrones oscilatorios de largo plazo (*i.e.* mayor de 5 años), con una posible componente ascendente en sus registros.
- b) Dada la evidente relación entre las temperaturas de la superficie oceánica y las temperaturas atmosféricas de los estados costeros, la gestión de estos espacios deberá tener una visión global de las interacciones océano/atmósfera, con un enfoque regional en lo que respecta a sus posibles impactos, como consecuencia del cambio climático global o bien, ante fenómenos episódicos con ocurrencia más frecuente (*i.e.* años) o anomalías periódicas de baja frecuencia (*e.g.* décadas).

- c) La gestión costera en México, deberá apoyar de manera decidida los procesos y políticas nacionales e internacionales que busquen mitigar los efectos del cambio climático, dado que los efectos potenciales en el ámbito regional, pueden ser superiores a los promedios establecidos a nivel global, con la consecuente potenciación de las consecuencias adversas.
- d) Se deben instrumentar de manera urgente estrategias para la obtención, análisis y distribución de datos, para contar con series de tiempo largas de variables relevantes para la gestión costera con amplia cobertura espacial.
- e) En los procesos de adaptación al cambio climático, los gestores marino/costeros y en general los tomadores de decisiones, deberán tener presente la variabilidad de largo plazo de las temperaturas oceánicas y atmosféricas, y su impacto sobre: los procesos productivos, los asentamientos humanos, la salud y seguridad de los pobladores, y sobre los procesos ecológicos y la diversidad biológica marina, costera y terrestre.

## LITERATURA CITADA

- Alexander, M.A., I. Bladé, M. Newman, J. Lanzante, N. Lau, y J. Scott, 2002. The Atmospheric Bridge: The influence of ENSO on air-sea interactions over the global oceans. *Journal of Climate*, 15: 2205-2231.
- Barange, M., 2002. Influence of climate variability and change on the structure, dynamics and exploitation of marine ecosystems. p. 57-82. *In: Hester, R.E. and R.M. Harrison (eds.) Global Environmental Change, Issues in Environmental Science and Technology* 17.
- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley, y A. Unnikrishnan, 2007. Observations: Oceanic climate change and sea level. *In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Caldeira, K., y M.E. Wicket, 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425: 365.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, 2007. Estrategia Nacional de Cambio Climático. México 2007. Semarnat, México, 158 p.
- Gershunov, A., y T.P. Barnett, 1998. Interdecadal modulations of ENSO teleconnections. *Bulletion of the American Meteorological Society*, 79(12): 2715-2725.
- Hare, S.R., y N.J. Mantua, 2000. Empirical evidence for North Pacific régime shift in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography*, 47( 2-4):,103-145.
- Hurrell, J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 267(5224): 676-679.
- Knauss, J.A., 2005. Introduction to Physical Oceanography. Waveland Press, Inc., 309 p.
- Levina, E., J.S. Jacob, L.E. Ramos, e I. Ortíz, 2007. Policy Frameworks for Adaptation to Climate Change in Coastal Zones: The Case of the Gulf of Mexico. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE/OECD), COM/ENV/EPOC/IEA/SLT(2007)2, 68 p.

- Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, y R.C. Fracis, 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts in salmon productio. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78: 1069-1079.
- Mantua, N.J., y S.R. Hare, 2002. The Pacific decadal oscillation. *Jour. Oceanography*, 58: 35-44.
- Martínez, J., A. Fernández, y P. Osnaya, 2004. Cambio Climático una Visión desde México. INE-Semarnat. 525 p.
- NOAA.NCPE, 2010. ENSO Cycle: Recent Evolution, Current Status and Predictions. Presentación Electrónica. [<http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>]
- Poder Ejecutivo Federal de México, Programa Especial de Cambio Climático 2008-2012. Poder Ejecutivo Federal de México. 96 p.
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden, P. Zhai, 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. *In*: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Twilley, R., 2007. Coastal Wetlands & Global Climate Change. Gulf Coast Wetlands Sustainability in a Climate Change. Report from the PEW Center on Climate Change, 18 p.
- Rivera-Arriaga, E., I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, y G.J. Villalobos Zapata (eds.), 2010. Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche.
- Sánchez-Montante, O., 2010. Elementos Oceánicos que impactan la hidrología costera. p. 23-32. 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.
- Smith, S.W., J. Brolley, J. O'Brien, y C.A. Tartaglione, 2007. ENSO's Impact on Regional US Hurricane Activity. *Journal of Climate*, 20: 1404-1440.
- SMN-Conagua (2010). Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). [[www.smn.cna.gob.mx](http://www.smn.cna.gob.mx)]
- Vázquez-Botello, A., S. Villanueva, J. Gutiérrez y J.L. Rojas-Gaviz, 2010. Vulnerabilidad de las Zonas Costeras Mexicanas ante el Cambio Climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Yañez-Arancibia, A., J.W. Day, R. Twilley, y R.H. Day, 2010. Manglares frente al cambio climático: ¿Tropicalización global del Golfo de México? p. 231-262. 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.
- Zachos, J.C., G. R. Dickens, y R. E. Zeebe, 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbón-cycle dynamics. *Nature*, 451: 279-283.



Arcos Espinosa, G., S.B. Jiménez Hernández, y R. Padilla-Hernández, 2010. Esgurrimiento medio anual y disponibilidad de agua en la vertiente del Golfo de México, p. 61-72. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Esgurrimiento medio anual y disponibilidad de agua en la vertiente del Golfo de México

*Gabriel Arcos Espinosa, Sergio B. Jiménez Hernández y Roberto Padilla-Hernández*

---

## RESUMEN

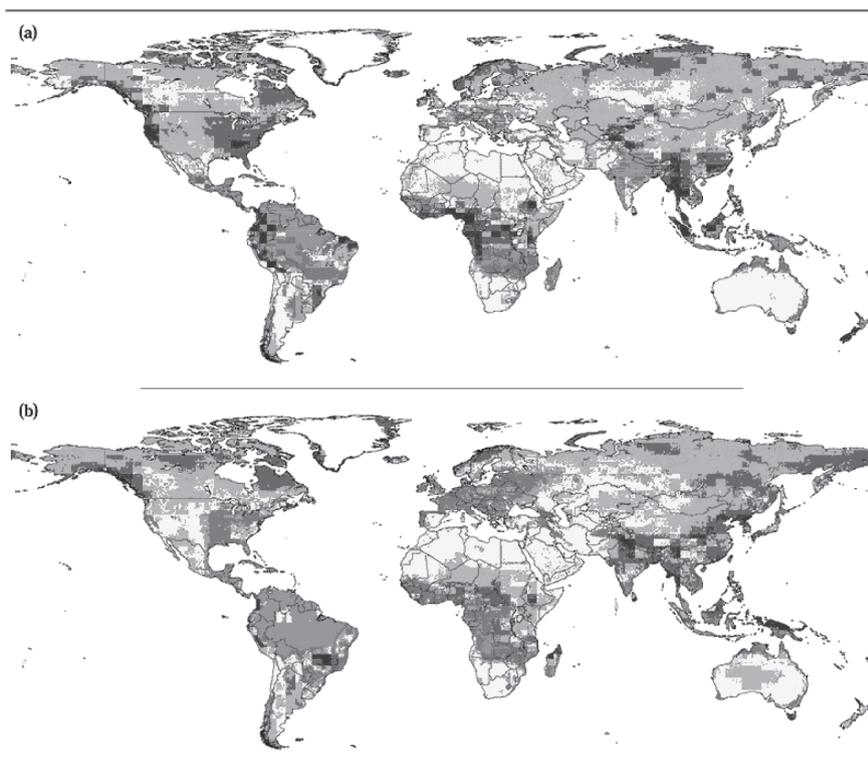
Estudios recientes sobre el cambio climático, confirman el impacto relevante al que se verán sometidos los recursos hídricos en gran parte del mundo. Esto en gran medida debido al aumento de las temperaturas del aire y de los océanos. La región del Golfo de México no escapa de estos acontecimientos. Con el apoyo de las regiones hidrológico-administrativas de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), este trabajo describe la situación que guardan los recursos hídricos en las desembocaduras de los ríos más importantes en el Golfo de México. Y se realiza una proyección de su situación a finales del siglo XXI con los resultados obtenidos por el IPCC (2008).

## INTRODUCCIÓN

Observaciones efectuadas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios climáticos globales. Esto se debe principalmente a la alteración tanto de las precipitaciones, como de las temperaturas a nivel mundial. El desarrollo regional también ha contribuido a la generación de estos cambios, esto obedece en gran medida al crecimiento poblacional, al uso de la tierra y a la urbanización.

Los posibles efectos del cambio climático constituyen una referencia obligada para cualquier análisis actual sobre los sistemas de recursos hídricos. Dichos recursos en las vertientes al Golfo de México no escapan de estas alteraciones y se han visto seriamente afectados por el cambio climático.

En el tercer informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2001), se presentan los cambios proyectados en los escurrimientos anuales para el año 2050, relativos al periodo 1961-1990 (mm/año), según las proyecciones de dos versiones del modelo acoplado océano-atmósfera del Hadley Centre, con un aumento anual del 1% de las concentraciones de CO<sub>2</sub> efectivo en la atmósfera: a) HadCM2 media del conjunto de simulaciones, y b) HadCM3 (figura 1).



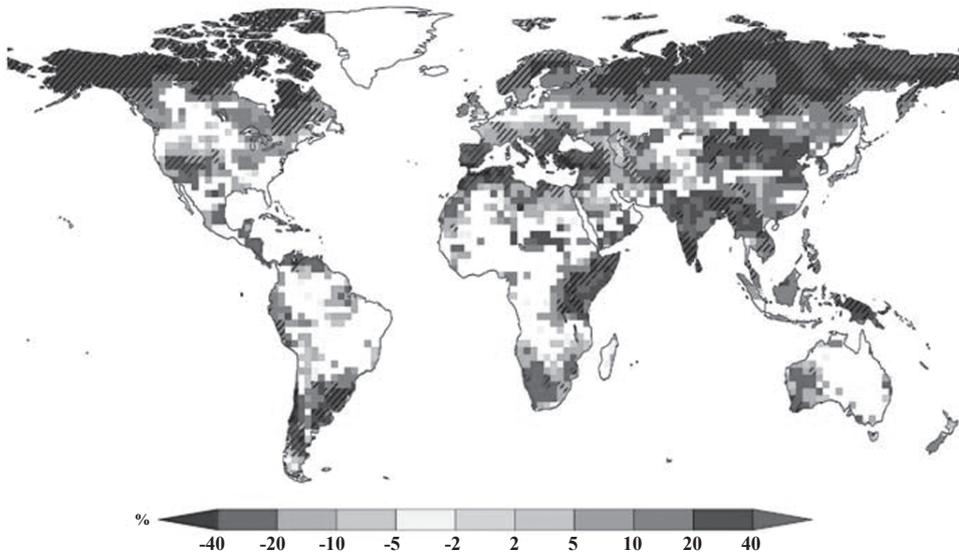
**Figura 1.** Cambios en las escurrimientos para el 2050 con referencia a las del 1961-1990 (mm/año). Tomada del IPCC (2001).

En esta figura se pueden observar los dos escenarios planteados por el IPCC (2001), donde toda la cuenca del Golfo de México se encuentra totalmente dentro del margen de reducción de escurrimientos. Para el segundo escenario que es el más crítico, las costas de Tamaulipas se ubican con una reducción de -50 a -25 mm/año hasta la península de Yucatán, donde estas hipótesis la sitúan con una reducción de -250 a -150 mm/año.

En el último informe presentado por el IPCC (2008), se confirma lo planteado en el cuarto informe (IPCC, 2007) relativo al cambio de las escurrientías del presente hasta a fines del siglo XXI (figura 2). Se pueden observar los cambios relativos de los escurrimientos anuales en gran escala (escurrientía de agua, en valores porcentuales para el período 2090-2099, respecto del período 1980-1999). Los valores representan la mediana de 12 modelos climáticos propuestos. Las áreas en blanco indican los lugares en que menos de un 66% de los doce modelos concuerdan en el signo del cambio, y las áreas estriadas, los lugares en que más de 90% de los modelos coinciden en el signo del cambio.

Este trabajo fue expresado en porcentaje con un grado de confianza alto (en torno a 8 sobre 10); lo que indica que para latitudes medias y trópicos secos los valores disminuirán entre 10% y 30% de aquí a fines del siglo XXI, debido a la disminución de las lluvias y a tasas de evapotranspiración más altas.

En relación a la vertiente del Golfo de México, como puede ser observado en la figura 2, esta se encuentra con valores de disminución de sus escurrientías. Por lo que toca al estado mexicano en esta vertiente que abarca desde la parte norte de Tamaulipas hasta el norte de Veracruz tendría una disminución de un 20% en sus valores de escurrimientos (región IX: Golfo Norte). Respecto al resto del estado de Veracruz este se vería afectado por un cambio del 2% (región



**Figura 2.** Cambio relativo de la escurrientía anual en gran escala. Tomada de IPCC (2008).

x: Golfo Centro). El estado de Tabasco y casi toda la península de Yucatán (Región XI: Frontera sur y la Región XII: Península de Yucatán) las escorrentías disminuirían un 20% según lo proyectado por el IPCC (2008).

## OBJETIVO

Con base en la información del caudal de los afluentes más importantes ubicados en la vertiente del Golfo de México, se identificará la situación que guardan en su desembocadura y posteriormente se planteará un posible escenario de estos recursos hídricos para finales del siglo XXI, según los criterios planteado por el IPCC (2008) para cada una de las regiones en la vertiente del Golfo de México.

## METODOLOGÍA

La adopción y uso de un modelo matemático para la Función de Distribución de Probabilidades (FDP) de una variable aleatoria, es sumamente importante en el cálculo de diversas estimaciones como para encontrar una magnitud dada de tal variable, su correspondiente probabilidad de ocurrencia, ya sea de excedencia, o el complemento de no excedencia.

La variable aleatoria correspondiente utilizada en este trabajo se extrae de los registros hidrométricos diarios de diferentes estaciones próximas a la desembocadura de los ríos del estado mexicano. Para ello en cada estación hidrométrica se recogieron las series temporales más extensas de caudales de  $n$  años, estas series son mostradas para los afluentes más importantes en dos formatos, buscando distinguir de manera visual la época de estiaje y de avenidas. Posteriormente, se presenta una Función de Distribución de Probabilidades acumuladas (FDP) de la variable y la distribución uniforme, apoyándose en el hecho de que la FDP se distribuye uniformemente en el intervalo de 0 a 1.

A continuación se realiza una caracterización de los valores habituales en cada uno de los afluentes, utilizando las últimas estaciones hidrométricas, para ello los datos de partida necesarios son las series completas de aportaciones de los caudales medios diarios correspondientes a  $n$  años. Se utilizan los criterios planteados por Richards (1990) para estimar los valores característicos de cada uno de los afluentes.

## ÁREA DE ESTUDIO

Las estaciones hidrométricas que van desde Tamaulipas hasta Campeche en la vertiente del Golfo de México, son utilizadas. Para ello este trabajo se apoya en las regiones hidrológico-administrativas de la Comisión Nacional del Agua (CNA) que son:

Región IX: Golfo Norte, la Región X: Golfo Centro, la Región XI: Frontera Sur y la Región XII: Península de Yucatán. En la tabla 1 se presentan las estaciones donde se tienen las bases de datos para este estudio.

**Tabla 1.** Estaciones hidrométricas en cada región.

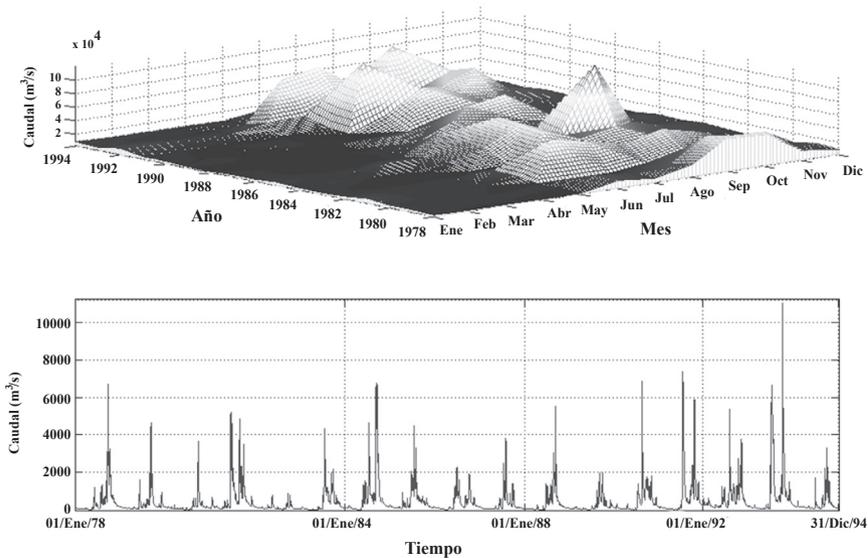
Fuente: CNA-IMTA (2000).

Región	Estaciones
IX	San Fernando, Soto la Marina, Barberena, Paso del Aura, El Chijol, La Esperanza y Pánuco.
X	Tuxpan, Cazones, Tecolutla, Nautla, Antigua, Papaloapan, Coatzacoalcos y Tonalá.
XI	Grijalva-Usumacinta.
XII	Candelaria.

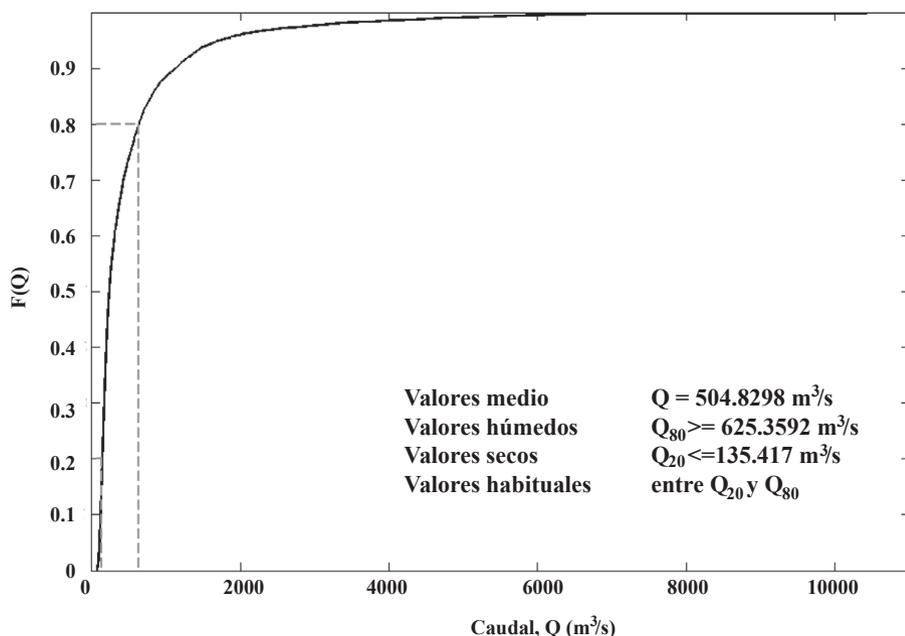
## RECURSOS HÍDRICOS EN LAS DESEMBOCADURAS AL GOLFO DE MÉXICO

### REGIÓN IX (GOLFO NORTE)

De los ríos analizados en la Región IX, el más caudaloso es el río Pánuco. En este río se analizaron 3 estaciones hidrométricas en tres de sus afluentes, por no contar con una estación próxima a la desembocadura. Dichas estaciones fueron: el Olivo (latitud 22° 50' 5" y longitud 98° 30' 5"), Tamuín (latitud 22° 00' 08" y longitud 98°46' 06") y Magiscatzin (latitud 22° 48' 5" y longitud 98° 43' 5"). Los datos de estas tres estaciones fueron sumados para calcular el caudal del río Pánuco. La serie de tiempo obtenida puede observarse en la figura 3. De acuerdo a la Semarnap (hoy Semarnat) (1998) el río Pánuco descarga al Golfo de México un caudal pro-



**Figura 3.** Hidrograma correspondiente al río Pánuco 1978–1994 (Tamuín, El Olivo y Magiscatzin). Distribución mensual (panel superior) y distribución diaria (panel inferior).



**Figura 4.** Función de distribución de probabilidades del río Pánuco.

medio de  $507.9 \text{ m}^3/\text{s}$ . La descarga media obtenida para la serie entre el 1 de enero de 1978 y el 31 de diciembre de 1994 es de  $504.83 \text{ m}^3/\text{s}$ . En algunas ocasiones el caudal llega a máximos cercanos a los  $7\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ , y en eventos extraordinarios, como en el año de 1993, alcanza hasta los  $11\,000 \text{ m}^3/\text{s}$  (figura 3, panel inferior).

Con los valores del porcentaje de probabilidad propuestos por Richard (1990) para avenidas (valores mayores al 80% de probabilidad,  $Q_{80}$ ) y estiaje (valores menores al 20 % de probabilidad,  $Q_{20}$ ), los valores calculados por la función de distribución de probabilidades para el río Pánuco, las avenidas se presentan cuando los caudales son mayores a  $625.36 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que el estiaje se presenta cuando los caudales son menores a  $135.42 \text{ m}^3/\text{s}$ . El caudal promedio diario ( $Q_m$ ) es de  $504.8 \text{ m}^3/\text{s}$ . La función de distribución de probabilidad para el río Pánuco puede observarse en la figura 4. El caudal promedio vertido por los ríos de la Región IX, tomados en cuenta en este estudio, es de  $555.15 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### **REGIÓN X (GOLFO CENTRO)**

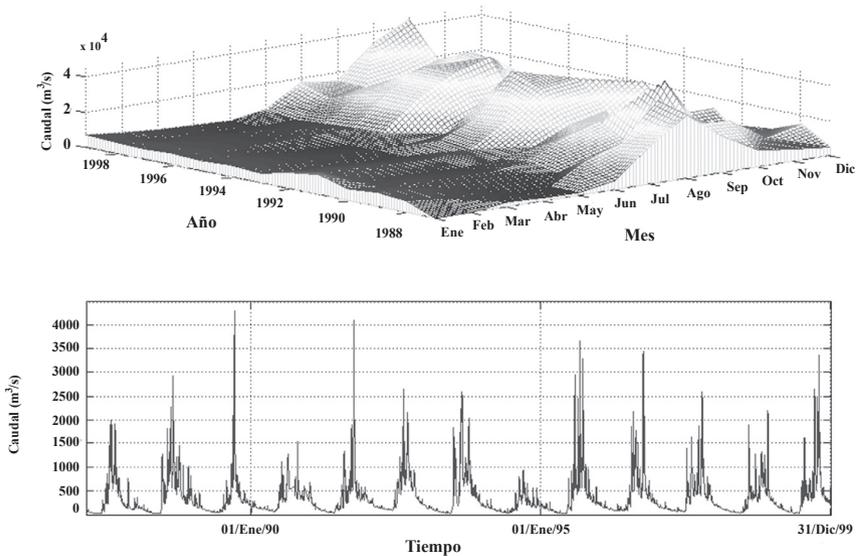
Esta es la segunda región que más escurrimientos aporta al Golfo de México, comprende, casi en su totalidad, al estado de Veracruz. El cauce más importante en esta zona es el río Papalopan ( $Q_m=576.73 \text{ m}^3/\text{s}$ ). La serie de tiempo del caudal fue obtenida en la estación Chacaltianguis. El siguiente río en importancia, por sus escurrimientos, es el río Coatzacoalcos ( $Q_m=448.42 \text{ m}^3/\text{s}$ ), cuya estación hidrométrica más próxima a la desembocadura está ubicada en la Perla.

La serie de tiempo se presenta en la figura 5. A nivel nacional estos ríos ocupan el segundo y tercer lugar por el caudal que vierten al Golfo de México. Los caudales de avenidas, estiaje y promedio, para los ríos de esta región pueden observarse en la tabla 2. El caudal vertido por los ríos de la Región x, tomados en cuenta en este estudio, es de 1 589.45 m<sup>3</sup>/s.

## REGIÓN XI (FRONTERA SUR)

Esta región es la más dinámica en cuanto a escurrimientos al Golfo de México, tan solo el volumen medio anual hacia la desembocadura del río Grijalva se encuentra alrededor de los 36 500 millones de m<sup>3</sup> anuales, si a este volumen le añadimos el volumen medio anual del río Usumacinta a la corriente principal de la cuenca Grijalva-Usumacinta la cantidad de agua dulce que desemboca al Golfo de México se encuentra en el orden de 100 000 millones de metros cúbicos (Rubio y Triana, 2006).

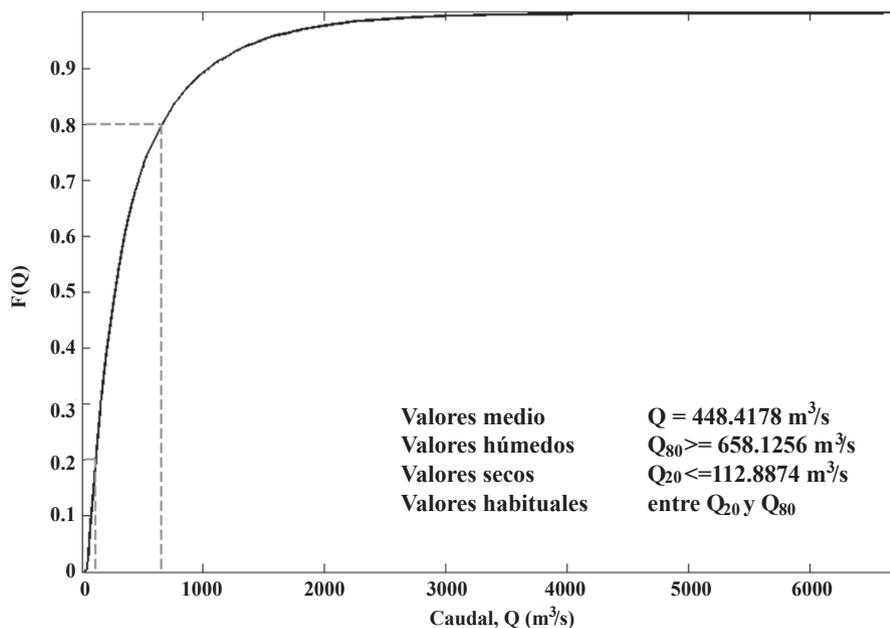
Para cuantificar las descargas Grijalva-Usumacinta nos apoyamos en tres estaciones: Boca de Cerro, Samaria y Porvenir que en suma representan la descarga media diaria al Golfo de México, esto debido a que no se cuenta con una estación próxima a la desembocadura que nos proporcione la descarga total (figura 7 y tabla 3).



**Figura 5.** Hidrograma del río Coatzacoalcos analizado en la estación hidrométrica la Perla. Distribución mensual (panel superior) y distribución diaria (panel inferior).

**Tabla 2.** Localización, longitud de las series de tiempo analizadas y caudales de avenidas ( $Q_{80}$ ), estiaje ( $Q_{20}$ ) y promedio ( $Q_m$ ), para los ríos de la Región IX: Golfo Norte.

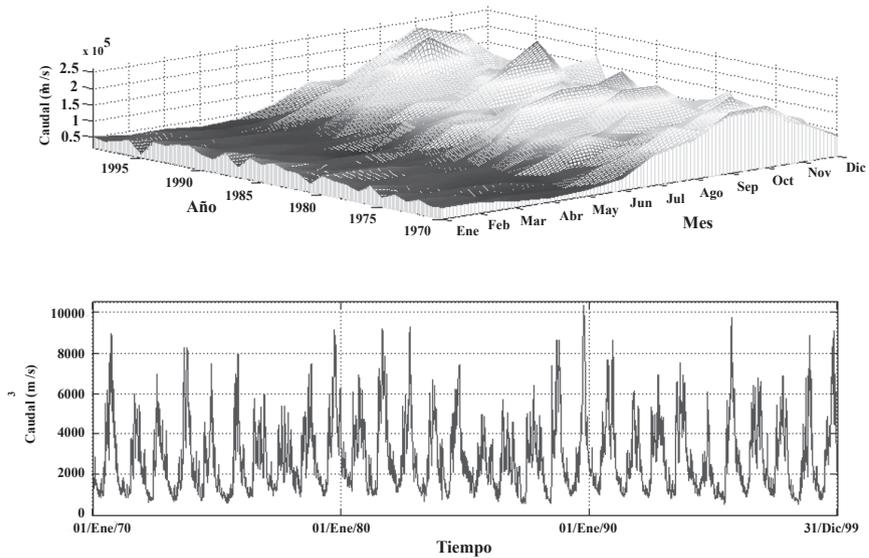
Estación	Río principal	Latitud (N)	Longitud (W)	Periodo de observación	$Q_m$ ( $m^3/s$ )	$Q_{80}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{20}$ ( $m^3/s$ )
San Fernando	San Fernando	24° 50' 38"	98° 09' 30"	1931-1994	19.58	17.17	0.73
Soto la Marina	Soto la Marina	23° 45' 48"	98° 12' 26"	1989-2005	16.86	19.35	12
Barberena	Barberena	22° 37' 30"	98° 07' 15"	1973-2005	2.77	0.358	0
El Chijol	El Tigre	22° 51' 37"	98° 01' 06"	1981-2005	3.06	3.86	0.11
Paso del Aura	Palmas	23° 38' 30"	98° 04' 45"	1963-2004	2.93	1.38	0.012
La Esperanza	San Rafael	23° 38' 30"	97° 56' 14"	1963-2005	5.13	1.94	0.34



**Figura 6.** La función de distribución de probabilidades del río Coatzacoalcos.

## REGIÓN XII (PENÍNSULA DE YUCATÁN)

Esta cuenta con tres ríos importantes que son: Candelaria y Champotón en Campeche y Hondo en Quintana Roo, utilizando para este trabajo el río Candelaria (tabla 4).



**Figura 7.** Hidrograma del Grijalva-Usumacinta sumando Boca del Cerro, Porvenir y Samaria. Distribución mensual (panel superior) y distribución diaria (panel inferior).

**Tabla 3.** Región XI: Frontera sur.

Estación	Río principal	Latitud (N)	Longitud (W)	Periodo de observación	$Q_m$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{80}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{20}$ (m <sup>3</sup> /s)
Boca del Cerro Samaria Porvenir	Grijalva-Usumacinta	17° 16' 00" 17° 48' 55" 16° 31' 10"	91° 29' 00" 93° 17' 30" 90° 29' 00"	1970-1999	3077.36	4791.8	1458.8

**Tabla 4.** Región XII: Península de Yucatán.

Estación	Río principal	Latitud (N)	Longitud (W)	Periodo de observación	$Q_m$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{80}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{20}$ (m <sup>3</sup> /s)
Candelaria	Candelaria	18° 11' 00"	91° 04' 00"	1953-1999	45.9	62.05	7.1

## CONCLUSIONES

Una vez que se estimó la situación que guardan los recursos hídricos en las desembocaduras al Golfo de México y con las proyecciones del IPCC (2008) sobre el posible impacto sobre estos recursos; se realiza una proyección para cada una de las regiones con base en lo planteado por el IPCC (2008) de aquí a finales del siglo XXI (tabla 5).

Para la situación actual, la descarga total de estos afluentes al Golfo de México es de 5 382.33 m<sup>3</sup>/s. Aplicando las proyecciones del IPCC (2008) en la desembocadura para fines del siglo XXI, estos recursos hídricos se verían reducidos a 4 630.26 m<sup>3</sup>/s. Esta considerable disminución de caudales y el aumento de las temperaturas afectarían propiedades físicas, químicas y biológicas de estos afluentes. También al disminuir los caudales y con el aumento del nivel del mar la cuña salina penetraría aun más dentro de los estuarios y con mayor tiempo de permanecía dentro de éstos; afectando a numerosas especies y comunidades que viven en su entorno.

**Tabla 5.** Proyección de los caudales en la desembocadura al Golfo de México para finales del siglo XXI.

Río principal	Estación	Periodo de Observación	Q <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>80</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>20</sub> (m <sup>3</sup> /s)
San Fernando	San Fernando	1931-1994	15.66	13.74	0.58
Soto la Marina	Soto la Marina	1989-2005	13.49	15.48	9.6
Pánuco	Olivo+Tamuín+Magiscatzin	1978-1994	403.86	526.50	108.33
Tuxpan	Almo	1957-1982	53.51	91.46	11.20
Cazones	Poza Rica	1953-1999	44.98	60.81	6.9
Nautla	Martínez de la Torre	1953-1999	54.30	64.39	56.84
Tecolutla	Remolino	1975-1999	200.17	268.52	56.84
Papaloapan	Chacaltianguis	1974-1999	565.20	248.66	47.51
Antigua	Cardel	1951-1999	55.83	87.49	10.07
Coatzacoalcos	La Perla	1953-1999	439.45	644.97	110.63
Tonalá	San José del Carmen	1980-1999	145.21	243.69	46.56
Grijalva-Usumacinta	Boca del Cerro + Porvenir + Samaria	1970-1999	2 461.88	3 832.94	1 167.04
Candelaria	Candelaria	1953-1999	36.72	49.64	5.68

## LITERATURA CITADA

- CNA-IMTA, 2000. Banco Nacional de Datos de Agua Superficial (BANDAS). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Vol. 3-6
- IPCC, 2001, Cambio Climático, informe de síntesis, Tech. Rep., Tercer Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos.
- IPCC, 2007. Cambio Climático, informe de síntesis, Tech. Rep., Cuarto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos.
- IPCC, 2008. Cambio Climático, informe de síntesis, Tech. Rep., Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos.
- Richards, R. P., 1990. Measures of flow variability and new flow-based classification of Great Lakes tributaries. *Journal of Great Lakes Research*, 16: 53-70.
- Rubio H., y C. Triana, 2006. Gestión Integrada de Crecientes caso de estudio México: Río Grijalva. Tech. rep. Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Global Water Partnership (GWP)
- Semarnap, 1998. Estudios técnicos para determinar la disponibilidad de las aguas superficiales de la cuenca del río Pánuco, Tech. Rep., Diario Oficial, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.



Ospina Noreña, J.E., G. Sánchez Torres Esqueda y C. Conde Álvarez, 2010. Impactos del cambio climático en las regiones hidrológicas del Golfo de México, p. 73-88. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Impactos del cambio climático en las regiones hidrológicas del Golfo de México

*Jesús E. Ospina Noreña, Gerardo Sánchez Torres Esqueda y Cecilia Conde Álvarez*

---

## RESUMEN

Está demostrado científicamente que el cambio climático es real y que va a tener un impacto sobre el ciclo hidrológico a nivel global. Estudios realizados por investigadores de diferentes países adscritos a diferentes universidades, centros de investigación, agencias gubernamentales y organismos no gubernamentales concluyen que la temperatura media del planeta va a aumentar, que la precipitación en algunas regiones del mundo va a disminuir, y que los eventos extremos (sequías e inundaciones) van a tender a tener cada vez una mayor variabilidad. En este documento se presentan los resultados obtenidos de la modelación del cambio climático realizada en cuatro regiones hidrológico-administrativas de la Comisión Nacional del Agua (CNA) en la cuenca del Golfo de México. Se obtuvieron las estimaciones actuales de la relación Precipitación/Temperatura (Relación P/T) y sus proyecciones al año 2080 y se aplicaron los modelos GFDLCM20 y MPIECH-5 para los escenarios A2 y B2, para estimar el impacto del cambio climático en la disponibilidad del agua y en el grado de presión sobre el recurso hídrico en esas regiones de la CNA, proyectando esos parámetros al año 2080.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han llevado a cabo una gran variedad de estudios y modelaciones del impacto que el cambio climático puede tener sobre los recursos hídricos del planeta y se han publicado un sinnúmero de artículos y libros sobre este tema. Recientemente, el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) publicó un documento, editado por Bates *et al.* (2008), sobre cambio climático y agua en donde se confirma lo que otros investigadores ya habían concluido anteriormente sobre el impacto que el cambio climático va a tener sobre los recursos hídricos del planeta.

Entre las conclusiones más importantes de Bates *et al.* (2008) destaca el hecho de que el calentamiento global observado en las últimas décadas está ligado a cambios a gran escala en el ciclo hidrológico en aspectos relacionados con el contenido de vapor en la atmósfera, cambios en los patrones de precipitación, intensidad de lluvia y tormentas extraordinarias, reducción de las capas de nieve, derretimiento de glaciares y cambios en la humedad del suelo y en los procesos de escurrimiento.

Bates *et al.* (2008) concluyen que durante el siglo XX se observó que la precipitación aumentó en regiones ubicadas en latitudes altas en el Hemisferio Norte y que la precipitación disminuyó en regiones ubicadas entre los paralelos 30°N y 10°S. Por otra parte, las proyecciones de precipitación para el siglo XXI por los modelos de cambio climático son consistentes con el aumento de precipitación en las zonas de alta latitud norte y la disminución de precipitación en las zonas tropicales y subtropicales del planeta. México está ubicado precisamente en la región tropical y subtropical del hemisferio norte, en donde se espera que las precipitaciones disminuyan durante el siglo XXI.

Por lo tanto, este capítulo presenta los resultados de una modelación del impacto que puede tener el cambio climático sobre la disponibilidad y grado de presión sobre el recurso hídrico en 4 de las 5 regiones hidrológico-administrativas de la Comisión Nacional del Agua (CNA) en la cuenca del Golfo de México. Por la importancia y complejidad que tiene la región del río Bravo (Región VI), no fue posible incorporarla en este estudio. Por lo tanto, los resultados y conclusiones del proceso de modelación aplicado a las regiones hidrológico-administrativas de la CNA estudiadas se describen a continuación. Las regiones incluidas en este estudio fueron la Región IX: Golfo Norte, la Región X: Golfo Centro, la Región XI: Frontera Sur y la Región XII: península de Yucatán.

## CONDICIONES ACTUALES Y PROYECCIONES DEL RECURSO HÍDRICO EN EL GOLFO DE MÉXICO

Con el propósito de tener una aproximación de la oferta natural de los recursos hídricos, demanda de agua y grado de presión sobre los recursos hídricos en el Golfo de México ante los efectos del cambio climático, se analizaron las bases de datos integradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para obtener las normales climatológicas para el período 1971-2000

como línea base para los estados y estaciones climatológicas mostradas en la tabla 1, y posteriormente se calculó el Índice de Lang ( $I_L$ ) o relación Precipitación/Temperatura ( $P/T$ ) para las diferentes estaciones climatológicas incluidas en esta tabla.

Con base en los criterios e interpretación del Índice de Lang planteados por Urbano (1995), las diferentes zonas climáticas se muestran en la tabla 2, y de acuerdo con las regiones hidrológico-administrativas de la Comisión Nacional del Agua (CNA) (figura 1), Tamaulipas forma parte de la región IX (Golfo Norte), Veracruz forma parte de la región X (Golfo Centro), Tabasco forma parte de la región XI (Frontera Sur), y Campeche, Yucatán y Quintana Roo forman parte de la región XII (Península de Yucatán).

**Tabla 1.** Normales climatológicas 1971-2000 e Índice de Lang.

Normales climatológicas 1971-2000							
Estado	Estación climatológica	Código	Latitud (N)	Longitud (W)	Altura (msnm)		
Yucatán	Ticul	00031063	20°23'50"	89°33'28"	30		
	Motul de C. Puerto	00031020	21°04'44"	89°17'01"	7		
Campeche	Campeche	00004038	19°50'17"	90°32'39"	5		
	Santa Cristina	00004053	19°48'55"	90°22'52"	10		
	Ciudad del Carmen	00004007	18°39'12"	91°45'39"	5		
	Mamantel	00004057	18°31'29"	91°05'21"	12		
Tabasco	Pueblo Nuevo Centro	00027037	17°51'15"	93°52'45"	8		
Veracruz	Puente Nacional	00030137	19°19'30"	96°28'54"	110		
	Centro Reg. Huatusco	00030342	19°08'48"	96°57'00"	1 344		
	Heroica Alvarado	00030009	18°46'40"	95°45'50"	3		
Tamaulipas	Gómez Farías	00028136	23°01'43"	99°08'45"	380		
	Magiscatzin	00028058	22°47'39"	98°42'58"	40		

Índice de Lang							
Estado	Estación climatológica	Precip. (mm)	Tmed (°C)	Relación P/T	Promedio P/T	Prom. Precip.	Prom. Tmed
Yucatán	Ticul .	1 106.2	26.2	42.2	43.4	1 132.6	26.1
	Motul de C. Puerto.	1 158.9	26	44.6			
Campeche	Campeche .	1 060.4	27.2	39.0	49.1	1 320.8	26.9
	Santa Cristina .	1 250.8	26.6	47.0			
	Ciudad del Carmen.	1 624.7	27.2	59.7			
	Mamantel.	1 347.3	26.6	50.7			
Tabasco	Pueblo Nuevo Centro.	2 105.2	26.6	79.1	79.1	2 105.2	26.9
Veracruz	Puente Nacional.	1 186.5	27.2	43.6	79.4	1 755.9	23.6
	Centro Reg. Huatusco	2 003.3	17.3	115.8			
	Heroica Alvarado.	2 077.9	26.4	78.7			
Tamaulipas	Gómez Farías.	1 842.3	23.2	79.4	56.8	1 349.3	24.1
	Magiscatzin.	856.2	25	34.2			

**Tabla 2.** Zonas climáticas definidas por el Índice de Lang.

ILa	Zonas Climáticas	Abreviatura
$0 \leq IL < 20$	Desierto	D
$20 \leq IL < 40$	Zona árida	Za
$40 \leq IL < 60$	Zona húmeda de estepa y sabana	Zhes
$60 \leq IL < 100$	Zona húmeda de bosques ralos	Zhbr
$100 \leq IL < 160$	Zonas húmedas de bosques densos	Zhbd
$IL \geq 160$	Zonas hiperhúmedas de prados y tundras	Zhhpt

Fuente: Modificado de Urbano (1995).



**Figura 1.** Regiones hidrológico-administrativas de la CNA.

Por lo tanto, con base en los resultados mostrados en la tabla 1, los valores promedio de la relación P/T para cada estado ubicado en la cuenca del Golfo de México dan por resultado que las regiones IX y XII se pueden clasificar como zona húmeda de estepa y sabana (Zhes) y las regiones X y XI se pueden clasificar como zona húmeda de bosques ralos (Zhbr), de acuerdo con la clasificación de zonas climáticas (tabla 2).

Es importante hacer notar que la región VI (río Bravo) actualmente tiene un alto grado de presión (56 %) sobre los recursos hídricos de esa región y aunque el río Bravo vierte sus aguas en el Golfo de México, debido a sus condiciones de cuenca binacional, esta región amerita un estudio especial y profundo (que no se hace en esta ocasión), debido a las implicaciones político administrativas de carácter binacional.

## OFERTA NATURAL Y EXTRACCIONES DEL RECURSO HÍDRICO EN EL GOLFO DE MÉXICO

Con base en el estudio realizado en el 2004 por la Fundación Gonzalo Río Arronte-Fundación Javier Barros Sierra, “*Prospectiva de la demanda de agua en México, 2000-2030*,” el cual comprendió un análisis retrospectivo y prospectivo de la demanda de agua en México teniendo en cuenta la disponibilidad natural de los recursos hídricos en las diferentes regiones hidrológico-administrativas de la CNA, el grado de presión, extracciones o demandas al año 2000 y proyecciones de la demanda de agua al año 2030, crecimiento poblacional, crecimiento del PIB, aumentos o disminuciones del uso de agua por sector, entre otros criterios socioeconómicos. En la tabla 3 se muestran los parámetros que se consideraron importantes para el análisis sobre los posibles efectos que el cambio climático pueda tener sobre las diferentes regiones hidrológico-administrativas de la CNA en la cuenca del Golfo de México.

**Tabla 3.** Disponibilidad y extracciones de agua al año 2000 y 2030 para las regiones hidrológico-administrativas en el Golfo de México.

Región	Disponibilidad natural en el año 2000, (Mm <sup>3</sup> )	Extracciones totales en el año 2000, (Mm <sup>3</sup> )	Grado de presión sobre los recursos hídricos en el año 2000, (%)	Extracciones totales al año 2030, (Mm <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	Grado de presión sobre los recursos hídricos al año 2030, (%)
IX Golfo Norte	24 339	5 217	21.4	6 347	26
X Golfo Centro	102 633	3 946	3.8	17 502	17
XI Frontera Sur	155 906	1 841	1.2	19 058	12
XII Península de Yucatán	26 496	1 303	4.9	4 615	17

Notas: <sup>a</sup>Valores máximos proyectados, Mm<sup>3</sup> = Millones de metros cúbicos.

Fuente: Fundación Gonzalo Río Arronte-Fundación Javier Barros Sierra, “*Prospectiva de la demanda de agua en México, 2000-2030*.” México, D.F. 2004.

## PROYECCIONES DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN EL GOLFO DE MÉXICO

Las proyecciones de los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de los recursos hídricos en cada una de las regiones hidrológico-administrativas de la CNA se estimaron en intervalos de 5 años ajustando los promedios para la temperatura media y la precipitación en las estaciones reportadas para cada región (tabla 1), con las proyecciones de las anomalías correspondientes a cada región encontradas mediante las salidas del programa MAGICC/SCENGEN<sup>1</sup> v.5.3, para los modelos GFDLCM20 y MPIECH-5, escenarios A2 y B2 (tablas 4 y 5).

Información detallada relacionada con escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, modelos climáticos de circulación general, programas generadores de escenarios, entre otros aspectos y conceptos relevantes de cambio climático, se pueden encontrar en Wigley (1994) y (2003); Hulme *et al.* (2000) y Conde (2003).

Los escenarios de cambio climático muestran tendencia al aumento de la temperatura media para todas las regiones hidrológico-administrativas del Golfo de México, siendo mayores los aumentos proyectados por el modelo MPIECH-5, escenario A2. En relación a la precipitación, se observa un pequeño aumento para la región XII dado por el modelo GFDLCM20, para los escenarios A2 y B2 y pequeñas disminuciones para el resto de las regiones, siendo la región IX la más afectada, alcanzando una disminución de 10.8% en el escenario A2 y de 4.3% en el escenario B2 para el año 2080. Por otra parte, el modelo MPIECH-5, para los escenarios A2 y B2, proyecta disminuciones importantes de la precipitación en las regiones XII (-21.1% y -14.7% para los escenarios A2 y B2, respectivamente al año 2080) y XI (-26.4% y -18.5% para los escenarios A2 y B2, respectivamente al año 2080), y disminuciones relativamente pequeñas en las regiones X y IX como se puede ver en las tablas 4 y 5.

Con las anomalías presentadas en las tablas 4 y 5, y teniendo en cuenta los valores promedios de temperatura media y precipitación en cada región, mostrados en la tabla 1, se proyectaron los cambios esperados para ambas variables en cada región. Es importante notar que para la región XII se usaron los promedios encontrados en los estados de Yucatán y Campeche.

Con las proyecciones de la precipitación y la temperatura media en cada año, se calculó la relación P/T para los cuatro escenarios resultantes de las corridas de los modelos GFDLCM20 y MPIECH-5 en cada una de las regiones hidrológico-administrativas del Golfo de México, la

---

<sup>1</sup> Se han desarrollado modelos climáticos simples que permiten incorporar la gama de escenarios de emisiones a los estudios de cambio climático. Estos modelos pueden simular la respuesta del clima global a cambios en las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en términos del incremento de la temperatura y el aumento del nivel del mar. Dentro de estos modelos simples está el Modelo para la Evaluación de Gases de Efecto Invernadero - Gases que Inducen Cambio Climático (MAGICC, por sus siglas en Inglés). Para combinar los resultados del MAGICC con las salidas de los modelos de circulación general, fue necesario utilizar el programa Generador de Escenarios (Scengen, por sus siglas en inglés), (Wigley, 1994, 2003; Hulme *et al.*, 2000; y Conde, 2003).

**Tabla 4.** Anomalías de precipitación y temperatura media proyectadas para el Golfo de México, Modelo GFDLcm20.

Año/ Mod.	Región XII				Región XI				Región X				Región IX			
	GFDLCM20-A2		GFDLCM20-B2		GFDLCM20-A2		GFDLCM20-B2		GFDLCM20-A2		GFDLCM20-B2		GFDLCM20-A2		GFDLCM20-B2	
	% cambio Prec	cambio Tmed (°C)														
2010	4.8	0.2	2.2	0.3	3.5	0.2	0.5	0.3	0.96	0.18	0.09	0.25	-2.7	0.3	-1.2	0.3
2015	4.0	0.3	2.9	0.3	1.9	0.2	0.7	0.3	-0.02	0.25	0.13	0.32	-4	0.33	-1.4	0.39
2020	4.0	0.3	3.5	0.4	1.15	0.32	0.8	0.41	-0.7	0.32	0.18	0.4	-5.54	0.37	-1.6	0.49
2025	4.3	0.4	3.9	0.5	0.7	0.41	0.7	0.49	-1.19	0.4	0.12	0.48	-6.84	0.44	-1.9	0.57
2030	4.7	0.5	4.3	0.6	0.26	0.51	0.5	0.58	-1.66	0.49	0.02	0.56	-8.1	0.53	-2.2	0.66
2035	5.0	0.6	4.7	0.7	-0.25	0.63	0.3	0.67	-2.02	0.6	-0.1	0.64	-8.87	0.63	-2.4	0.75
2040	5.4	0.7	5.1	0.8	-0.76	0.76	0.1	0.76	-2.34	0.72	-0.22	0.73	-9.51	0.75	-2.7	0.84
2045	5.6	0.8	5.5	0.9	-1.8	0.89	-0.1	0.86	-2.66	0.85	-0.31	0.81	-10.09	0.88	-2.9	0.94
2050	6.2	1.0	5.9	0.9	-1.84	1.03	-0.3	0.95	-2.97	0.97	-0.39	0.9	-10.63	1.01	-3.0	1.03
2055	6.7	1.1	6.3	1.0	-2.38	1.19	-0.6	1.05	-3.17	1.12	-0.5	0.99	-10.8	1.16	-3.2	1.13
2060	7.2	1.3	6.6	1.1	-2.88	1.36	-0.9	1.14	-3.31	1.27	-0.62	1.08	-10.84	1.32	-3.4	1.22
2065	7.8	1.5	7.0	1.2	-3.28	1.53	-1.1	1.24	-3.38	1.43	-0.74	1.17	-10.82	1.5	-3.6	1.32
2070	8.8	1.6	7.3	1.3	-3.26	1.69	-1.4	1.34	-3.31	1.59	-0.86	1.26	-10.75	1.68	-3.8	1.41
2075	10.5	1.8	7.5	1.4	-2.52	1.84	-1.8	1.43	-2.92	1.73	-1.04	1.35	-10.96	1.88	-4.0	1.5
2080	11.4	2.0	7.8	1.5	-2.77	2.02	-2.2	1.53	-2.9	1.9	-1.24	1.44	-10.81	2.08	-4.3	1.59

**Tabla 5.** Anomalías de precipitación y temperatura media proyectadas para el Golfo de México, Modelo MPIECH-5.

Año/ Mod.	Región XII			Región XI			Región X			Región IX						
	MPIECH-5 A2 % cambio Temp (°C)	MPIECH-5 B2 % cambio Temp (°C)	MPIECH-5 A2 % cambio Prec	MPIECH-5 A2 % cambio Temp (°C)	MPIECH-5 B2 % cambio Temp (°C)	MPIECH-5 A2 % cambio Prec	MPIECH-5 A2 % cambio Temp (°C)	MPIECH-5 B2 % cambio Temp (°C)	MPIECH-5 A2 % cambio Prec	MPIECH-5 B2 % cambio Temp (°C)	MPIECH-5 A2 % cambio Prec	MPIECH-5 B2 % cambio Temp (°C)				
2010	0.4	0.3	-1.94	0.4	0.27	0.29	0.42	-2.49	0.38	0.51	0.31	0.37	-2.15	0.41	-0.64	0.4
2015	-1.9	0.4	-2.54	0.5	-2.38	0.42	-3.26	0.5	0.5	-0.63	0.43	0.49	-3.25	0.47	-0.72	0.5
2020	-3.6	0.5	-3.12	0.6	-4.3	0.55	-4.02	0.61	0.61	-1.48	0.55	0.6	-4.59	0.55	-0.76	0.6
2025	-5.0	0.6	-3.89	0.7	-6.04	0.69	-4.99	0.73	0.73	-2.15	0.69	0.72	-5.67	0.66	-0.87	0.8
2030	-6.6	0.7	-4.75	0.8	-7.87	0.85	-6.07	0.86	0.86	-2.82	0.84	0.84	-6.68	0.79	-1.00	0.9
2035	-8.1	0.9	-5.68	0.9	-9.77	1.03	-7.23	0.99	0.99	-3.38	1.01	0.96	-7.22	0.95	-1.12	1.0
2040	-9.7	1.1	-6.65	1.0	-11.71	1.22	-8.44	1.12	1.12	-3.91	1.19	1.09	-7.6	1.11	-1.24	1.1
2045	-11.3	1.2	-7.57	1.1	-13.7	1.42	-9.6	1.26	1.26	-4.43	1.37	1.21	-7.93	1.28	-1.25	1.3
2050	-12.9	1.4	-8.48	1.3	-15.73	1.62	-10.76	1.39	1.39	-4.95	1.56	1.34	-8.21	1.46	-1.22	1.4
2055	-14.6	1.6	-9.44	1.4	-17.77	1.84	-11.98	1.53	1.53	-5.36	1.77	1.47	-8.12	1.66	-1.24	1.5
2060	-16.2	1.8	-10.43	1.5	-19.81	2.07	-13.22	1.67	1.67	-5.72	1.99	1.6	-7.9	1.88	-1.28	1.6
2065	-17.7	2.0	-11.43	1.6	-21.79	2.31	-14.47	1.8	1.8	-6.03	2.21	1.73	-7.59	2.1	-1.29	1.8
2070	-19.0	2.3	-12.43	1.8	-23.49	2.55	-15.72	1.94	1.94	-6.18	2.44	1.86	-7.24	2.34	-1.29	1.9
2075	-19.6	2.5	-13.52	1.9	-24.35	2.76	-17.07	2.08	2.08	-6.04	2.65	1.99	-7.16	2.59	-1.37	2.0
2080	-21.1	2.7	-14.67	2.0	-26.35	3.02	-18.48	2.22	2.22	-6.26	2.9	2.12	-6.7	2.85	-1.47	2.1

cual se puede interpretar como un índice del grado de aridez o humedad predominante en las diferentes regiones. Partiendo de los valores actuales de la relación P/T mostrados en la tabla 1, se determinó el porcentaje del aumento o disminución de esa misma relación según las diferentes proyecciones, que a la vez se asume como un aumento o disminución en la disponibilidad del recurso hídrico (tabla 6 y figura 2).

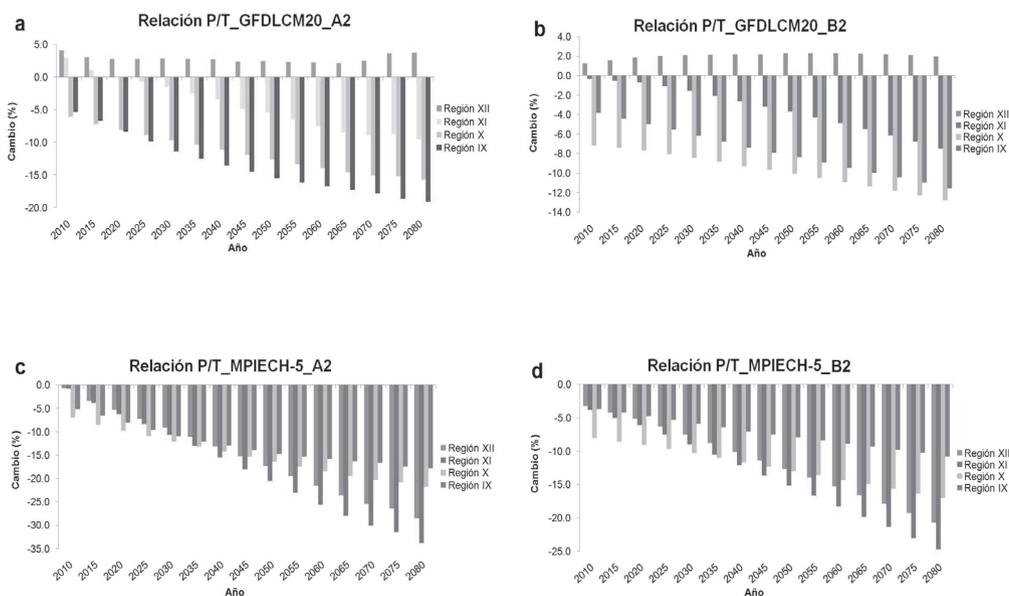
Para tener una idea más clara de lo que implica una disminución de 1% en la disponibilidad del agua, por ejemplo, si la disponibilidad de agua correspondiente al año 2000 en la zona XI Frontera Sur, igual a 155 906 millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>), decreciera en 1%, se tendría una disminución de 1 559.06 Mm<sup>3</sup>. Si se asume que el consumo promedio de agua por persona por día es de 200 litros, es decir, aproximadamente 73 m<sup>3</sup> de agua al año, esa disminución podría abastecer agua durante un año a una población de 21 356 986 habitantes, casi la población actual del Valle de México.

Las disminuciones observadas en la tabla 6 y en la figura 2, permiten establecer la tendencia al cambio de las zonas climáticas en cada región hidrológico-administrativa como se muestra en la tabla 7, de acuerdo a la clasificación establecida en la tabla 2. La región XII, por ejemplo, pasaría de zona húmeda de estepa y sabana (Zhes) a zona árida (Za), y las regiones XI y X pasarían de zonas húmedas de bosques ralos (Zhbr) a zonas húmedas de estepa y sabana (Zhes), según lo proyectado por el modelo MPIECH-5, para los escenarios A2 y B2.

La tendencia generalizada al cambio de las zonas climáticas para las diferentes regiones hidrológico-administrativas podría traer implicaciones importantes en la cobertura vegetal

**Tabla 6.** Porcentaje del aumento o disminución de la relación P/T.

Año	Región IX				Región X				Región XI				Región XII			
	GFDLCM20		MPIECH-5		GFDLCM20		MPIECH-5		GFDLCM20		MPIECH-5		GFDLCM20		MPIECH-5	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
2010	-5.3	-3.8	-5.2	-3.7	-6.1	-7.2	-7.0	-8.0	2.9	-0.3	-0.8	-3.8	4.1	1.2	-0.7	-3.2
2015	-6.7	-4.4	-6.5	-4.3	-7.3	-7.4	-8.5	-8.6	1.0	-0.5	-3.8	-5.0	3.0	1.6	-3.3	-4.2
2020	-8.3	-5.0	-8.1	-4.8	-8.2	-7.7	-9.8	-9.0	0.0	-0.7	-6.2	-6.1	2.7	1.9	-5.3	-5.2
2025	-9.9	-5.5	-9.5	-5.3	-8.9	-8.0	-10.9	-9.7	-0.8	-1.1	-8.4	-7.5	2.7	2.0	-7.2	-6.3
2030	-11.4	-6.2	-11.0	-5.9	-9.7	-8.4	-12.0	-10.3	-1.6	-1.6	-10.7	-9.0	2.8	2.1	-9.1	-7.5
2035	-12.5	-6.8	-12.1	-6.5	-10.4	-8.8	-13.2	-11.0	-2.5	-2.1	-13.1	-10.5	2.7	2.1	-11.1	-8.8
2040	-13.5	-7.4	-13.0	-7.0	-11.2	-9.3	-14.3	-11.7	-3.5	-2.6	-15.5	-12.1	2.6	2.1	-13.2	-10.1
2045	-14.5	-7.9	-13.9	-7.5	-11.9	-9.7	-15.3	-12.3	-4.9	-3.2	-18.0	-13.6	2.3	2.2	-15.3	-11.4
2050	-15.5	-8.4	-14.7	-7.9	-12.6	-10.1	-16.4	-13.0	-5.4	-3.7	-20.5	-15.1	2.4	2.3	-17.4	-12.7
2055	-16.2	-8.9	-15.3	-8.4	-13.3	-10.5	-17.5	-13.6	-6.5	-4.3	-23.0	-16.7	2.3	2.3	-19.5	-14.0
2060	-16.7	-9.4	-15.8	-8.9	-14.0	-10.9	-18.5	-14.3	-7.6	-4.9	-25.6	-18.3	2.1	2.3	-21.6	-15.3
2065	-17.3	-10.0	-16.3	-9.3	-14.6	-11.4	-19.5	-15.0	-8.5	-5.5	-28.0	-19.8	2.1	2.2	-23.6	-16.6
2070	-17.8	-10.4	-16.7	-9.8	-15.1	-11.8	-20.3	-15.6	-9.0	-6.1	-30.1	-21.4	2.4	2.1	-25.4	-17.9
2075	-18.6	-11.0	-17.4	-10.3	-15.2	-12.3	-20.8	-16.3	-8.8	-6.8	-31.4	-23.0	3.5	2.1	-26.4	-19.3
2080	-19.1	-11.6	-17.8	-10.8	-15.8	-12.8	-21.7	-17.1	-9.6	-7.5	-33.8	-24.7	3.7	1.9	-28.4	-20.7



**Figura 2.** Evolución de la relación P/T en el tiempo. a) Modelo GFDLCM20-A2, b) Modelo GFDLCM20-B2, c) Modelo MPIECH-5-A2, d) Modelo MPIECH-5-B2.

**Tabla 7.** Cambio en la clasificación de zonas climáticas en el Golfo de México.

Condición climática	Región IX				Región X			
	GFDLCM20		MPIECH-5		GFDLCM20		MPIECH-5	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Clasificación Actual	Zhes	Zhes	Zhes	Zhes	Zhbr	Zhbr	Zhbr	Zhbr
Clasificación al año 2080	Zhes*	Zhes*	Zhes*	Zhes*	Zhbr*	Zhbr*	Zhes	Zhes

Condición climática	Región XI				Región XII			
	GFDLCM20		MPIECH-5		GFDLCM20		MPIECH-5	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Clasificación Actual	Zhbr	Zhbr	Zhbr	Zhbr	Zhes	Zhes	Zhes	Zhes
Clasificación al año 2080	Zhbr*	Zhbr*	Zhes	Zhes	Zhes*	Zhes*	Za	Za

\*Aunque conservan su clasificación, es importante anotar que cada vez se acercan más al límite inferior de la clasificación mostrada en la tabla 2.

natural y sus consecuentes efectos sobre los diferentes elementos biótico-físicos existentes, es decir, la estructura florística, faunística y ecosistémica podría sufrir cambios relevantes. Igualmente a futuro se podrían ver afectados los sistemas de producción agrícola predominantes; por lo que, será necesario evaluar los aspectos anteriores a la luz de los posibles cambios climáticos que se pueden presentar en las regiones hidrológico-administrativas de la cuenca del Golfo de México.

## **PROYECCIONES DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL GRADO DE PRESIÓN SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL GOLFO DE MÉXICO**

En los resultados de la tabla 6, se observa que la región XII podría presentar un pequeño aumento en la disponibilidad de agua según lo proyectado por el modelo GFDLCM20 para los escenarios A2 y B2. Sin embargo, los demás escenarios muestran reducciones significativas conforme transcurre el tiempo para todas las regiones del Golfo de México. Estas disminuciones exacerbaban las condiciones actuales del grado de presión sobre los recursos hídricos, máxime cuando se esperan fuertes aumentos a futuro en la extracción o demanda del recurso hídrico, como se mencionó en párrafos anteriores y se reportó en la tabla 3.

La disminución en la disponibilidad de agua y el aumento en la extracción, conllevan a un aumento en el grado de presión sobre los recursos hídricos en cada una de las regiones hidrológico-administrativas de la CNA en el Golfo de México. En las tablas 8 y 9 se muestran los resultados obtenidos de las corridas de los modelos GFDLCM20 y MPIECH-5 en relación con las proyecciones del grado de presión sobre el recurso hídrico en las regiones hidrológico-administrativas del Golfo de México. Considerando únicamente los resultados del modelo MPIECH-5 (escenario A2), el cual arroja los resultados más adversos, se puede observar (tabla 8) que la región XII pasaría de un grado de presión en el año 2010 igual a 5.0% a un grado de presión de 19.2% en el año 2030 y de 24.3% al año 2080. Estos resultados asumen que la demanda de agua proyectada al 2030 se mantiene constante hasta el año 2080, lo cual quiere decir que el aumento en el grado de presión puede ser mucho mayor a lo reportado en este estudio, y su valor final dependerá de la mejora en la eficiencia de los sistemas hidráulicos y de las políticas que se adopten en cuanto al manejo sustentable de los recursos hídricos en las regiones hidrológico-administrativas consideradas en este estudio.

Es importante resaltar que aún con los pequeños aumentos en la disponibilidad de agua proyectados por el modelo GFDLCM20 (escenarios A2 y B2) para la región XII (tabla 6), al considerar las proyecciones de la demanda de agua, el grado de presión pasaría de un 4.7% en el año 2010 a un 17% en el año 2080 (escenarios A2 y B2). En todos los casos la región IX es la más afectada, alcanzando grados de presión al año 2080 de 29.2% proyectado por el modelo MPIECH-5 (escenario B2), hasta 32.2% proyectado por el modelo GFDLCM20 (escenario A2).

En la figura 3 se presenta la evolución del grado de presión en cada una de las regiones del Golfo de México, con base en los valores reportados en la tabla 8 para el modelo MPIECH-5,

**Tabla 8.** Proyección del grado de presión sobre el recurso hídrico, modelo MPIECH-5.

Año/Mod.	MPIECH-5, escenario A2				MPIECH-5, escenario B2			
	Región IX	Región X	Región XI	Región XII	Región IX	Región X	Región XI	Región XII
2010	22.6	4.1	1.2	5.0	22.3	4.2	1.2	5.1
2015	22.9	4.2	1.2	5.1	22.4	4.2	1.2	5.2
2020	23.3	4.3	1.3	5.2	22.5	4.2	1.3	5.2
2025	23.7	4.3	1.3	5.3	22.6	4.3	1.3	5.3
2030*	29.3	19.4	13.7	19.2	27.7	19.0	13.4	18.8
2035	29.7	19.6	14.1	19.6	27.9	19.2	13.7	19.1
2040	30.0	19.9	14.5	20.0	28.0	19.3	13.9	19.4
2045	30.3	20.1	14.9	20.5	28.2	19.4	14.2	19.7
2050	30.6	20.4	15.4	21.1	28.3	19.6	14.4	19.9
2055	30.8	20.7	15.9	21.6	28.5	19.7	14.7	20.2
2060	31.0	20.9	16.4	22.2	28.6	19.9	15.0	20.6
2065	31.1	21.2	17.0	22.8	28.8	20.1	15.3	20.9
2070	31.3	21.4	17.5	23.3	28.9	20.2	15.6	21.2
2075	31.6	21.5	17.8	23.7	29.1	20.4	15.9	21.6
2080	31.7	21.8	18.5	24.3	29.2	20.6	16.2	22.0

**Tabla 9.** Proyección del grado de presión, modelo GFDLCM20.

Año/Mod.	GFDLCM20, escenario A2				GFDLCM20, escenario B2			
	Región IX	Región X	Región XI	Región XII	Región IX	Región X	Región XI	Región XII
2010	22.6	4.1	1.1	4.7	22.3	4.1	1.2	4.9
2015	23.0	4.1	1.2	4.8	22.4	4.2	1.2	4.9
2020	23.4	4.2	1.2	4.8	22.6	4.2	1.2	4.8
2025	23.8	4.2	1.2	4.8	22.7	4.2	1.2	4.8
2030*	29.4	18.9	12.4	17.0	27.8	18.6	12.4	17.1
2035	29.8	19.0	12.5	17.0	28.0	18.7	12.5	17.1
2040	30.2	19.2	12.7	17.0	28.2	18.8	12.6	17.1
2045	30.5	19.4	12.9	17.0	28.3	18.9	12.6	17.0
2050	30.9	19.5	12.9	17.0	28.5	19.0	12.7	17.0
2055	31.1	19.7	13.1	17.0	28.6	19.1	12.8	17.0
2060	31.3	19.8	13.2	17.1	28.8	19.1	12.9	17.0
2065	31.5	20.0	13.4	17.1	29.0	19.2	12.9	17.0
2070	31.7	20.1	13.4	17.0	29.1	19.3	13.0	17.1
2075	32.0	20.1	13.4	16.8	29.3	19.4	13.1	17.1
2080	32.2	20.2	13.5	16.8	29.5	19.5	13.2	17.1

escenario A2. Para este modelo en particular se tiene que en el año 2000 las regiones X, XI y XII tenían un grado de presión escasa correspondiente a 4%, 1% y 5%, respectivamente, mientras que la región IX presentaba un grado de presión media-fuerte de 21%. Al año 2030 estas mismas regiones X, XI y XII se estima que presentarán un grado de presión moderado de 19%, 14% y 19%, respectivamente, y la región IX seguirá teniendo un grado de presión media-fuerte, ahora igual a 29%. Y para el año 2080, las regiones X y XII alcanzarán un grado de presión media-fuerte, la región XI se mantendrá en un grado de presión moderada, pero en su límite superior; y la región IX conservará su categoría de presión media-fuerte, pero acercándose cada vez más al límite superior de esa categoría, pudiendo tal vez pasar al grado de presión fuerte (>40%) después del año 2080.

## CONCLUSIONES

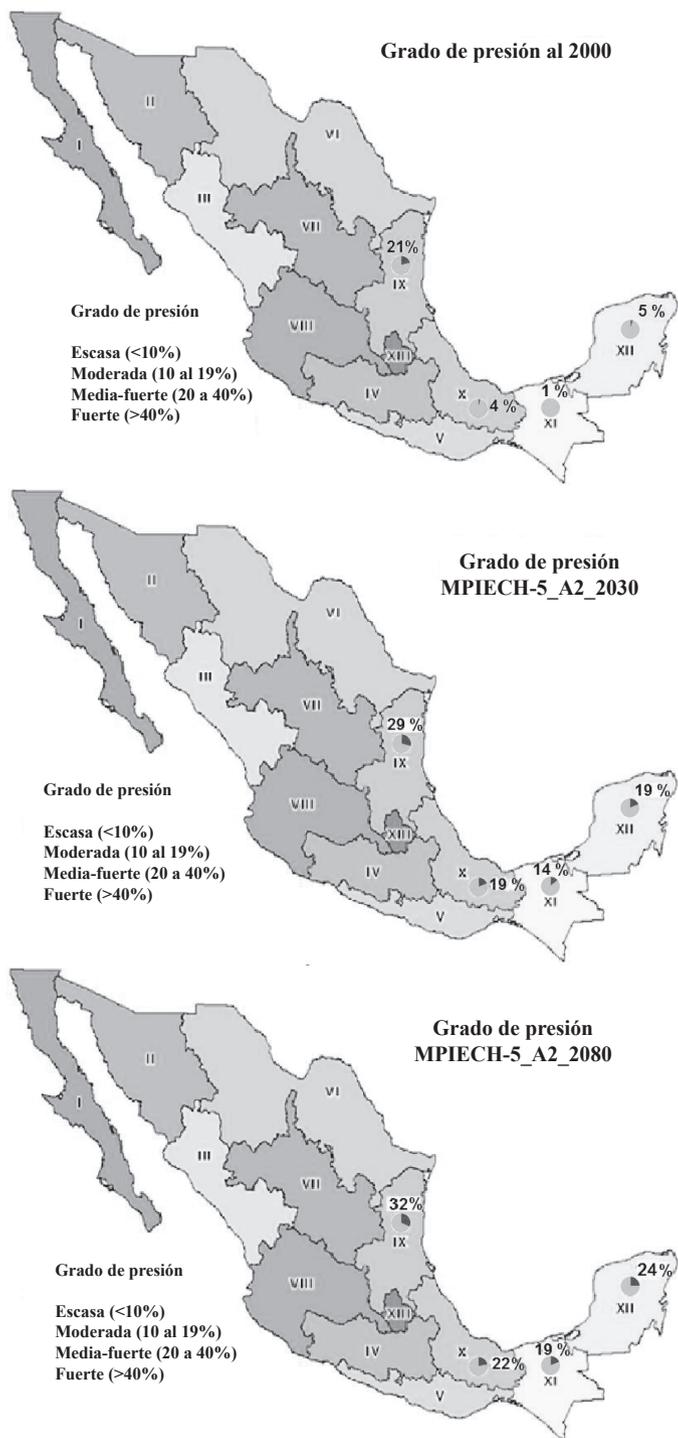
Con base en los resultados de la modelación realizada en el estudio que aquí se describió, las cuatro regiones hidrológico-administrativas de la CNA ubicadas en el Golfo de México, indiscutiblemente presentan tendencias a la disminución de los recursos hídricos como resultado de los efectos del cambio climático, excepto en los escenarios proyectados para la región XII por el modelo GFDLCM20 (tabla 6), en donde se proyectan aumentos pequeños en la relación P/T.

También, con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que las zonas climáticas en cada región hidrológico-administrativa pueden sufrir transformaciones importantes, pasando siempre a ser zonas más secas con respecto a su condición actual, lo que podría provocar cambios importantes en sus estructuras florística, faunística y en diversas relaciones ecosistémicas existentes, aspectos que deben ser estudiados y analizados en estudios posteriores.

El grado de presión sobre los recursos hídricos aumentará tanto por la vía de los efectos o impactos del cambio climático, como por los incrementos de la demanda de agua, lo que sugiere acciones inmediatas en cuanto a la planeación y manejo sustentable de los recursos hídricos en cada región hidrológico-administrativa, especialmente en el sector agrícola, el cual es el principal usuario de agua a nivel regional, nacional y global.

Lo anterior deberá dar por resultado el que se puedan desarrollar estudios tendientes a diseñar métodos, herramientas y a establecer elementos de juicio para la generación del conocimiento científico en materia de recursos hídricos que permita definir planes de manejo sustentable y políticas de uso racional del agua, de tal forma que se puedan incorporar en esos planes de manejo elementos climáticos-ambientales que influyen en la disponibilidad natural del agua, como también elementos socio-culturales que intervienen en la evolución de la demanda de agua.

Finalmente, el estudio realizado y los resultados mostrados en este capítulo se concentraron principalmente en el agua dulce resultante del ciclo hidrológico en las diferentes regiones hidrológico-administrativas de la CNA en el Golfo de México y en el impacto que el cambio climático puede tener en la disponibilidad de ese recurso hídrico. El efecto que el cambio



**Figura 3.** Evolución del grado de presión, modelo MPIECH-5, escenario A2.

climático tiene sobre la elevación del nivel medio del mar y el impacto que esto puede tener sobre los recursos hidráulicos en la zona costera, especialmente la intrusión de agua salina en acuíferos costeros y estuarios, quedó fuera de los alcances de este estudio debido a la falta de recursos económicos para llevar a cabo estudios de campo necesarios para estudiar el impacto de la sobre elevación del nivel medio del mar. En una continuación de este estudio se tiene contemplado estudiar este fenómeno con mayor detalle, para complementar los resultados mostrados en este estudio y tener una visión completa del impacto que el cambio climático va a tener en las zonas costeras de México.

## LITERATURA CITADA

- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu, y J.P. Palutikof (eds.), 2008. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 p.
- Conde, C., 2003. *Cambio y variabilidad climáticos: dos estudios de caso en México*. Tesis Doctoral. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México. 300 pp.
- Hulme, M.W., T.M.L. Barrow, E.M. Raper, S.C.B. Centella, A.S. Smith, y A.C. Chipanshi, 2000. *Using a Climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook*. Climatic Research Unit, UEA, Norwich, UK, 52 p.
- Servicio Meteorológico Nacional, 2009. <http://smn.cna.gob.mx/productos/normales/cnormales.html> (Fecha de consulta., Enero 20 de 2009)
- Urbano Terrón, P., 1995. *Tratado de Fitotecnia General*, 2ª edición, Ed. Mundi-Prensa, Bilbao. 885 p.
- Wigley, T.M.L., 1994. *MAGICC (Model for Assessment of Greenhouse Gas-Induced Climate Change): User's Guide and Scientific Research Manual*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 36 p.
- Wigley, T.M.L., 2003. *MAGICC/SCENGEN: User-friendly software for GCM inter-comparisons, climate scenario development and uncertainty assessment*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307, 27 p.



Carranza Edwards, A., A.P. Marín Guzmán, y L. Rosales Hoz, 2010. Problemática ambiental en la gestión costera-marina, p. 89-100. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Problemática ambiental en la gestión costera-marina

*Arturo Carranza Edwards, Ana Pilar Marín Guzmán y Leticia Rosales Hoz*

---

## RESUMEN

En la gestión costera-marina se necesita considerar la problemática ambiental tratando de encontrar la causa original de los problemas ambientales para así poder darles atención. El crecimiento exponencial demográfico del planeta es la causa primera y por ello es la primera que debe atenderse. Las manchas urbanas en las zonas costeras, la retención artificial de sedimentos, la contaminación y el cambio climático global se incrementan en función directa del crecimiento poblacional de la Tierra. Por ello, es fundamental crear conciencia para la planeación del crecimiento demográfico.

## INTRODUCCIÓN

Los litorales se pueden dividir en litorales rocosos y litorales no rocosos. Los litorales no rocosos pueden estar constituidos por gravas, arenas o lodos. En el ambiente de playa normalmente la energía del oleaje solo permite que se depositen arenas.

Las playas son acumulaciones de material no consolidado, normalmente constituido por arenas, en las zonas costeras (Komar, 1976). Dentro de la gestión costera-marina es uno de los ambientes más sensibles a un mal manejo ambiental.

El límite superior de las playas está dado por el dominio terrestre y puede estar constituido por vegetación, dunas activas, dunas estabilizadas, arbustos e incluso construcciones adyacentes a las playas. En cambio el límite hacia el mar está constituido por el contacto entre el ambiente de playa y el ambiente de plataforma continental. Este límite es altamente variable dado que las acumulaciones no consolidadas entrarán en movimiento cuando la ola “siente” el piso marino. En este momento las partículas del fondo sufren un movimiento de traslación mar-tierra, tierra-mar. Dependiendo del ángulo que tenga el tren de oleaje con respecto a la línea de costa será que el transporte litoral se iniciará en una dirección o en otra. Si el tren de oleaje no forma un ángulo con la línea de playa, entonces el transporte será perpendicular a la línea de costa, en cuyo caso es frecuente observar cuspidos “*beach cusps*” (Shepard, 1967) que favorecen las corrientes de retorno, tan peligrosas para los bañistas.

En la porción profunda de la playa conocida como infraplaya (Carranza-Edwards y Caso-Chávez, 1994; Carranza-Edwards, 2001; Carranza-Edwards *et al.*, 2004) las partículas tenderán a ser más finas que en la porción somera, en la cual el oleaje y las corrientes litorales imprimen una mayor energía a la playa que será responsable de que en la porción somera de infraplaya se presenten partículas más gruesas. De esta manera la infraplaya presenta la tendencia a sedimentos finos a profundidad y sedimentos gruesos en la zona de rompientes. En condiciones de tormentas severas el mar puede transportar hacia tierra gravas del tamaño de peñascos impactándose con gran fuerza en las construcciones costeras (figura 1). Un caso más espectacular fue el del buque pesquero cubano Portachenera I, que se impactó contra un hotel de Cancún en septiembre de 1988 cuando el Huracán Gilberto alcanzó una magnitud de 5 en la escala Zaffir-Simpson.

En contraste, en la plataforma continental somera las partículas más finas tenderán a depositarse. No obstante cuando se presentan condiciones de tormentas o de tsunamis, la porción somera de la plataforma continental pasará a ser parte de la infraplaya. Y los sedimentos finos que se encontraban en reposo entrarán en movimiento pudiendo alcanzar las partes altas de la playa generándose fuertes variaciones sedimentológicas y químicas con un consecuente impacto hacia la fauna bentónica de las playas.

El objetivo de este capítulo es destacar la importancia de conservar en buenas condiciones las porciones más someras de la plataforma continental para propiciar la existencia de playas limpias de contaminantes.



**Figura 1.** La remoción de sedimentos finos, en ocasiones cargados de contaminantes, está en función del tamaño de ola. Incluso grandes bloques de rocas son lanzados hacia la costa en épocas de tormentas.

## **PROBLEMÁTICA GENERADA POR DIVERSAS ACTIVIDADES ANTRÓPICAS**

De acuerdo con McFalls (1991) y Keller (1996) la población mundial continúa en crecimiento (figura 2) y como consecuencia las zonas costeras empiezan a recibir un mayor impacto por desarrollos demográficos acelerados. Aún cuando los impactos antrópicos pueden ser muy numerosos y diversos, aquí solamente se consideran a continuación algunos de los más importantes.

### **EL CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN COMO FUENTE ORIGINAL DE TODOS LOS PROBLEMAS AMBIENTALES**

Nuestro planeta es finito. Si no lo fuese, quizá el desarrollo sustentable sería ilimitado. La realidad es otra: a medida que crece la población mundial, todos y cada uno de los diversos ambientes naturales se verán afectados tarde o temprano por las actividades de los habitantes de la Tierra.

En la figura 2 se aprecia un abrupto cambio en la pendiente de la curva de crecimiento demográfico a nivel mundial, este quiebre en la pendiente tiene lugar aproximadamente en la época de la Revolución Industrial, que también fue una época en que la ciencia y la tecnología se empezaron a desarrollar. Este desarrollo ha sido cada vez más espectacular en tal forma que esta curva en su pendiente más inclinada tiende a ser casi vertical. No obstante se puede considerar

que las ciencias sociales no han podido impactar en poner un alto al crecimiento poblacional.

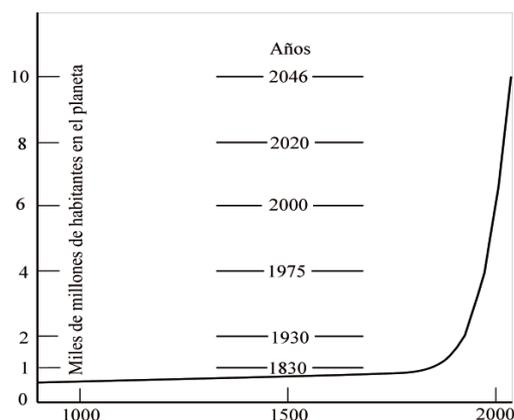
¿Qué pasa cuando hay exceso de población? Evidentemente habrá una mayor demanda de recursos naturales tanto renovables como no renovables.

El consumo de recursos naturales normalmente se manifiesta por cambios en el uso de suelo. Esto es, el terreno boscoso se pierde para dar lugar a terreno agrícola el cual es sustituido por un uso de suelo urbano y/o industrial (figura 3). La consecuencia de esto es que en las zonas montañosas la infiltración va a disminuir debido a que las raíces de los árboles que fueron eliminados ya no retendrán el agua en el suelo, de esta manera disminuye la infiltración y crece el escurrimiento.

Los sedimentos erosionados serán de partículas finas (el limo es uno de los componentes más abundantes del suelo vegetal) y además durante su transporte hacia la costa el tamaño de partícula disminuirá aún más, en tal forma que llegarán sedimentos más finos hacia el mar, los cuales no podrán ser retenidos en la playa dada la alta energía de este ambiente. La resultante obtenida se puede traducir como que la playa será más angosta y la erosión será mayor. Este daño ambiental no solo afecta a especies como las tortugas sino que la infraestructura turística también será vulnerable. La curva de deterioro ambiental sería inversa a la del crecimiento de la población y el daño tenderá a ser también exponencial y posiblemente irreversible.

**EFFECTOS DE LA MANCHA URBANA SOBRE LOS SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS DE LAS LLANURAS COSTERAS PRÓXIMAS A LAS PLAYAS**

Los aluviones del cuaternario son materiales permeables que permiten la infiltración de aguas pluviales. Estas infiltraciones son responsables de que el nivel freático se encuentre próximo a



**Figura 2.** Curva que representa el crecimiento exponencial de la población del planeta (modificado de McFalls, 1991; Keller 1996).

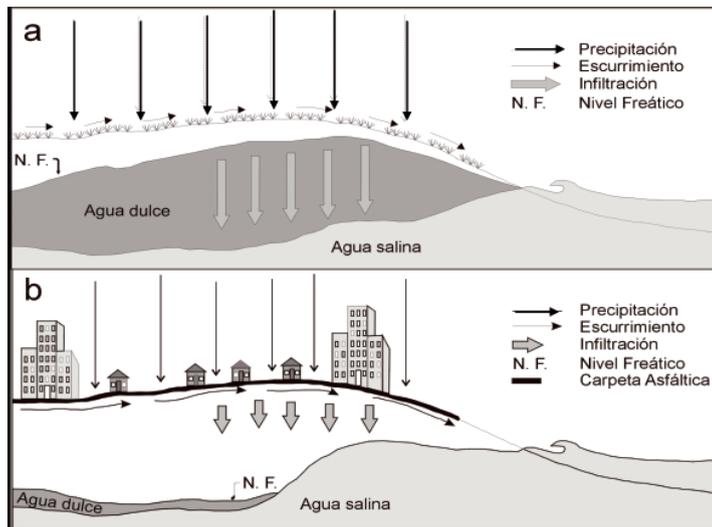


**Figura 3.** Ejemplos de cambios en el uso de suelo. Vista desde las pirámides de Teotenango, Mex. Se aprecian diversos usos de suelo (urbano, agrícola, boscoso).

la superficie del terreno. Cuando grandes regiones de estas llanuras quedan cubiertas por las “manchas” urbanas se reduce o disminuye la infiltración (figura 4) y se incrementa el escurrimiento y las aguas pluviales llegan al mar por tuberías, canales o escurrimientos directos, etc. Esto trae como consecuencia que el nivel freático descenderá de manera continua hasta que el nivel de las aguas salinas del mar y el nivel de las aguas dulces freáticas coincidan; entonces se favorece la formación de intrusiones salinas tierra adentro. Si además hay bombeo de pozos en acuíferos libres, la salinización de los terrenos próximos al mar se incrementará tanto que puede ser irreversible. Cuando se presenta la salinización de las zonas costeras se afecta incluso el crecimiento de la vegetación (figura 5).

### RETENCIÓN DE SEDIMENTOS LITORALES DEBIDO A OBRAS DE INFRAESTRUCTURA

En las playas hay un balance entre erosión y depósito (figura 6). Si este balance se pierde entonces se presenta un “dogma científico”, *i.e.* a toda erosión corresponde un depósito y a todo depósito corresponde una erosión. En ocasiones la construcción de espigones, escolleras, marinas, muelles, etc., constituyen barreras al transporte natural de los sedimentos litorales. En estos casos el fenómeno de retención de sedimentos tendrá lugar (Marín y Carranza, en prensa) y de un lado de la playa puede haber ensanchamiento mientras que en el otro el adelgazamiento puede en ocasiones hacer que la playa desaparezca con el consecuente daño a la fauna litoral y a las propias obras de infraestructura en zonas costeras (figura 7). Un dogma (científico) es que si en una localidad se presenta erosión en otra habrá depósito y viceversa (Carranza-Edwards,



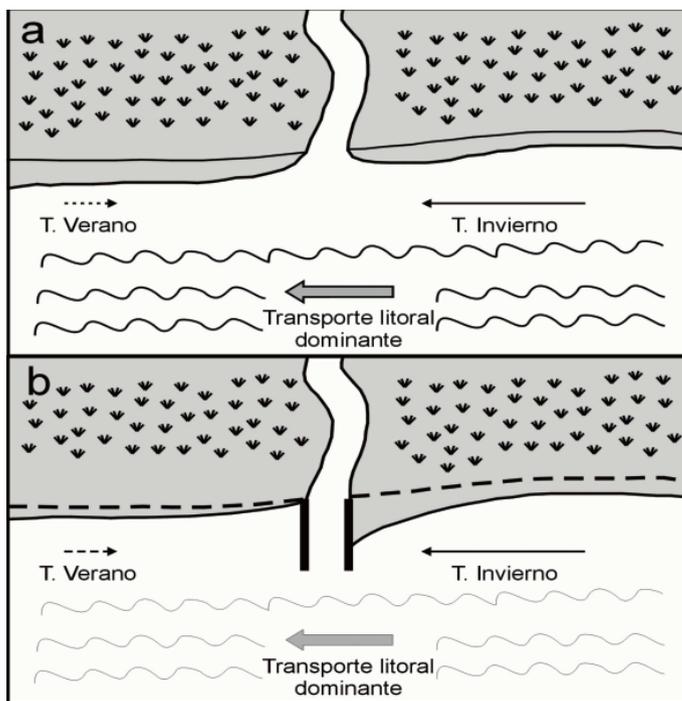
**Figura 4.** Este croquis representa el efecto que puede tener nivel freático de un acuífero costero cuando el crecimiento de la mancha urbana disminuye las infiltraciones e incrementa los escurrimientos. a) Condiciones naturales del terreno (el riesgo de inundaciones se incrementa). b) Condiciones de terreno urbanizado.



**Figura 5.** El crecimiento de una palmera inhibido por la salinización del terreno.



**Figura 6.** En este diagrama se observa una balanza que representa el sensible equilibrio dinámico que debe existir entre la erosión y el depósito.



**Figura 7.** La interrupción del transporte litoral dominante produce erosión a un lado de la barrera constituida por las escolleras y depósito en el otro lado.

en prensa). El mismo efecto que se produce por la presencia de escolleras se puede producir por tuberías que descansan sobre la superficie del piso de la playa sumergida o bien por la construcción de marinas, canales o puertos que también afectarán el transporte litoral natural.

Es muy importante tomar en cuenta que a medida que las actividades antrópicas crecen se presentará una relación directa con el daño ambiental de las zonas costeras. En la figura 8 se presenta un semáforo ambiental que indica que en el pasado existió un ambiente, en el presente un medio ambiente y de no regresarse a las condiciones previas, entonces se llegará en el futuro a  $\frac{1}{4}$  de ambiente. Así como existen semáforos volcánicos, sería conveniente desarrollar semáforos ambientales con rangos variables tal vez desde 1 hasta 10, donde el 1 representaría un desarrollo sustentable.

Carranza (en prensa) señala que el represamiento de los ríos en tierras altas e incluso distantes de la costa, retendrá los sedimentos más gruesos en las regiones próximas a la desembocadura de los ríos en dichas presas. Entonces los sedimentos que llegarán al mar serán también más finos, las playas reducirán su anchura y los sitios de anidación de tortugas por ejemplo irán desapareciendo (Martínez Correa, 2010).

En el caso particular del Sistema Arrecifal Veracruzano se ha perdido aparentemente la presencia de un delta sumergido que aparece en mapas antiguos y en estudios más recientes ese delta ya no se observa (Rosales-Hoz *et al.*, 2007, 2009; Marín-Guzmán, 2009). Dado el represamiento aguas arriba del río Jamapa, los sedimentos que llegan al mar son más finos y el daño potencial que pueden producir en los corales es enorme.

## **VERTIMIENTO DE CONTAMINANTES EN EL MAR**

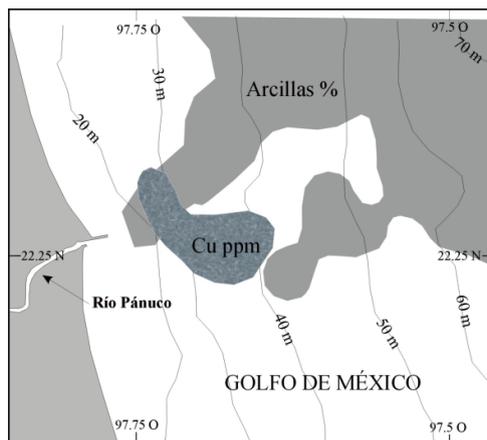
La contaminación por metales pesados en los ríos que drenan hacia el mar es un problema muy serio pues el almacenamiento de estos metales no necesariamente se va a manifestar directamente en el río, ya que se encuentran en tránsito. Los ríos al llegar al mar van a ir cargados con sedimentos lodosos y con metales pesados, los cuales no se van a depositar en las aguas someras que de manera continua son removidas por el oleaje y las corrientes litorales. El destino “final” será en aguas profundas donde los sedimentos lodosos (limos y arcillas) se depositarán en aguas más profundas donde el tiempo de residencia se incrementa, de esta manera los metales pesados se irán incorporando paulatinamente en los sedimentos finos del fondo marino.

Un ejemplo que se puede citar es el del río Pánuco, que en realidad nace desde la Ciudad de México donde los colectores de aguas negras llevan sus aguas hacia el río Tula, de ahí pasan al río Moctezuma y finalmente al río Pánuco. En época de tormentas los sedimentos más finos pueden ser removidos y arrojados contra la playa produciendo contaminación de playas limpias.

Las aguas de la desembocadura de este río también se alimentan con aguas potencialmente contaminadas de las lagunas costeras asociadas. En la figura 9 se observan las concentraciones de cobre en la plataforma continental interna y se aprecia que la concentración mayor que 20 ppm de Cu se ubica en profundidades menores que 40 m. ¿Puede haber deterioro ambiental



**Figura 8.** El Semáforo Ambiental. Si en el presente las actividades antrópicas no son sustentables la calidad ambiental disminuirá irremediablemente en el futuro.



**Figura 9.** El río Pánuco arroja diversos metales pesados. El Cu se encuentra en concentraciones superiores a 20 ppm en profundidades comprendidas entre 20 m y 40 m. La arcilla aparece sombreada en concentraciones mayores que 20 %. (Batimetría modificada de Rosales *et al.*, 2005).

en las playas en época de tormentas o de tsunamis? Es muy probable que esto suceda ya que en estos casos habrá una mayor longitud de ola que removerá las partículas más finas que se habían depositado en aguas profundas, pues estas entrarán en movimiento y serán llevadas hacia la playa, como sucede con sedimentos de plataforma en época de nortes (fondos arenosos) y de lluvias (fondos lodosos) en la plataforma adyacente al río Papaloapan (Gómez Rocha, 2010). Es entonces cuando el daño producido a la naturaleza es devuelto hacia las poblaciones costeras. Es por ello que la basura y la contaminación no deben esconderse en el mar como si se tratara de una alfombra. Esto obliga a que las aguas fluviales lleguen siempre limpias al mar las 24 horas del día y no solamente durante el día.

## VULNERABILIDAD DE PLAYAS INCREMENTADA POR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

El calentamiento global que sufre nuestro planeta, principalmente por el exceso de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, produce el deshielo de los casquetes polares de manera exponencial. Recordemos que también es exponencial el crecimiento de la población del planeta.

El frente de los glaciales de Alaska (figura 10) retrocede año con año y es una evidencia directa del efecto invernadero.

Este fenómeno tiene una causa antrópica, la cual aunada con los problemas ambientales ya mencionados nos enfrenta a un panorama ambiental aún más adverso, ya que al derretirse los casquetes polares el nivel del mar asciende y entonces la erosión de las zonas costeras de me-



**Figura 10.** Deshielo de un glaciar en fiordos de Alaska. Los efectos antrópicos ya existentes se verán amplificados por el ascenso del nivel del mar. Para escala obsérvese el buque de varias cubiertas que se encuentra en el centro inferior de la fotografía.

nor pendiente será más dramática que la erosión de zonas costeras con un relieve montañoso próximo a la línea de playa. Ahora más que nunca resulta fundamental realizar monitoreos continuos a lo largo de los litorales mexicanos, al menos en las áreas más industrializadas, turísticas y pobladas.

Paralelamente con este monitoreo es muy recomendable que las nuevas obras de infraestructura en regiones costeras realicen pronósticos erosivos a corto, mediano y largo plazo y establecer líneas de retroceso costero en función de esos plazos, como es sugerido por Keller (1996).

Aparentemente el cambio climático es causante de que las trayectorias de huracanes en el Golfo de México con el tiempo vayan siendo más numerosas, de mayor magnitud y más desplazadas hacia el sur del Golfo y Caribe (Carranza-Edwards, *et al*, 2004), que son regiones prioritarias para nuestro país por el desarrollo petrolero, pesquero, turístico y urbano.

## CONCLUSIONES

El deterioro ambiental en playas se relaciona directamente con el exceso de la población, que es la causa original de la problemática ambiental a nivel global. Por ello todos los países deben hacer un esfuerzo para planificar el crecimiento de la población de manera racional.

El crecimiento de las ciudades costeras produce una disminución en la recarga de los acuíferos libres y un incremento del escurrimiento sobre la superficie del terreno por el efecto de las construcciones y carpetas asfálticas o de cemento. Es prioritario que el piso urbano se construya en tal forma que se impida la modificación de la infiltración de las aguas pluviales. En pisos

ya construidos se recomienda su reemplazamiento por materiales permeables que permitan el libre flujo de las infiltraciones de agua dulce.

La construcción de infraestructuras en costas que modifiquen el transporte litoral (*e.g.* escolleras, marinas, tuberías sobre el piso marino, etc.) es responsable de la interrupción del transporte litoral de sedimentos produciéndose una disminución en el ancho de las playas.

El represamiento de ríos produce que las playas también se angosten y que los ríos aporten sedimentos más finos que no son constructores de playas. Es fundamental resolver el problema complejo de la retención de sedimentos gruesos en los represamientos, ya que su consecuencia impacta tanto a sitios de anidación de tortugas como a la calidad de las aguas en zonas arrecifales.

El vertimiento de aguas contaminadas hacia el mar no se siente directamente en la playa sino que se favorece hacia partes profundas donde existen condiciones para la depositación de contaminantes asociados con partículas finas para evitar que en épocas de tormentas estos contaminantes vayan hacia la playa, se debe lograr que las aguas vertidas al mar sean libres de metales todo el tiempo.

El cambio climático global al producir deshielos de casquetes polares y glaciares, produce una elevación del nivel del mar que será más notorio en las regiones de muy bajo relieve donde las pendientes son próximas a la horizontal y esto se da tanto en costas del Golfo de México y el Caribe como en la llanura costera de los estados de Sinaloa y Sonora, así como en la llanura costera occidental de la península de la Baja California.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las autoridades del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, al Centro EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche y a la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Campeche por el apoyo y las facilidades brindadas para la realización de este trabajo. Se agradece al M. en C. Eduardo Morales de la Garza y a la QFB. Susana Santiago Pérez por su apoyo con los análisis de laboratorio. A la tripulación del B/O Justo Sierra por su valiosa colaboración durante los muestreos.

## LITERATURA CITADA

- Carranza-Edwards, A., 2001. Grain size and sorting in modern beach sands. *Journal of Coastal Research*, 17(1):38-52.
- Carranza-Edwards, A. y M. Caso Chávez, 1994. Zonificación del perfil de playa. *Geo-UNAM*, 2 (2):26-32.
- Carranza Edwards A., L. Rosales Hoz, M. Caso Chávez, E. Morales de la Garza, 2004. La Geología Ambiental de la Zona Litoral. Volumen I: 573-602. En: M. Caso, I. Pisanty y E. Ezcurra (Comp.). Diagnostico Ambiental del Golfo de México. Semarnat-INE, Instituto de Ecología, A.C. y Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies.

- Carranza, A. (en prensa). Causas y consecuencias de la erosión de playas. Año Internacional del Planeta Tierra. Publicado en línea en Publica tu Obra.
- Komar, P. D., 1976. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice-Hall, New Jersey, 429 p.
- Marín Guzmán, A. P., 2009. Estudio de sedimentos superficiales de la plataforma continental somera, frente al Río Jamapa, Veracruz, México. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Marín A. P. y A. Carranza (en prensa). Inferencia de transporte litoral dominante en el Golfo de México. Año Internacional del Planeta Tierra.
- Gómez Rocha G., 2010. Estudio sedimentológico de la plataforma continental somera en el suroeste del Golfo de México, adyacente al río Papaloapan. Maestría en Ciencias del Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Keller, E. A., 1996. *Environmental Geology*. Ed. Prentice-Hall.
- McFalls A. Jr., 1991. Population: A lively introduction. *Population Bulletin*, 46(2): 4.
- Martínez Correa, J. R., 2010. Importancia de la textura de los sedimentos de playa y su relación con anidaciones de tortugas marinas mexicanas. Tesis de Licenciatura de la Facultad de Ciencias, Carrera de Biólogo.
- Rosales Hoz L., A. Carranza Edwards, S. Santiago Pérez, y E. Morales de la Garza, 2005. Spatial trends in the geochemical composition of sediments in the Pánuco River discharge area, Gulf of Mexico. *Environmental Geology*, 48:496-506.
- Rosales-Hoz L., Carranza-Edwards A. y O. Celis Hernández, 2007. Environmental implications of heavy metals in surface sediments near Isla de Sacrificios, Mexico. *Bull Environ Contam Toxicol* (2007) 78:353-357.
- Rosales-Hoz, L., A. Carranza-Edwards, L. San Vicente-Añorve, M. A. Alatorre-Mendieta, y F. Rivera-Ramírez, 2009. Distribution of dissolved trace metals around a coral reef in southwestern Gulf of Mexico. *Bull. Environ. Cont. Toxicol.*, (2009) 83: 713-719.
- Shepard, F. P., 1967. *Submarine Geology*, Harper and Row, New York.



Ortiz Pérez, M.A., I. Sommer Cervantes, y O. Oropeza Orozco, 2010. Criterios para estimar la vulnerabilidad física de las costas de barrera ante los impactos hidrometeorológicos, p. 101-124. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Criterios para estimar la vulnerabilidad física de las costas de barrera ante los impactos hidrometeorológicos

*Mario A. Ortiz Pérez, Irene Sommer Cervantes y Oralia Oropeza Orozco*

---

## RESUMEN

Las barreras litorales son estructuras naturales que se desarrollan enfrentadas a las costas y que les confieren un albergue y protección muy efectivo en contra de los impactos de los agentes meteóricos, tales como vientos y oleajes de marea; específicamente durante los eventos en que se despliega mayor energía, tales como huracanes, tormentas e incluso los cambios inducidos por las elevaciones del nivel del mar. Para evaluar la vulnerabilidad física de las costas se ha recurrido a una serie de variables que luego se conjuntan para conformar índices de vulnerabilidad. La aplicación de esta metodología se ha llevado a cabo de manera indiscriminada, resultando en una sobre-estimación de la vulnerabilidad en el caso de las costas protegidas por barreras. El presente trabajo se aboca a la selección y desarrollo de variables y criterios específicos para evaluar la vulnerabilidad física, considerando la presencia de barreras. Este aporte es especialmente importante cuando se trata de litorales en los que abundan este tipo de estructuras como es el caso del Golfo de México. El cálculo de los índices de vulnerabilidad obtenido considerando estos criterios será mucho más realista que los desarrollados a la fecha.

## INTRODUCCIÓN

El término de barrera en general, se utiliza para designar a un cuerpo de loma arenosa de trazo elongado, usualmente paralelo a la playa que se eleva por arriba de la marea alta, separado de la margen continental a través de un cuerpo de agua conocida como laguna de barrera; en muchos casos constan de depósitos arenosos con fragmentos de conchas, su formación es favorecida por la dinámica propia de las corrientes costeras, o bien, son de origen biogénico formando una barrera arrecifal; pueden presentarse como unidades independientes enfrentadas a la costa continental o estar unidas a la costa en cortos trechos a manera de penínsulas.

Su función natural entre varias más, es la de absorber la energía del océano amortiguando los efectos de los Nortes, huracanes y otro tipo de tormentas. Por lo que su presencia y sus características morfoespaciales en un litoral marcan una gran diferencia con respecto a una playa descubierta, en cuanto a su resistencia ante los impactos hidrometeorológicos y aquellos que deriven del ascenso del nivel del mar al que nos enfrentamos.

Las barreras litorales arenosas son sensibles a los cambios ambientales y su vulnerabilidad física, está dada por la convergencia de diversos factores físicos y antrópicos. Entre ellos se consideran; la magnitud, la frecuencia y la interacción de procesos marinos e hidrometeorológicos; la configuración geomorfológica, el desarrollo de los suelos y la vegetación y el impacto por la alteración humana.

A la fecha, los estudios llevados a cabo para establecer su vulnerabilidad física, no discriminan entre las costas abiertas y aquellas protegidas por barreras, en ellos se sugiere la medición de una serie de variables que sirven de base para el cálculo de índices de vulnerabilidad, mismos que permiten comparar distintos escenarios costeros y jerarquizarlos. Entre los trabajos más representativos en este sentido pueden citarse los de Thieler y Hammer-Klose (1999), Diez *et al.* (2007), Kokot *et al.* (2004) y la propuesta de Gornitz (1990).

En este trabajo, se proponen una serie de variables para distinguir entre la vulnerabilidad de tramos protegidos por barreras de aquellos que no lo están.

Las variables consideradas surgen a partir de la sistematización de información recabada por Ortiz (1988, 1992), Ortiz *et al.* (*en prensa*) y Hernández *et al.* (2008); y se refieren primordialmente a características geomorfológicas relevantes en los procesos evolutivos de las barreras. Además, se dio énfasis en que los rasgos considerados sean evidentes en imágenes de satélite o fotografías aéreas; que los métodos de evaluación sean sencillos (principalmente conteos, promedios y mediciones de longitudes) y que sean útiles para el cálculo de los índices de vulnerabilidad por los métodos recomendados en la literatura.

## CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BARRERAS

Por su origen y posición transitoria o efímera las barreras litorales se ubican entre las estructuras más dinámicas de la costa porque nunca se consolidan de forma plena, no son perdurables y son siempre inestables en sus ritmos de crecimiento y recesión. Dependen para su existencia de grandes cantidades de arena, surtida de manera casi permanente por las fuentes continentales

a través de deltas, estuarios y escurrimientos superficiales de varios tipos. Por otra parte, los trenes de oleaje marino re-mobilizan los sedimentos a través de corrientes playeras conocidas como corrientes de deriva litoral, mismas que redistribuyen los sedimentos a lo largo de la costa. Así, se establece un flujo a manera de verdaderos ríos de arena a lo largo de la zona de rompientes que recorre decenas y aun cientos de kilómetros a lo largo de las playas simulando una cinta sin fin que porta sedimentos. Estas corrientes de deriva litoral pueden cambiar de dirección conforme a diversos factores, de manera que llegan a adoptar flujos de sentido bidireccional.

El oleaje forma parte de los procesos de edificación de la barra al socavar y elevar los gradientes de pendiente de la playa, superficie que al descender la marea pasa a ser modelada por acción de la deflación. La sucesión de eventos meteóricos re-elabora la barrera sin cesar, cuya forma se adapta a la expansión o reducción espacial de los sedimentos, adoptando orientaciones tanto en sentido longitudinal como perpendicular a la costa, en términos de la amplitud o estrechamiento en su anchura y en la morfología de la componente vertical ya sea ganando o perdiendo altura.

El comportamiento de las barreras está sujeto a periodos que varían desde los diarios (24 h) hasta los geológicos (miles de años), lo que les imprime una fuerte dinámica de cambio. El modelado morfodinámico se puede presentar a través de pulsos de variación diaria, mediante la ocurrencia de mareas, de distintos intervalos y dirección de los trenes de oleaje y de ráfagas y brisas de viento, cambios que traen aparejadas variaciones de temperatura, humedad, insolación y luz.

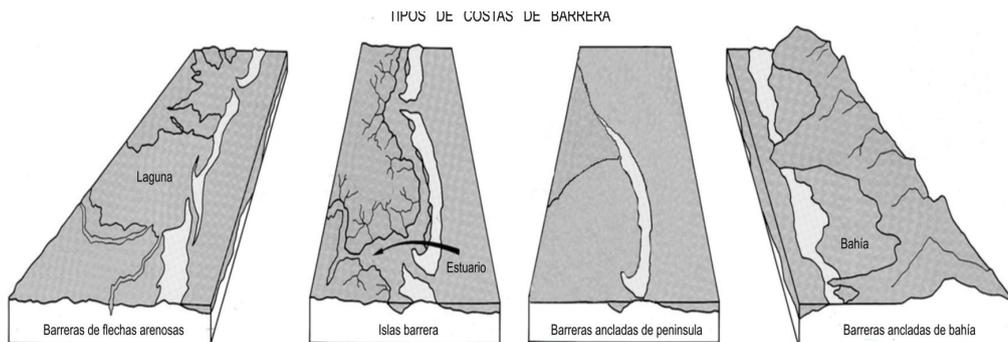
Todos estos procesos en conjunto tienen como consecuencia final, guarecer las márgenes continentales creando una zona de transición de aguas interiores esto es, un medio más abrigado que propicia la instalación de lagunas circundadas de ciénagas, humedales, planicies de inundación, salinas y petenes que son ecosistemas que se caracterizan entre otras cosas, porque en ellos dominan condiciones de baja energía física.

Por su organización de arreglo estratégico, las costas de barrera las catalogamos según su grado de exposición relativa a la influencia directa de la materia y la energía provenientes de mar abierto, de este modo, encontramos que hay una variedad de arreglos de distribución como: barreras de flechas arenosas, islas barrera, barreras ancladas de península y barreras ancladas de bahía entre otras (figura 1).

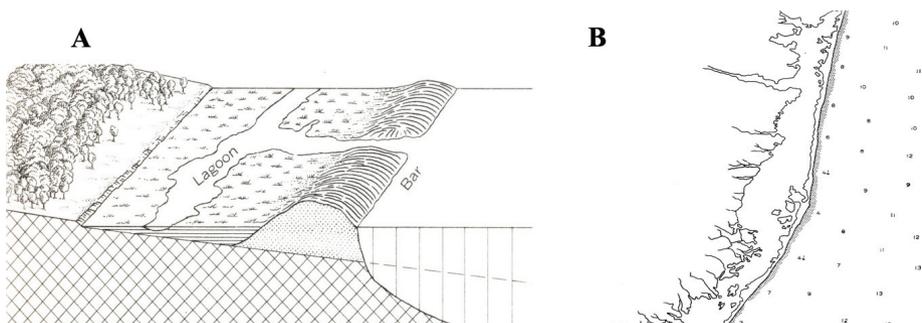
El patrón más común de emplazamiento es el de la barrera que se separa de tierra firme a través de una laguna (figura 2).

La estructura espacial de franjas paralelas formadas por el cuerpo arenoso, las planicies de inundación, la superficie del cuerpo de aguas protegidas y la franja de la margen continental constituirán la zona buffer o de amortiguamiento esencial.

Otro patrón de distribución de mayor complejidad resulta del arreglo de la disposición de barreras dobles o más, que proporcionarán un abrigo mayor, con la posibilidad de la proliferación de humedales entre barreras. Un ejemplo de barreras múltiples se presenta en la figura 3.



**Figura 1.** Principales tipos de costas de barreras (Modificada y adaptada a partir de Wells (s/f)).



**Figura 2.** A) Vista de un modelo idealizado de una costa de barrera, B) A una escala más generalizada, una vista en planta de una porción del tipo de costa en cuestión, en la representación de una carta náutica.



**Figura 3.** Imagen oblicua de una costa de barrera con el frente de la isla barrera en primer plano, en el plano medio una segunda barrera y en la parte superior otra más.

## VULNERABILIDAD FÍSICA DE LAS BARRERAS

La vulnerabilidad de un elemento o de un sistema, se define como la dificultad o falta de capacidad del mismo para recuperarse del daño producido por un fenómeno natural o humano peligroso. Muchas veces se utilizan como sinónimos de vulnerabilidad: fragilidad, sensibilidad y/o debilidad. Hay quienes diferencian vulnerabilidad intrínseca, referida a cuando el sistema es frágil por sí mismo y vulnerabilidad extrínseca, que expresa la intensidad de las causas externas que provocan el daño. Su cuantificación es difícil, ya que muchas veces los fenómenos están poco estudiados y las relaciones causa efecto no están definidas o comprobadas.

En el caso de las barreras litorales por ejemplo, muchas de las características que podrían interpretarse como promotoras de la vulnerabilidad, son también expresión del proceso evolutivo o de la dinámica natural e inestable que las caracteriza, por lo que la selección de variables debe ser conducida con mucha cautela.

Entre los trabajos para evaluar la vulnerabilidad de los litorales se pueden referir los de Thieler y Hammer-Klose (1999), Diez *et al.* (2007), Kokot *et al.* (2004) y Gornitz (1990). Una estrategia común en todos ellos es el cálculo de un índice de vulnerabilidad en donde se agrupa y combina una serie de variables para obtener un valor único que permita jerarquizar los tramos de costa de interés, con base en su mayor a menor vulnerabilidad física.

El procedimiento metodológico exige la consideración de los factores propios de los procesos marinos e hidrometeorológicos que se califican de mayor a menor por su grado de magnitud y frecuencia; a éstos se integran los factores indirectos como geológicos y geomorfológicos. Las variables consideradas en el índice de vulnerabilidad costera de Thieler y Hammer-Klose (1999) en un esquema muy generalizado son:

Elevación media de la franja costera (v1), resistencia del substrato geológico a la erosión (v2), carácter acumulativo del microrelieve (v3), altura media de las olas (v4), intervalo del régimen de mareas (v5), susceptibilidad a inundaciones fluviales y a penetraciones marinas por huracanes (v6), pendiente media de la playa (v7), estructura geomorfológica de la costa (v8), descomposición de la dirección dominante del viento en ramas de quince grados (v9), número y duración de las tormentas (v10), retroceso de la línea de costa (v11), magnitud de la velocidad de desplazamiento tectónico vertical actual (v12).

Estos parámetros, tanto cuantitativos como cualitativos, deben codificarse en una gradación numérica con valores ordinales de 1 al 5 siempre en función de la influencia que ejerce cada parámetro en la vulnerabilidad física de la costa. Las magnitudes o situaciones más críticas se codifican con los valores más altos, es decir, 4 o 5. Finalmente se aplica la fórmula siguiente

$$\sqrt{\frac{v1 \cdot v2 \cdot v3 \cdot v4 \cdot v5 \cdot v6 \cdot v7 \cdot v8 \cdot v9 \cdot v10 \cdot v11 \cdot v12}{12}}$$

Los tramos costeros que presenten los mayores valores del índice de vulnerabilidad física corresponden con las zonas de más alta susceptibilidad y deben estar sujetas a programas de ordenamiento territorial.

Este esquema no es aplicable a las costas con protección de barrera ya que éstas presentan particularidades para absorber la energía física del viento, el oleaje y las precipitaciones intensas; sin embargo se pueden seguir los mismos pasos metodológicos propuestos por estos autores, pero con la inclusión de variables que representen y reflejen la naturaleza de las costas de barrera.

## IMPORTANCIA DE LAS COSTAS DE BARRERA EN EL GOLFO DE MÉXICO

En el inventario regional de las costas del Golfo de México, Ortiz y De La Lanza (2006) establecen que las costas de barrera son las más representativas del litoral, además de presentar una gran diversidad de formas y multitud de disposiciones espaciales, (un ejemplo se presenta en la figura 4.) por lo que su descripción y estudio representa una gran oportunidad para establecer su valor y funcionalidad para la protección de las costas interiores continentales y de si mismas.

Los autores llevan a cabo una evaluación comparativa de las costas protegidas y desprotegidas, para ello diferencian dos tipos

**Costas frontales:** pueden ser continentales o no, son abiertas y externas, expuestas al embate directo de la energía física del océano, sujetas a una mayor inestabilidad, ya que se modifican continuamente por erosión, abrasión, transporte y acumulación con cambios morfológicos significativos.



**Figura 4.** Detalle del cordón frontal de duna, parcialmente cubierta de vegetación rastrera. Fotografía de una vista de la barrera de Sian Kan.

**Costas internas:** Corresponden a las orillas internas o de sotavento de la barrera y a la costa continental protegida por la misma. Las orillas internas de la barrera reciben una transferencia menor de energía al localizarse en una zona albergada, por ello dominan procesos de acumulación de sedimentos que provienen de la deflación de la propia barrera, pues usualmente ésta se halla compuesta de campos de dunas y del cordón frontal arenoso de playa. La formación de abanicos de desplazamiento originados durante las tormentas representa uno de los mecanismos más activos de relleno y expansión de las orillas y de la acreción del fondo de las aguas interiores. En tanto que las costas continentales protegidas, están cimentadas en una estructura geológica de mayor edad y evolución, se presentan siempre emergidas, con contactos más contrastados debido a la topografía de la porción continental. No incluyen las zonas deltáicas, los estuarios y en general los ambientes de transición más recientes que cubren a las estructuras geológicas más antiguas.

Los resultados que se presentaban en la tabla 1 y la figura 5, muestran que del total de longitud (2 768.7 km) de las costas frontales del Golfo de México 93% corresponde a costas de barrera. Que las costas internas incrementan la longitud (4 900 km) de las costas externas en casi 80%. Las márgenes internas de las barreras contribuyen con 37% a la extensión total del litoral protegido, en tanto que las márgenes de litoral continental protegido por las barreras representan 63% de la extensión total de litoral protegido. Estos valores dejan de manifiesto la gran importancia que representan las barreras para la protección de las costas continentales en el Golfo de México; considerando que el ascenso del nivel del mar promedio para la zona se reporta de manera general de 1.08 cm por año para el puerto de Veracruz (Zavala, comentario personal). Resulta evidente la amenaza que se cierne sobre los litorales y la necesidad inaplazable de generar propuestas de conservación y manejo para hacer frente a dichos efectos.

**Tabla 1.** Caracterización de la costa litoral del Golfo de México considerando la magnitud de las islas de barrera.

		Costa frontal (km)	Costa interna (km)
<b>Costa frontal con barrera</b>		2 560	
	<b>Costas internas</b>		
	Margen interna de la barra		1 795
	Margen interna continental		3 105
<b>Costa rocosa</b>		146.4	
<b>Bocanas y discontinuidades</b>		62.3	
<b>Totales</b>		2 768.7	4 900
			7 668.8



**Figura. 5** Distribución de los tramos más importantes con costas de barrera, con trazo obscuro.

## PROPUESTA METODOLÓGICA

Partiendo del método presentado por Thieler y Hammer-Klose (1999), se formula la presente propuesta ya que las variables para establecer la vulnerabilidad de costas, a la fecha se aplican de forma indiscriminada sin considerar condiciones determinantes como el abrigo que ofrece la geomorfología de las costas de barrera.

La vulnerabilidad y la capacidad de resiliencia de un sistema de costa de barrera, depende del estado de sensibilidad o fragilidad de las propias barreras, toda vez que su integridad de defensa reside en la organización espacial de su estructura geomorfológica. Las variables que describen y caracterizan esta capacidad pueden agruparse en categorías o clases; posteriormente se establecen ligas entre clases mediante una red jerárquica que pondere la importancia de cada clase en función de su contribución a la vulnerabilidad del sistema.

Se proponen las siguientes cinco categorías de variables:

1. Emplazamiento espacial de la barrera
2. Dimensiones morfográficas y morfométricas de la barrera
3. Composición y organización espacial de las unidades naturales de las barreras
4. Llanura costera - planicie de cordones
5. Asimilación antrópica

En primer término, se seleccionó una serie de variables que caracterizan las relaciones con los paisajes circundantes. La estructura espacial es vital por lo que se seleccionan ciertos elementos, puntuales, lineales y de área para su descripción: los morfográficos referidos a las dimensiones geométricas y los morfométricos, de atributo numérico; posteriormente, un conjunto de descriptores ligados a las relaciones y condiciones de conectividad de las barreras con el entorno,

otro conjunto que toma en consideración la parte interna y más protegida de la barrera y el litoral continental, para por último, establecer su estado de alteración por la actividad humana. Estas nuevas variables agrupadas en temáticas se incorporan para mejorar, precisar, jerarquizar y retroalimentar las variables originales de la fórmula de vulnerabilidad.

La sistematización de esta información se llevó a cabo con base en la experiencia adquirida en múltiples trabajos de campo emprendidos desde 1988 a la fecha, en las costas del Golfo de México, particularmente en las costas de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y la península de Yucatán.

Las categorías de análisis, las variables que se incluyen en cada una de ellas, su medición y los intervalos de valores o criterios propuestos se presentan en forma resumida en el anexo 1 y se explican a continuación.

## **GUÍA DE CRITERIOS, PROCEDIMIENTOS Y MEDICIÓN DE VARIABLES**

### **EMPLAZAMIENTO ESPACIAL DE LA BARRERA**

En este apartado se analizan y evalúan la integridad o disgregación de las barreras, su localización relativa con respecto a la margen continental y al océano, la disposición y el grado de exposición de las márgenes interna y externa de la barrera, las relaciones de proximidad a las fuentes de alimentación y la longitud de los abanicos de displayamiento como indicadores de la intensidad erosiva. Las variables seleccionadas en este apartado permiten establecer los vínculos de reciprocidad e influencia entre ambas márgenes.

### **Índice de discontinuidad de la barrera**

Su objetivo es conocer el grado de perforación o desmembración de la costa de barrera por la presencia de discontinuidades o de bocas que presenta. En la medida que aumenta el número de las bocas, la barrera estará en una disposición de mayor fragilidad. También pudiera pensarse en una serie de barreras alineadas y se mide la anchura de las bocas que las separa.

Es la razón del ancho medio de las bocas entre el ancho medio de la barra. Se toman en cuenta tanto las bocas abiertas por sus extremos, como las bocas cegadas que se ubiquen en el cuerpo de la barrera; incluso aquellas con una inestabilidad temporal en la época de lluvias, en las tormentas, en los Nortes, incluso en la falta de aportes de nuevos sedimentos.

$$ID = pab/paB$$

Donde:

ID= Índice de discontinuidad

pab= promedio del ancho de todas las bocas identificables ( en metros)

paB= promedio del ancho de la barra (en metros) (esta variabe aplica tan sólo a la barrera)

### Índice de resistencia relativa

Cuando se establece la costa de barrera se crean varias líneas de costa, una frontal que corresponde a la orilla externa de la barrera, posteriormente una segunda orilla, la de sotavento de la barrera que hace contacto con aguas interiores protegidas por la propia barrera y una tercera, la de la margen continental. Patrón que se puede repetir en caso de tratarse de barreras dobles o triples (figura 3). Cada barra, representa una franja topográfica que se opone y genera resistencia, al obstaculizar el paso del viento.

Con esta variable se aborda el número y la diversidad de las márgenes del litoral, de acuerdo con la disposición y composición del arreglo fisiográfico de las barreras, en función de la amplitud de espacio entre la costa frontal y la margen interior en tierra firme. A mayor cantidad de barreras mayor disminución de la velocidad y mayor amortiguamiento del impacto de la energía física de los procesos hidro-meteorológicos.

El índice de resistencia relativa se mide:

$$IRR = nm(100) / pdext$$

Donde

IRR= Índice de resistencia relativa

nm= número de márgenes

pdext= promedio de distancias (en m) entre costas extremas  
(la continental y la que da a mar abierto)

A valores mayores de este índice, mayor resistencia y poder de resiliencia del sistema de barreras por lo tanto, menor vulnerabilidad.

### Índice de istmicidad

Las barras no tienen una configuración homogénea, presentan sitios exentos de acumulación sedimentaria importante. En donde se forman estrechos, que constituyen corredores de abrasión por viento u oleaje de marea, con una morfología de abras o puertos dispuestos entre los arenales y que conectan el flanco de barlovento al de sotavento; el viento remueve las arenas y las deposita en el cuerpo lagunar reduciendo su profundidad (acreción).

$$Iis = PLE / PAB$$

Donde

Iis= Índice de istmicidad

PLE= promedio de longitud media de estrechos (m)

PAB= promedio de la anchura de la barra (m)

Se asume que a menor valor de este índice, más cortos serán los istmos en función de la anchura de la barra y por tanto mayor vulnerabilidad.

## Distancia media a los depocentros

Los depocentros son propiamente las desembocaduras de los ríos y esteros próximos a la barrera, representan las fuentes más cercanas de sedimentos para surtir la materia prima y preservar a las barreras.

$$Dmd = SDd / nd$$

Donde:

Dmd= distancia media a depocentros

SDd= suma de distancias a depocentros. Tomada desde el centro de barra y en línea recta hasta la boca de las desembocaduras, en kilómetros.

nd= número de depocentros

A mayor valor, más lejana estará la fuente de alimentación de sedimentos y por tanto es mayor su vulnerabilidad.

## Longitud media de abanicos de desplazamiento

Los abanicos resultan del corte erosivo de una cercenadura que cruza la barrera en dirección de barlovento a sotavento depositando los sedimentos arrancados con el proceso de canaladura en la laguna interior de la barrera. Este proceso ocurre cuando hay una sobre elevación del nivel del mar a causa de la marea de tormenta. La presencia de abanicos indica, por un lado, que el sistema natural de la barrera es frágil ante los eventos de tormenta, en la medida en que se incrementa la magnitud de los abanicos o se crean otros nuevos.

En ocasiones, el proceso se revierte al dominar la acumulación sobre la erosión; en cuyo caso, las orillas internas de la barrera retroalimentarán el impulso primario de destrucción.

$$Lmad = SLad / nad$$

Donde:

Lmad= longitud media de abanicos de desplazamiento (m)

SLad= suma de las longitudes de los planos axiales de cada abanico

nad= número de abanicos de desplazamiento

## Índice de sinuosidad de la costa interior de la barrera

En la orilla interna de la barrera, que es la margen de sotavento guarecida del oleaje y viento directo del océano, hay una menor energía física en el ambiente dado que las fuerzas meteóricas ya fueron atenuadas por el filtro de la barrera topográfica y arenosa, y por ende es común que en la orilla referida se formen humedales, que van ganado espacio a la laguna de barrera de aguas interiores; acción que se promueve a partir de nuevos terrenos formados por acreción en los bajos, que a su vez, son producto de la deflación y acumulación de abanicos de desplazamiento.

La disposición de los productos de acumulación no es exclusivamente de carácter mantiforme o tangencial, hay depocentros o centros de acumulación localizada a través de abras o

corredores de viento y abanicos y por ello, la orilla interna de la barrera es sinuosa, tiene una configuración ondulada o de entrantes y salientes sobre los cuales prosperan los brotes de maíza acuática arraigada-emergida (popal-tular) o de manglar.

Se calcula:

$$IS = Llr/LT$$

Donde:

IS= Índice de sinuosidad

Llr=Longitud en línea recta de extremo a extremo de la costa interior de la barra (m)

LT= Longitud total de la costa interior de la barrera (m)

Entre menor sea este índice, mayor será la sinuosidad y menor la vulnerabilidad de la barrera. Los criterios para asignar los grados de vulnerabilidad a cada una de estas variables se presentan en la tabla 1.

## DIMENSIONES MORFOGRÁFICAS Y MORFOMÉTRICAS DE LA BARRERA

El objetivo de este apartado es el de establecer el orden de magnitud dimensional y la distribución de la estructura espacial, permitiendo conocer las propiedades de extensión y tamaño de barreras.

En la medida que la barra evoluciona a un estado de mayor madurez, se extiende en espacio y tiempo, por consecuencia, sus dimensiones tienden a incrementarse poniendo en evidencia una mayor acumulación de sedimentos producto de procesos morfogenéticos persistentes y por lo tanto se vuelve menos vulnerable.

Los elementos morfográficos corresponden a las dimensiones geométricas y los morfométricos a los atributos de carácter numérico de las barreras, de manera que se pueden establecer las propiedades de extensión y tamaño de las mismas.

Las propiedades geométricas son importantes a fin de averiguar la configuración de la barrera, como la relación de tamaño y su liga con tramos estrechos y bajos y por tanto, de mayor fragilidad al embate de los eventos meteorológicos, esto también se relaciona con la exposición debido a una determinada disposición del terreno, ya sea por su diseño espacial o su morfología.

La medición de las variables morfométricas se lleva a cabo, mediante la aplicación directa del Sistema de Información Geográfica (SIG), recurriendo a los módulos de análisis espacial.

Las variables consideradas en este apartado son:

**Anchura media.** Indica que a mayor anchura de la barrera será más estable, difícil de perforar o cercenar. Se mide en metros directamente de la imagen o del plano.

**Altura media.** Corresponde a la diferencia de altitud entre los puntos superiores e inferiores del perfil, medido en metros a partir de la expresión morfológica y utilizando el módulo de Google Earth, que muestra automáticamente las latitudes y las alturas absolutas aproximadas.

**Longitud total.** Es la longitud de la barra de extremo a extremo. La acumulación de sedimentos se lleva a cabo a lo largo del contorno mayor, lo que va confiriendo a la barra mayores dimensiones, mayor anchura y más altura; por el contrario, en la medida que la longitud es más corta, los sedimentos se acumulan menos. Se mide directamente en metros a partir de la imagen o mapa considerando la longitud del plano axial de la barrera.

**Superficie total.** A mayor área existe una mayor concentración de sedimentos; ya que las barras son sitios de acumulación constante debido a la presencia de canales de baja energía del oleaje, que puede aumentar en épocas de tormentas y Nortes. La medición del área es en metros cuadrados a partir de la información espacial del polígono o imagen, utilizando los módulos indicados en el sistema de información geográfica (SIG).

**Pendiente media de los flancos.** Con el fin de conocer la morfología de la superficie frontal para ligar la magnitud de las formas erosivas y acumulativas del relieve. La pendiente media se mide en el perfil del flanco de barlovento, usando el criterio de pendientes límites, inherentes a la morfología, tal como se presenta en la tabla 1 y sobre imágenes del Google Earth, fotos aéreas, imágenes satelitales y ortofotos.

Los criterios para la asignación del grado de vulnerabilidad correspondiente se presentan en el Anexo 1 (cuadro 1).

## COMPOSICIÓN Y ORGANIZACIÓN ESPACIAL DE LAS UNIDADES NATURALES DE LA BARRERA

En este apartado se trata de evaluar la madurez en términos de desarrollo evolutivo indicada por la diversidad de la composición del paisaje que propicia las condiciones que llevan hacia la estabilidad y conservación de la barrera; en tanto que la simplicidad o unicidad del paisaje puede ser indicadora de inmadurez, fragilidad o simplemente que se encuentra en vías de deterioro por remoción o, por el contrario, hacia el acrecentamiento súbito de arena que sepulta la barra.

La diferenciación de la composición se hace seleccionando las franjas por la expresión fisonómica análoga de homogeneidad, relativa con referencia a un paisaje geomorfológico modelado por regularidad de condiciones y procesos semejantes sin diferencias contrastantes.

Las variables ligadas a la vulnerabilidad en términos de la composición y organización espacial de una barrera son:

**Tipo de barrera.** Se selecciona entre los siguientes tipos reconocidos, de menor a mayor vulnerabilidad: arrecife de coral, arrecife de coquina, cascajo conchífero, anclada a tierra, isla libre, flecha arenosa o espiga (spits). Como guía puede consultarse la figura 1.

**Número de unidades naturales.** Entre menos unidades diferentes conformen el paisaje de la barrera, más vulnerable será ante las fuerzas físicas que la impacten. De acuerdo a su número de elementos, tenemos las siguientes categorías

1. Playa
2. Playa más cordón frontal de dunas
3. Playa, cordón frontal de dunas, más campo de dunas altas semi-móviles o planicies de cordones
4. Playa, cordón frontal de dunas, campo de dunas semi-móviles o planicies de cordones, más campos de dunas bajas o cordones estabilizados por vegetación
5. Playa, cordón frontal de dunas, campos de dunas semi-móviles o planicies de cordones, campos de dunas bajas o corredores estabilizados de vegetación, más humedales dispuestos en las orillas interiores de la barrera

**Número de cercenaduras.** Simplemente se cuentan el número de cercenaduras o bocas que presenta cada barra. Entre más cercenaduras, mayor será la vulnerabilidad de la barra.

**Índice de longitudes entre la línea de costa externa con respecto a la interna.** Se trata de comparar el balance y tendencia del sistema, entre la costa con formas acumulativas de acrecentamiento y su porcentaje con respecto a las erosivas.

$$ILC = LCE/LCI$$

Donde

ILC= índice de longitud de costas

LCE=longitud de la costa exterior (m)

LCI= longitud de la costa interior (m)

Entre más alto el valor de este índice domina la costa exterior y por tanto las formas erosivas y se expresa una mayor vulnerabilidad. Los intervalos de valores o criterios a considerar para asignar una categoría de vulnerabilidad se presentan en el anexo 1 (cuadro 2).

## **LLANURA COSTERA- PLANICIE DE CORDONES**

En este apartado se considera el caso especial de las planicies de cordones antiguos de playa, que no forman parte integral de una barrera, pero están conformados por cordones coalescentes adosados a las mismas.

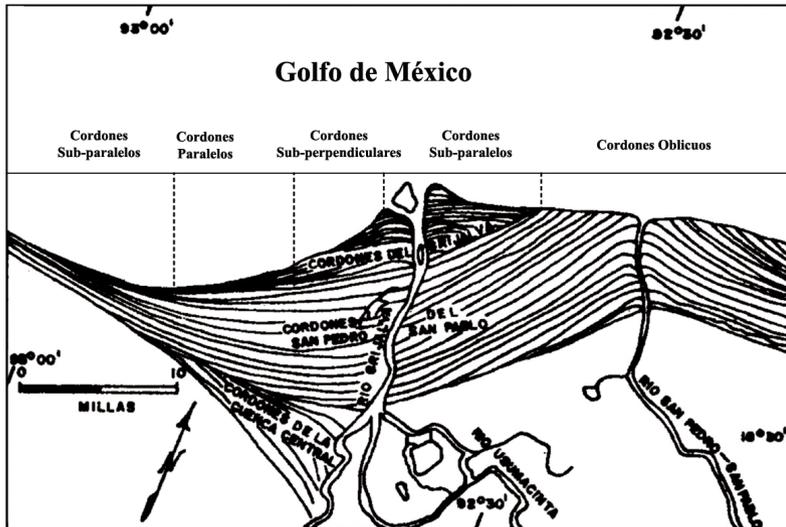
**Número de cordones litorales.** Cada cordón es una barrera individual, en una planicie se aprecian como una superficie ondulada surcada por grupos o juegos de barreras, por ello su conteo da una idea de la rugosidad que antepone a las fuerzas hidrometeorológicas.

**Altura media de los cordones.** Se expresa como el promedio de altura de cada uno de los cordones que conforman la planicie. Expresan los ciclos con corrientes de deriva de playa que acarrearán una cantidad más abundante de sedimentos, alternados con otros ciclos de menor sedimentación y por ende de altura más baja de los cordones. Los cordones altos resistirán mejor, ya que abaten la fuerza del viento al ras del suelo en mayor medida que los menos altos.

**Distancia media entre cordones.** Se expresa como el promedio de distancia de separación entre líneas de cordones. En la medida en que los cordones se aproximan unos a otros, habrá hondonadas o caños más estrechos formando un arreglo de lomos o crestas de cordones apretados. En el caso que los caños estén más separados mayor será la distancia entre cordones y por esto presentarán menor resistencia al impacto de las amenazas naturales.

**Orientación de los cordones truncados con respecto a la costa actual.** Los cordones truncados se toman como huellas que dejan los procesos dominantes a lo largo del tiempo, por lo que su disposición con respecto a la línea de costa actual permite la evaluación de los impactos potenciales. Los cordones paralelos indican menor vulnerabilidad y los perpendiculares el extremo opuesto.

Los fenómenos de erosión y acumulación han coexistido desde hace mucho tiempo, así lo atestiguan los patrones de diseño de cordones, que dan cuenta de la historia de los cambios en los últimos miles de años. Su interpretación constituye una herramienta de análisis geomorfológico. Cuando los patrones de cordones truncados adoptan una disposición, oblicua, sub-perpendicular o perpendicular, los caños estarán a merced de la entrada del oleaje al carecer de estructuras de protección. En cambio los arreglos paralelos y sub-paralelos disminuyen los valores de retroceso indicando una mejor protección. Se expone el modelo de diversos arreglos de cordones correspondientes al delta del río Grijalva-Usumacinta como referencia visual, para utilizarse como guía (figura 6.)



**Figura 6.** Delta del Grijalva mostrando la configuración asimétrica de los flancos. Se ilustra la disposición de cordones truncados de playa antigua del anterior delta del Usumacinta (Figura tomada de West *et al.*, 1969).

**Porcentaje de inundabilidad de los caños en función de la superficie de la planicie de cordones.** El ascenso del nivel del mar se traduce en mayores áreas sujetas a inundación. Los cordones acumulativos son producto de la regresión marina, o sea de un avance de la línea de costa sobre el mar; los cordones truncados (por erosión) y las áreas de inundación son producto de la penetración marina o transgresión, o sea un avance de la línea de costa hacia la porción continental tierra adentro. Por lo que a mayor porcentaje de inundación se atribuye mayor vulnerabilidad de la costa. Se expresa como el porcentaje de área inundada con respecto a la superficie total.

**Grado de conectividad con los esteros.** La inundación tiene lugar a partir de las entradas de agua de mar conectadas a lagunas, a cursos bajos de estuarios y a esteros; que a su vez, se conectan a la red de caños de la planicie de cordones. Estas hidro-conexiones se identifican estableciendo su número y su jerarquía de acuerdo a la capacidad de intercambio de flujos, conforme a los criterios del Anexo 1 (cuadro 4). Entre más conexiones entre las unidades que conforman la costa habrá mayor grado de vulnerabilidad en la misma.

**Índice de elongación de la planicie.** Indica la configuración de la planicie, qué tan alargada o ancha es, ya que entre más alargada, mayor posibilidad de perforación o ruptura por desmembración. El índice de elongación de una planicie, es comparable con un círculo de área semejante donde el desarrollo de la línea de costa hasta el cordón litoral más interior en la parte más ancha, es tan grande como el diámetro de la longitud de un círculo con valor a 1.

$$D_L = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}}$$

Donde

$D_L$  = diámetro de la longitud de un círculo de área igual a la de la planicie,

$L$  = longitud de la línea de costa en metros

$A$  = superficie de la planicie en  $m^2$

Los criterios o intervalos de valores para asignar niveles de vulnerabilidad a estas variables se presentan en el Anexo 1 (cuadro 3).

## ASIMILACIÓN ANTRÓPICA

Se incluyen variables que representan el grado de perturbación impuesta por las actividades socio-económicas a través de los remanentes de vegetación natural, los bancos de materiales y de la modificación del terreno debido a la construcción de infraestructura, esto se traduce en cambios en la estructura espacial, la geomorfología y el funcionamiento de las comunidades bióticas, esto es, en el desarrollo natural del sistema de costas de barrera, contribuyendo a su vulnerabilidad.

Las variables consideradas son:

## Remanentes de cobertura de vegetación natural (%)

### Bancos de material arenoso (%) en función del tamaño de la barrera

**Camino de dirección longitudinal.** Se describe su posición en la pendiente de la barrera, así como la orientación del flanco en que se ubica. Las categorías se detallan en el Anexo 1 (cuadro 4).

### Porcentaje de la longitud del camino con respecto a la longitud total de la barrera

$$PLC = (LC/LTB)100$$

Donde

PLC= porcentaje de longitud del camino (%)

LC= longitud del camino

LTB= longitud total de la barrera

**Caminos transversales.** Se describe su posición en la pendiente de la barrera, así como la orientación del flanco en que se ubica. Las categorías se detallan en el Anexo 1 (cuadro 4).

### Porcentaje de la longitud de caminos con relación a la anchura media de la barrera

$$PAC = (LC/AMB)100$$

Donde

PAC= porcentaje de anchura del camino (%)

LC= longitud del camino

AMB= anchura media de la barrera

**Localización de asentamientos humanos.** Se describe su posición con respecto a la orientación del flanco en que se ubica. Las categorías se detallan en el Anexo 1 (cuadro 4).

**Presencia de infraestructura portuaria.** Se elige una categoría conforme al tipo de estructuras presentes, que se detallan en el Anexo 1 (cuadro 4).

Se pueden obtener a partir del procesamiento de imágenes aéreas o mediante un SIG. Los niveles de vulnerabilidad que se asignan a cada una de estas categorías se establecen en el anexo 1 (cuadro 4).

## COMENTARIOS FINALES

La presente propuesta es producto de múltiples observaciones, sin embargo aún se trabaja en los valores de los pesos relativos, ya sea por variable o por cada grupo de variables propuesto, que han de asignarse. Actualmente, se conducen las mediciones en estaciones específicas y se investigan métodos alternativos para llevar a cabo los cálculos de los índices de vulnerabilidad. Por otro lado, también conviene destacar el problema de escala, pues los datos y medidas están pensados en la cobertura cartográfica de la topografía en escala semi-detallada (1:50 000 INEGI) que cubre toda la línea de costa del Golfo de México. Las mediciones realizadas en productos cartográficos por debajo de esta escala serán de mayor resolución, pero sólo están disponibles para ciertos trechos de costa.

Es importante hacer notar que con la inclusión de estas variables, sería recomendable reportar dos niveles de vulnerabilidad, uno referido a las costas interiores protegidas, sean continentales o de la barrera, y otro para las costas abiertas, para las que podría seguirse utilizando el índice convencional.

### Agradecimientos

A José Manuel Figueroa Mah-Eng por el apoyo técnico a este trabajo.

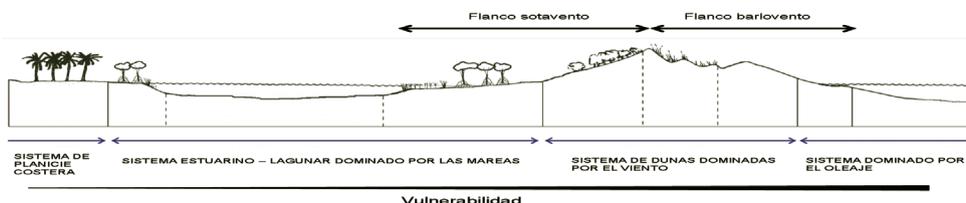
## LITERATURA CITADA

- Diez P. G., G M. E. Perillo, y E. S. Piccolo, 2007. Vulnerability to sea- level rise on the coast of the Buenos Aires. *Journal of Coastal Research*, 23 (1): 119-126.
- Gornitz V., 1990. Vulnerability of the East Coast, USA. to future sea level rise. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 9:201-237.
- Hernández Santana, J. R., M. A. Ortiz Pérez, A. P. Méndez Linares, y L. Gama Campillo, 2008. Reconocimiento morfodinámico de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo xx hasta el presente. *Investigaciones Geográficas*, 65: 7-21.
- Kokot, R.R., J.O. Codignotto, y M. Elissondo, 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia del río Negro. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, 59(3): 477-487.
- Ortiz Pérez, M.A., 1988. Evidencias de cambios geomorfológicos del sistema litoral mediante el análisis de imágenes aéreas. p. 43-54. Memorias: Ecología y Conservación del Delta de los Ríos Usumacinta y Grijalva. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. División Regional Tabasco. Gobierno del Estado de Tabasco.
- Ortiz-Pérez M. A., 1992. Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche-Tabasco. *Investigaciones Geográficas*, 25:7-23.
- Ortiz, P. M. A., y G. De la Lanza, 2006. Diferenciación del espacio costero de México: un inventario regional. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 138 p.
- Ortiz, P. M. A., J. R. Hernández, y J. M. Figueroa, en prensa. Tasas del avance transgresivo y regresivo en el frente deltaico tabasqueño: en el periodo comprendido de 1995-2008. p. 305-324. En. AV

- Botello, S. Villanueva, J. Gutiérrez y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL. Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Thieler, E. R., y E.S. Hammer-Klose, 1999. National Assessment of Coastal Variability to Sea Level Rise. Preliminary Results for the US Atlantic Coast. Woods Hole, MA : United States Geological Survey (UGGS) Open File Report 99-593.
- Wells, J.T., y C.H. Peterson, sin fecha. Atlantic and Gulf Coastal Barriers. National Fish and Wildlife foundation 20 p. Folleto divulgativo.
- West, C.R., P.N. Psuty, y G.B. Thom, 1969. The Tabasco lowlands of southeastern Mexico. Technical Report No. 70. Coastal Studies Institute, Louisiana State University, Baton Rouge. 193 p.

## ANEXO 1

### Perfil de costa de barreras, para ubicar y relacionar con los cuadros de índices de vulnerabilidad física



**Cuadro 1.** Emplazamiento espacial de la barrera.

Grado de vulnerabilidad	Muy baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
<b>Variables</b>	<b>Criterios o intervalos de valores</b>				
Índice de discontinuidad de la barrera	<0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	>0.8
Índice de resistencia relativa (m)	<0.1	0.1-0.3	0.3-0.5	0.5-0.7	>0.7
Índice de istmicidad	>0.8	0.8-0.6	0.6-0.4	0.4-0.2	<0.2
Distancia media a los depocentros (km)	<1	1-5	5-10	10-20	>20
Longitud media de abanicos de desplazamiento (m)	>500	500-200	200-100	<100	No tiene
Índice de sinuosidad de la costa interior de la barrera	1.0	1.2	1.4	1.5	>1.5

**Cuadro 2.** Dimensiones morfográficas y morfométricas de la barrera.

Grado de vulnerabilidad	Muy baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
<b>Variables</b>	<b>Criterios o intervalos de valores</b>				
Anchura media (m)	>2 000	2 000-1 000	1 000-500	500-100	<100
Altura media (m)	>30	30-10	10-5	5-2	<2
Longitud total(m)	>20 000	20 000-10 000	10 000-5 000	5 000-1 000	<1,000
Superficie (m <sup>2</sup> )	>20 000	20 000-15 000	15 000-10 000	10 000-5 000	5 000-2 500
Intervalos de pendiente media	Rampa inclinada 18-12° .	Rampa tendida 12-6°.	Planicie ligeramente inclinada 6-2° .	Planicie subhorizontal 2-0°.	Superficie plana, sin pendiente.

**Cuadro 3.** Composición y organización espacial de las unidades naturales de las barreras.

<b>Grado de vulnerabilidad</b>	<b>Muy baja (1)</b>	<b>Baja (2)</b>	<b>Moderada (3)</b>	<b>Alta (4)</b>	<b>Muy alta (5)</b>
<b>Variables</b>	<b>Criterios o intervalos de valores</b>				
Tipo de barrera.	Arrecife de coral.	Arrecife de coquina, cascajo conchífero.	Anclada a tierra.	Isla libre.	Flecha arenosa, espiga (spits).
No. de unidades naturales.	Playa, cordón frontal de dunas campos de dunas semi-móviles o planicies de cordones, campos de dunas bajas o corredores estabilizados de vegetación, más humedales dispuestos en las orillas interiores de la barrera (5 elementos).	Playa, cordón frontal de dunas, campos de dunas semi-móviles o planicies de cordones, campos de dunas bajas o corredores estabilizados de vegeación (4 elementos).	PLaya, cordón frontal de dunas, campos de dunas semi-móviles o planicies de cordones (3 elementos).	PLaya, cordón frontal de dunas (2 elementos).	Playa (1 elemento).
No. de cercenaduras.	No tiene	1	2	3	>4
Índice de longitud de costas.	<0.2	0.2 - 0.4	0.4 -0.6	0.6-0.8	> 0.8

**Cuadro 4.** Llanuras costeras-planicie de cordones.

<b>Grado de vulnerabilidad</b>	<b>Muy baja (1)</b>	<b>Baja (2)</b>	<b>Moderada (3)</b>	<b>Alta (4)</b>	<b>Muy alta (5)</b>
<b>Variables</b>	<b>Criterios o intervalos de valores</b>				
No. de cordones.	>100	100-75	75-50	50-25	<25
Altura media de cordones.	>2.0	2.0-1.5	1.5-1.0	1.0-0.5	<0.5
Distancia media cordones (m).	<10	10-25	25-50	50-100	>100
Orientación de los cordones truncados con respecto a la costa actual.	Paralelos.	Sub-paralelos.	Oblicuos o de orientación diagonal.	Sub-perpendiculares.	Perpendiculares.
Porcentaje de inundabilidad de los caños en función de la superficie de la planicie de cordones (%).	<20	20-40	40-60	60-80	>80
Grado de conectividad con los esteros.	Sin canales visibles.	Un estero comunicado con la laguna.	Un estero comunicado con estuario.	Dos o más esteros comunicados con laguna.	Dos o más esteros comunicados con estuario.
Índice de elongación.	<0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.9	>0.9

**Cuadro 5. Asimilación antrópica.**

<b>Grado de vulnerabilidad</b>	<b>Muy baja (1)</b>	<b>Baja (2)</b>	<b>Moderada (3)</b>	<b>Alta (4)</b>	<b>Muy alta (5)</b>
<b>Variables</b>	<b>Criterios o intervalos de valores</b>				
Remanentes de cobertura natural (%).	>60	60-40	40-20	20-10	<10
Bancos de material arenoso.	No existe.	<5%	<10%	10-20%	<20%
Camino de dirección longitudinal.	Ausente.	Porción media y alta del flanco de sotavento.	En la porción baja del flanco de sotavento.	Porción media y alta del flanco de barlovento.	En la porción baja del flanco de barlovento.
Porcentaje de la longitud del camino con respecto a la longitud total de la barrera (%).	Ausente.	<25	25-50	50-75	>75
Caminos transversales.	Ausente.	Porción media y alta del flanco de sotavento.	En la base del flanco de sotavento.	Porción media y alta del flanco de barlovento.	Perpendicular a flanco de barlovento.
Porcentaje de longitud de caminos con respecto a la anchura media de la barrera (%).	Ausente.	<25	25-50	50-75	>75
Localización de asentamientos humanos.	Ausente.	Sotavento.	Barlovento puntual.	Flanco de barlovento franja estrecha.	Flanco de barlovento en forma de franja.
Presencia de infraestructura.	Ausente.	Pedraplenes, muelles.	Diques, rompeolas.	Espigones.	Escolleras.



Ruiz G., E. Mendoza, R. Silva, G. Posada e I. Mariño, 2010. La geomorfología como herramienta para el análisis de las formaciones costeras y sus alteraciones de largo plazo. Aplicación a la Península de Yucatán, p. 125-158. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# La geomorfología como herramienta para el análisis de las formaciones costeras y sus alteraciones de largo plazo. Aplicación a la península de Yucatán

*Gabriel Ruiz, Edgar Mendoza, Rodolfo Silva, Gregorio Posada e Ismael Mariño*

---

## RESUMEN

Las regiones litorales, constantemente, se ven sometidas a planteamientos de índole económico y social, que obligan a que éstas se consideren como sistemas dinámicos que deben de ser analizados mediante criterios que garanticen un mejor aprovechamiento, desarrollo y explotación sustentable de los diferentes componentes que integran el sistema. El estudio de la zona litoral puede ser abordado bajo tres concepciones de tiempo, ya sea corto, mediano o largo plazo. El análisis de las playas o costas en cada una de las escalas de tiempo debe proporcionar un marco teórico, en el cual se engloben todos los efectos de los procesos costeros y no se consideren las acciones de éstos como eventos aislados que corresponden exclusivamente a un determinado periodo de tiempo. Desde una óptica de largo plazo, el uso de la geomorfología costera permite determinar y comprender el efecto que han tenido los procesos costeros en la costa a través del tiempo, proporcionando con ello, importantes referencias acerca de la evolución de la playa. Por otro lado, la fragilidad de los sistemas y ecosistemas costeros se ha incrementado debido a las alteraciones climatológicas, provocadas por el aumento de la temperatura en el planeta. Como una respuesta a las variaciones del clima se ha observado un incremento en el nivel medio del mar, lo que ha originado que en algunos sectores de la población, cualquier modificación de las costas se relacione como una consecuencia directa del cambio climático global. Si bien, no es posible negar la posible influencia que el efecto invernadero tiene en las playas, mediante la aplicación de la geomorfología costera y la geología es posible desmitificar, que toda modificación en el comportamiento de la playa sea resul-

tante de la variación climática. A continuación se presenta la aplicación de la geomorfología como una herramienta para estudiar el comportamiento de las configuraciones costeras y sus alteraciones a largo plazo, aplicadas a la península de Yucatán.

## INTRODUCCIÓN

Es ampliamente conocido que la dinámica de la línea de playa se rige y regula por los procesos y fenómenos derivados de la acción de los agentes físicos, químicos, meteorológicos, biológicos y marinos que actúan en la interfase sólido-líquido, quienes a su vez, son los responsables últimos de la distribución del material que forma las costas. Los principales procesos físicos que se relacionan con el génesis de los sedimentos costeros son: el intemperismo, la meteorización, la abrasión y la cavitación, dichos procesos reflejan la interacción que existe entre los agentes naturales y los materiales que se encuentran en la parte continental del litoral, más específicamente, de los mantos rocosos. Entonces, las características y propiedades físicas de los sedimentos que se encuentran en una playa determinada, dependen de la intensidad y frecuencia de cada uno de los citados procesos, de la litología del material y del modo en que los sedimentos son transportados y depositados sobre las playas. Dada la evidente relación entre la formación, las características y la distribución del sedimento, al analizar el comportamiento y la susceptibilidad que tiene un sistema litoral, es fundamental que se reconozcan sus características geológicas y geomorfológicas, máxime si la caracterización de un sitio dado tiene como propósito la predicción de escenarios.

Este capítulo representa un acercamiento al marco global de la geología y geomorfología, específicamente de la zona costera que abarca desde Punta Sam hasta Tulum en el estado de Quintana Roo, México. Para tal efecto ha sido dividido en dos secciones, en la primera se presentan algunos conceptos de geomorfología acompañados de ejemplos aplicados a la zona costera de interés. Lo anterior se utiliza como base para una argumentación referente a la posible influencia del cambio climático en la zona. Posteriormente, se presenta la información relacionada a la geología de la península de Yucatán, para servir de preámbulo a la exposición de las características geológicas y morfológicas particulares de los sistemas litorales que presentan protección arrecifal (corredor turístico Tulum-Cancún), así como de los sistemas que no la poseen (Cancún).

Vale la pena señalar que lejos está, de los objetivos de este capítulo, demostrar si el cambio climático derivado del calentamiento global es una realidad, aunque de hecho lo es. La intención es marcar la incertidumbre que aún persiste respecto de tópicos como la aportación de la actividad humana al calentamiento y principalmente en la existencia de una gran cantidad de características, mayormente regionales, que hacen que las predicciones globales puedan no ser el futuro de las costas mexicanas. La meta última de la discusión que se presenta es guiar al lector a la reflexión de que países como México, tienen necesidades y problemas que demandan atención inmediata, previa al diseño de planes y programas de preparación para las innegables alteraciones de largo plazo.

## DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El estado de Quintana Roo se ubica en la parte oriental de la península de Yucatán entre las coordenadas  $17^{\circ}48'$  y  $21^{\circ}10'$  de latitud norte y  $86^{\circ}48'$  y  $89^{\circ}10'$  de longitud oeste (con respecto al meridiano de Greenwich). La extensión territorial del estado está limitada por el estado de Yucatán al noroeste, al norte por el Golfo de México, al oeste por el estado de Campeche, al sur por Belice y al este por el Mar Caribe. Las márgenes litorales del estado de Quintana Roo en su totalidad miden 1 176 kilómetros de longitud, las cuales representan 10.57% del total del litoral mexicano (INEGI, 2007).

La extensión longitudinal de la línea de costa de interés (noreste del estado de Quintana Roo) es de aproximadamente 150 kilómetros. Esta franja costera tiene por límite norte Punta Sam (Bahía Mujeres) y Tulúm al sur. Mientras que al este, las aguas del Mar Caribe bordean la zona de estudio (figura 1).

## GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es la ciencia que tiene por objeto estudiar las distintas formas del relieve terrestre y marino que existen en el planeta. La geomorfología costera, entonces, analiza las for-

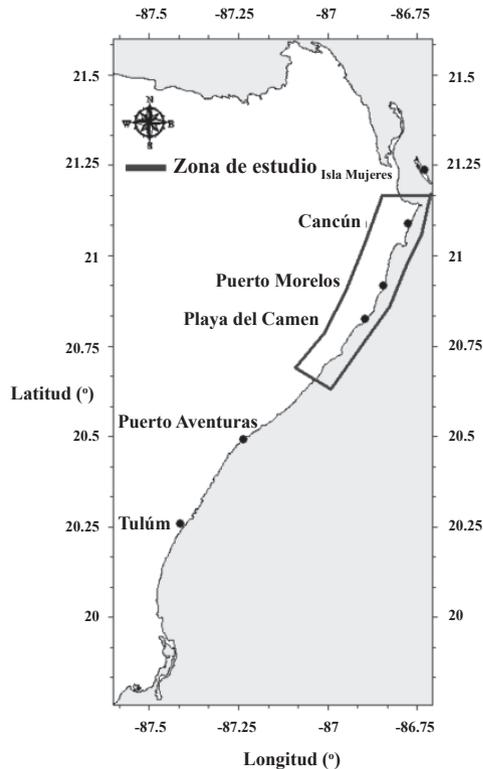
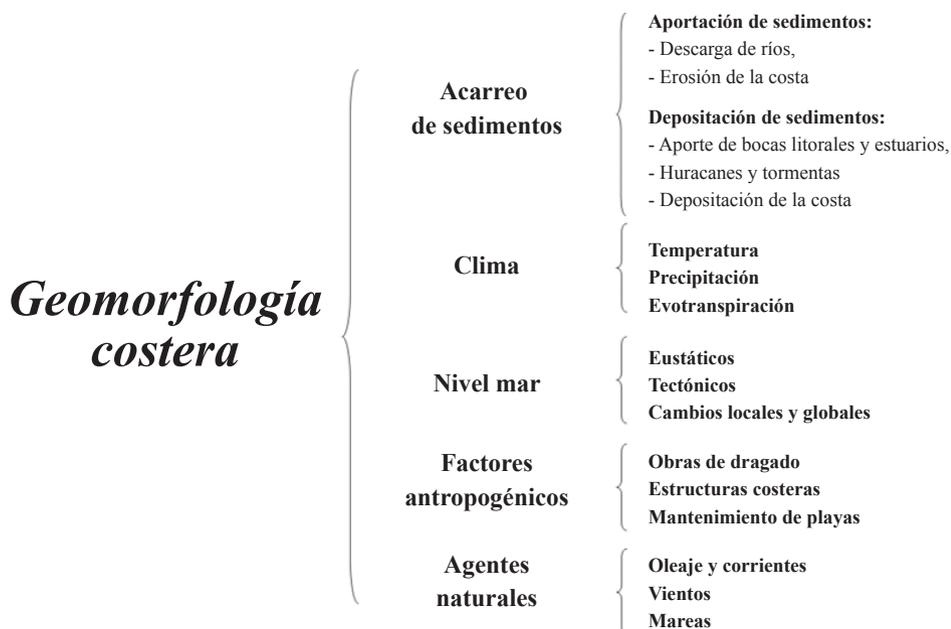


Figura 1. Zona de estudio.

mas de las costas, las variables que influyen en la configuración de la línea de playa (*e.g.* acarreo de sedimentos, clima, nivel del mar, factores antropogénicos, agentes naturales) (figura 2) y los procesos actuantes a los cuales está sometido el medio costero. De acuerdo con la geología, la superficie terrestre se puede dividir, atendiendo sus características estructurales y topográficas, en márgenes continentales y cuencas oceánicas. La zona donde los continentes y los océanos convergen, se conoce como zona precontinental, dicha área a su vez, está conformada por dos fronteras: una interna y otra externa. La plataforma, borde y talud continentales integran la frontera externa de la región precontinental, que se enlaza con los fondos oceánicos, por otro lado, en la frontera interna se localizan todas las costas del mundo y es ahí donde se halla el objeto de estudio de la morfología costera.

Al estudiar una forma o configuración costera desde el punto de vista geomorfológico, debe considerarse que los procesos físicos que se manifiestan actualmente, pueden ser la repetición de lo ocurrido en épocas geológicas previas, aunque no necesariamente con la misma intensidad con la que actúan hoy día. Además, se debe reflexionar que las estructuras geológicas que conforman el litoral, gobiernan la evolución morfológica de la línea de costa y son indicadores de la respuesta histórica de las formaciones terrestres a los agentes físicos. Cada proceso geomorfológico deja impresa una característica distintiva en las formaciones costeras que genera y al mismo tiempo, cada proceso físico desarrolla sus propios mecanismos de alteración, lo cual también se ve reflejado en las formaciones costeras.

Vale la pena puntualizar que línea de costa y costa, son términos utilizados para describir la zona donde coinciden tanto el medio marino, como el terrestre. Dichos términos generalmente se usan en el rango de escalas espaciales y temporales globales. La costa es una franja de tierra



**Figura 2.** Variables y procesos que estudia la geomorfología costera.

(de ancho variable) que se extiende desde un cuerpo de agua (*e.g.* océano, mar, golfo) hacia tierra adentro y finaliza en el sitio donde se localiza una característica relevante en el relieve terrestre. La cuantificación de la extensión aproximada de las líneas de costa alrededor del mundo, es de 312 000 kilómetros (Britannica Inc., 2005). En este trabajo los términos playa y línea de playa se utilizan para referirse a la misma región pero en escalas de tiempo y espacio locales.

Debido a la dependencia recíproca que tienen los continentes y los océanos, la línea de costa se modifica en función de la evolución derivada de su interacción geológica. Considerando que las configuraciones costeras que se observan actualmente fueron determinadas por el ascenso postglacial del nivel del mar y como resultado de las distintas oscilaciones del nivel del mar en el Pleistoceno, no ha sido posible generar una clasificación general de los diferentes tipos de costas que existen alrededor del mundo. En la actualidad, las clasificaciones de las costas de Johnson (1919), Shepard (1963), Valentin (1952), Brunn (1954), Cotton (1954), Laval (1962), Inman y Nordstrom (1971) y Carranza, Gutiérrez y Rodríguez (1975) (*cf.* Ruiz, 2004) son las más aceptadas en la geología e ingeniería costera en México. Las clasificaciones anteriores se fundamentan en los principios básicos de los movimientos relativos de la tierra y el mar; cuando los continentes se elevan con respecto al nivel medio del mar, ya sea por la tectónica de placas o la depositación de sedimentos, el ascenso del continente provoca que el nivel del mar descienda descubriendo zonas que ahora son de tierra, estas son las llamadas costas de emersión. De manera opuesta, las costas de sumersión se originan cuando las zonas litorales se desplazan hacia el interior del continente por acción de la erosión o movimientos tectónicos que se manifiestan como un aumento del nivel medio del mar.

A manera de ejemplo, considérense las líneas de costa de Cancún e Isla Mujeres, que se clasifican como costas de isla barrera y con acantilados marinos, respectivamente. Las costas de isla barrera se forman a partir de cordones de médanos (dunas), cuyas dimensiones dependen de la longitud y altura de las olas, de la amplitud de las mareas y de las dimensiones y cantidad del sedimento que se transporta por acción del viento y el oleaje. En la planicie costera que se forma entre los cordones de médanos y el continente, se pueden encontrar lagunas litorales formadas por la mezcla de agua marina y agua de origen continental. Por su parte, la línea de costa de Isla Mujeres que queda expuesta hacia el Mar Caribe es una costa con acantilados, ya que la planicie costera está formada por elevaciones que terminan en cortes rectos. En este tipo de costas la planicie es muy corta, por lo tanto la playa es pequeña o no existe y el corte del cantil puede ser la misma línea de costa o estar muy cerca de ella. En la orilla de la playa se produce el mayor intercambio de energía entre el océano y la isla (Cifuentes *et al.*, 2002). Ambos casos, a pesar de sus diferencias genéticas y morfológicas, son costas de emersión (Durham, 1985).

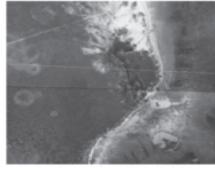
Los sistemas costeros son conocidos como los más dinámicos en toda la superficie de la Tierra, puesto que es prácticamente imposible que el medio marino y el terrestre mantengan una frontera inalterada y constante. Debe comprenderse, entonces, que en función de las características físicas del material en tierra y de la energía que el mar descarga sobre él, se determina la temporalidad de los cambios en la línea de playa. Así, se consideran como modificaciones de corto plazo los cambios producidos en la extensión de una playa por las mareas, mientras que

las variaciones que sufre una playa en su perfil transversal debidas a los cambios energéticos y direccionales en el oleaje asociados a las estaciones del año, son de mediano plazo. Por su parte, las alteraciones inducidas por los cambios del nivel medio del mar, corresponden a una escala de tiempo mucho mayor. En este sentido, el análisis geomorfológico permite comprender las formaciones costeras y sus perturbaciones actuales como una pequeña parte de ciclos o procesos que tienen lugar en espacios temporales geológicos.

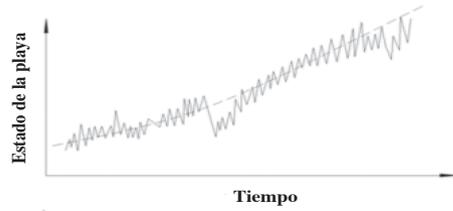
Respecto de los procesos costeros y sus alteraciones, un ejemplo interesante de citar debido a que puede ocurrir en escalas de tiempo muy variadas es la capacidad de autoregeneración de una playa, la cual depende de los mecanismos de retroalimentación impuestos entre un sistema litoral y su entorno. Básicamente la retroalimentación es de tipo positivo o negativo. En el primero la playa tiene la capacidad de mantener bajo control cualquier cambio en el entorno (direccionalidad del oleaje, variaciones energéticas del clima marítimo, aumento o reducción del volumen de sedimento en transporte) hasta que dicho cambio supera un umbral a partir del cual la playa ya no es capaz de autoajustarse y el sistema se desestabiliza. En la retroalimentación negativa la playa tiende a mantener un balance entre los múltiples elementos y respuestas que se presentan en el sistema litoral. Cuando el sistema es capaz de mantener balanceadas la cantidad de material que pierde y recupera, se dice que existe un estado de equilibrio. Una playa se encuentra en equilibrio estático cuando su forma y comportamiento, a lo largo del tiempo, no presentan modificaciones significativas; cuando una playa exhibe una serie de cambios cíclicos, el equilibrio se denomina dinámico. Existe un tercer tipo de equilibrio que sucede cuando el entorno de una playa sufre cambios importantes y el sistema litoral se adapta a ellos, en un tiempo relativamente corto, alcanzando una determinada estabilidad. Eventualmente puede presentarse un evento que altere de nuevo la playa y que ocasionará un nuevo ajuste del entorno que, a su vez, conducirá a un nuevo estado de equilibrio distinto del que se tenía antes del evento extremo. Este tipo de equilibrio se conoce como metaestable o hiperestático (Woodroffe, 2003). Por ejemplo, los estados de equilibrio que una playa logra alcanzar pueden ser observados en la línea de costa del estado de Quintana Roo, en la figura 3 se muestra de manera gráfica el comportamiento de la playa a través del tiempo, así como ejemplos de playas que se considera, se encuentran en el estado equilibrio señalado en la figura 2. En el primer caso (Tres Ríos) es notoria la existencia de fluctuaciones alrededor de un estado estable que también cambia en el tiempo pero de manera muy lenta; el caso Cancún muestra una fuerte dependencia de la estabilidad a la ocurrencia de eventos extremos (huracanes) y un equilibrio casi estático en los periodos inter-ciclónicos. Es de notar que dicho estado de equilibrio lo mantuvo hasta la intervención humana en el sistema. Desde que la infraestructura hotelera desapareció la duna costera y rigidizó el sistema, la playa entró en un proceso de erosión crónica que ni siquiera con los esfuerzos de relleno artificial se ha podido detener. Por su parte, el tercer ejemplo de la figura 3, dada la protección natural con que cuenta la playa, se mantiene en un estado prácticamente invariante.

Los fenómenos responsables de las fluctuaciones que definen el estado de equilibrio de un sitio particular son muy variados, sin embargo, sus efectos pueden fácilmente agruparse como

**a) Dinámico**



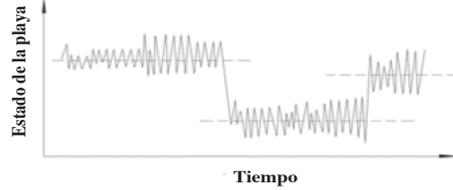
Tres Ríos, Q. Roo. México



**b) Metaestable**



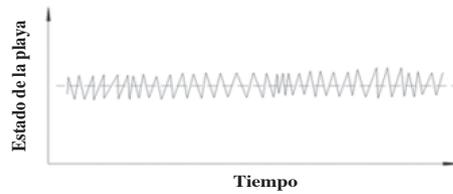
Cancún, Q. Roo. México



**c) Estático**



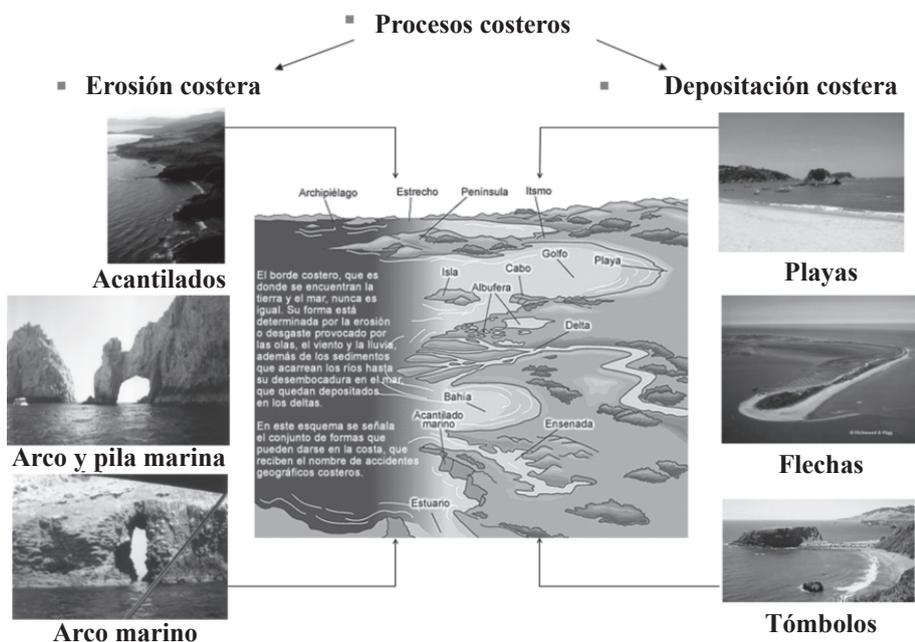
Bahía ubicada en las cercanías de Xel Ha, Q. Roo. México



**Figura 3.** Estados de equilibrio morfológico de varios sistemas litorales.

erosión o acumulación de sedimentos. Dentro de los agentes físicos que erosionan las líneas de costa, el principal es el oleaje, pero existen otros agentes que contribuyen significativamente a la erosión de las costas como son: la corrosión, abrasión y desgaste de los materiales que conforman la costa y la presión de choque que se genera cuando la ola rompe sobre la playa. Dentro de los factores que, si bien, no generan erosión por sí mismos, sí condicionan el grado de erosión, se encuentran el tipo y durabilidad de las rocas, el rango de marea, la profundidad del agua costa afuera, la configuración de la línea de costa y la estabilidad del nivel del mar. Los rasgos morfológicos típicos derivados de erosión en la zona costera son: acantilados, terrazas marinas, arcos marinos, cuevas, pilas o columnas marinas, farallones, bahías o ensenadas, salientes o promontorios (puntas rocosas) y plataformas de abrasión (figura 4) (Thornbury, 1969).

Por otra parte, la depositación de material en las costas es causada principalmente por el oleaje de baja energía que acarrea arena hacia la playa y lo pone a disposición de las corrientes marinas con dirección paralela a la costa que lo redistribuyen. Otras fuentes de depositación son las descargas de los ríos que acarrearán sedimento terrígeno. Las formas costeras relacionadas al depósito de sedimentos son, principalmente, deltas, playas, flechas, tómbolos, barras costeras y bancos de material (figura 4).



**Figura 4.** Formas costeras.

## **EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA GEOMORFOLOGÍA COSTERA**

La intensidad y distribución de la gran mayoría de los procesos que ocurren en las costas son una combinación del clima y de la variación del nivel del mar. Es un hecho conocido que a lo largo de la evolución de la Tierra, el clima ha fluctuado (figura 5), lo que se ha traducido en una serie de ascensos y descensos del nivel del mar (figura 6). Dichas variaciones son parte de un proceso natural de gran escala temporal. Sin embargo, en el presente siglo se espera que las variaciones climatológicas se presenten de una manera inusualmente rápida, entre otros, debida al incremento de la concentración de los gases conocidos como de invernadero, a saber, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (gases de invernadero) en la atmósfera. El principal efecto dañino de estos compuestos químicos es que absorben la radiación infrarroja del Sol, produciendo un aumento en la temperatura de la Tierra (*i.e.* efecto invernadero).

Cuando la atmósfera intercepta la radiación solar, la superficie de la Tierra refleja una cantidad de esa radiación hacia el espacio, mientras que el resto queda atrapada entre la capa sólida y gaseosa del planeta; por otro lado, la superficie terrestre es mucho más fría que la atmósfera, lo que provoca que ésta se opaque. En este sentido, un calentamiento global de la superficie terrestre significa que la Tierra retiene una mayor cantidad de radiación solar, por el efecto de opacidad que producen los gases de efecto invernadero. El IPCC (2001) pronosticó que la

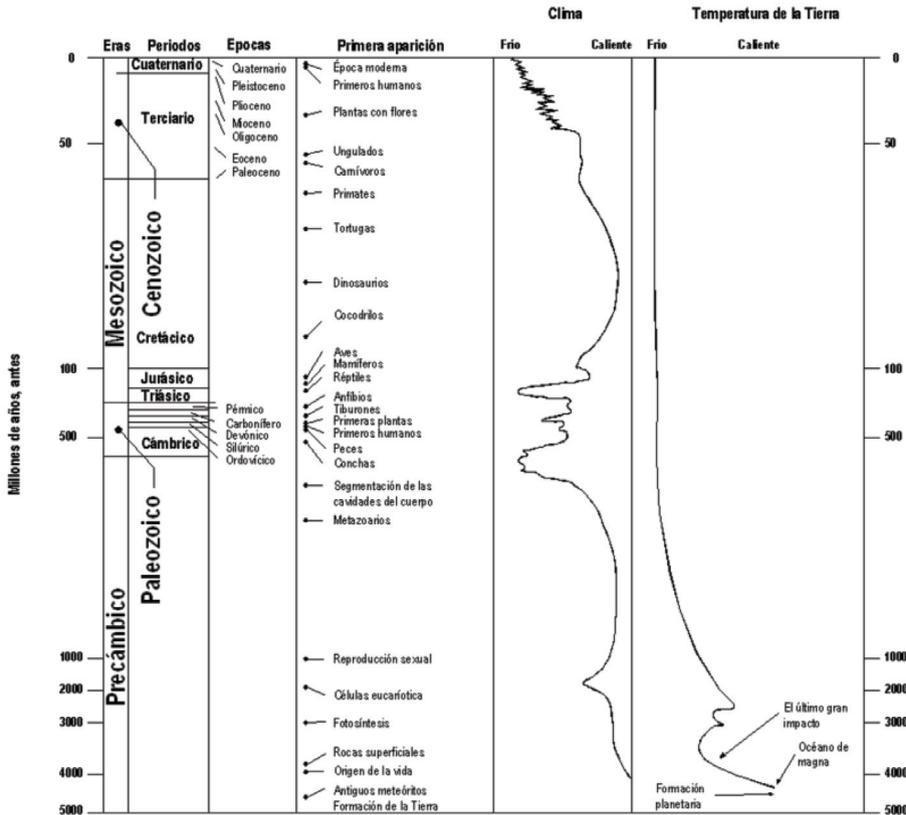


Figura 5. Escala de tiempo geológico y variación del clima (Drake, 2000).

acumulación de los gases de invernadero en el presente siglo será el doble del que se tuvo en el siglo xx, lo que conduciría a cambios climáticos asociados a un incremento de 1.5 a 4.5 °C en la temperatura media de la atmósfera. Entre las múltiples modificaciones climáticas que tal calentamiento podría causar en el planeta, se cuentan: la expansión térmica de los océanos, el derretimiento parcial de los casquetes polares y el retroceso de los glaciares o “hielos eternos”, lo cual liberaría grandes volúmenes de agua de baja salinidad al océano y tendría consecuencias en el nivel medio del mar, en el patrón de corrientes a nivel mundial y en el clima de gran parte del globo. Un análisis genérico concluiría que el nivel del mar subirá de manera global inundando una parte importante de lo que hoy conocemos como zonas costeras, que las corrientes marinas en algunas zonas del planeta se detendrían por efecto de la reducción de la salinidad y la temperatura o que, en el mejor de los casos, se verían fuertemente alteradas y que los efectos en el clima podrían incluir una gran reducción en la temperatura de las regiones cercanas a los polos, un importante aumento en las precipitaciones y la ocurrencia de tormentas de mayor intensidad. Sin embargo, dichas conclusiones y predicciones aún parten de altos niveles de incertidumbre tanto en lo que toca a las causas del calentamiento global, como en la inclusión de variables, procesos y factores que bien podrían cambiar modificar las predicciones.

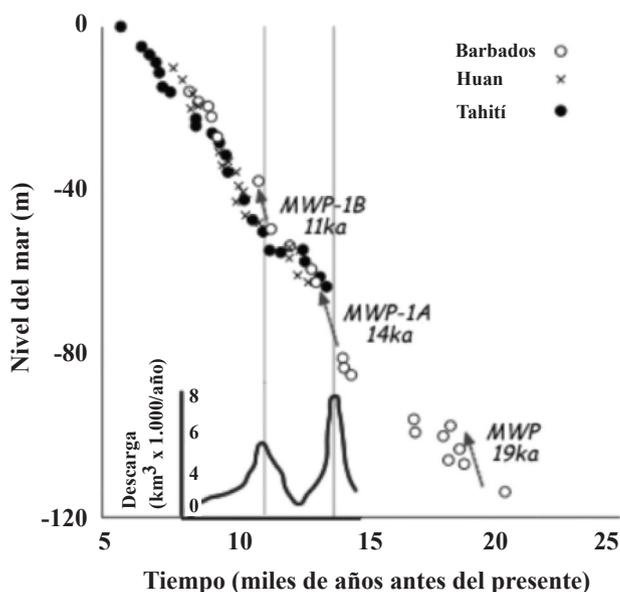


Figura 6. Niveles del mar registrados en los últimos 20 millones de años (Uriarte, 2003).

A este respecto, considérese el incremento de la temperatura del planeta. Varios de los gases de invernadero que se relacionan a actividades industriales y agrícolas han sido generados también por procesos naturales y acumulados en la atmósfera a lo largo de varios siglos. A través de comparaciones entre las concentraciones de dióxido de carbono que se tienen hoy con las que han sido preservadas en las burbujas de las distintas capas de hielo de la Antártica (que datan desde la era pre-industrial), se ha detectado un incremento aproximado del 30% en dicha concentración en los últimos 200 años, lo que, siguiendo la lógica actual debería haber derivado en un aumento considerable y cuantificable en la temperatura de la atmósfera. Algunos climatólogos afirman que han detectado un ascenso de  $0.4^{\circ}\text{C}$  (Meehl *et al.*, 2005) en las temperaturas atmosféricas desde el inicio del siglo pasado, sin embargo, muy distinta es dicha apreciación si se considera la influencia de las llamadas “islas de calor”, es decir, el aumento en las temperaturas que se registran en áreas urbanas e industriales, donde se ubican muchas de las estaciones meteorológicas (Singer, 2008), de hecho Goodridge (1996), al separar las tendencias en función del número de habitantes del sitio donde se han tomado las mediciones, encuentra que el calentamiento en comunidades con menos de 100 000 personas es prácticamente nulo. En todo caso, un aumento de  $0.4^{\circ}\text{C}$  en la temperatura es menor que el pronosticado por los modelos climatológicos que, alimentados con el aumento reportado en la concentración de los gases de invernadero, indicaron una elevación de  $1^{\circ}\text{C}$  a  $2^{\circ}\text{C}$  (Meehl *et al.*, 2005). Es claro que la temperatura del planeta depende, además de fenómenos internos, de factores como las variaciones de la radiación solar, especialmente de los ciclos de las manchas solares (de 8-14 años). Está demostrado que la variación de la radiación solar es un factor determinante en los

cambios climáticos que han ocurrido tanto hace millones de años (Neff *et al.* 2001), como en el siglo xx (Robinson *et al.*, 2007).

Durante el último millón de años la Tierra ha vivido diferentes ciclos glaciares que han hecho oscilar la temperatura de la atmósfera entre periodos fríos (periodo glaciario) y cálidos (periodo interglaciario) (figura 7 tomada de Don y Sheldon, 1968 y *cf.*: Gibbard *et al.*, 2007); Ruiz de Elvira (2001) estima que a lo largo de ese millón de años el clima de la Tierra ha cambiado del orden de diez veces. En los periodos glaciares las condiciones promedio que se presentan son de climas gélidos, que provocan sequías o lluvias escasas, crecimiento de los hielos polares y glaciares acompañados de un descenso del nivel del mar. Por su parte, en el periodo interglaciario las condiciones ambientales medias son de precipitación intensa, con gran humedad, calor persistente, ausencia o presencia escasa de hielo polar y glaciario y ascenso del nivel del mar. Desde esta óptica, el actual calentamiento global, que inició hace alrededor de 200 años al terminar la Pequeña Era Glacial (figura 8), bien puede ser parte de un proceso geológico natural que difícilmente se podrá detener, como algún sector sugiere, reduciendo la actividad humana (Singer, 2008; Meehl, *et al.*, 2005). Por otro lado, y a pesar de que muchos climatólogos suponen que el calentamiento global es producto del efecto invernadero, otros han vaticinado que el incremento de la nubosidad impediría un aumento de la temperatura en la superficie terrestre, produciéndose un clima global húmedo y hasta cierto punto la atmósfera sería más opaca, sin un calentamiento significativo (Bird, 1993; Gallegos, 2006).

Una discusión similar podría hacerse respecto de la parada repentina en las corrientes oceánicas, puesto que en adición a la salinidad y temperatura, las causas de la circulación incluyen la rotación terrestre y las perturbaciones generadas por la atracción gravitacional ejercida por otros cuerpos celestes (mareas), las cuales no dejarán de operar durante el deshielo. Definitivamente el intercambio de calor se verá modificado, lo que impactará en el clima de las regiones

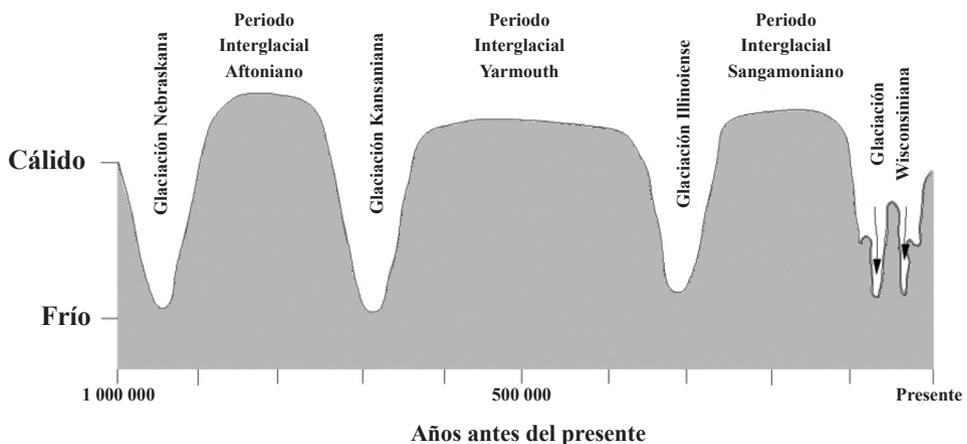


Figura 7. Ciclos glaciares.

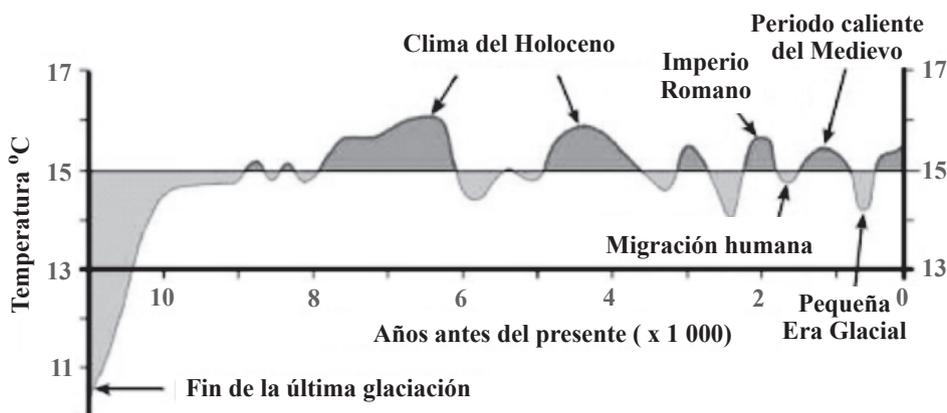


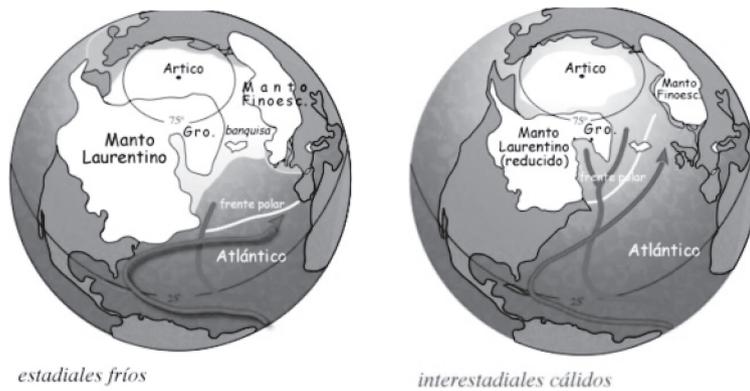
Figura 8. Desarrollo de la temperatura en el Hemisferio Norte desde la etapa glaciaria más reciente (Dansgaard *et al.*, 1969 y Scönwiese, 1995).

cercanas a los polos, sin embargo, la circulación y clima en la zona de los trópicos no sufrirá cambios tan drásticos, como ya ha sucedido de acuerdo con Uriarte (2003), quien presenta la figura 9 en la que se puede comparar la circulación entre estadales fríos y cálidos.

Por otro lado, el nivel actual del mar se alcanzó apenas hace 5 000 años, pero ha tenido un incremento relativamente sostenido, de cerca de 120 m, por los últimos 20 mil años (figura 6), por ello, la afirmación de que el nivel del mar se está incrementando de manera global, únicamente como resultado de la emisión de gases de invernadero, debe ser tratada con mucha cautela, ya que se omiten los efectos de la tectónica de placas y la eustasia<sup>1</sup>, así como las variaciones geográficas mostradas por las fluctuaciones del Holoceno (0.64 MA) de los niveles de los océanos. Adicionalmente se deben considerar factores regionales como las variaciones locales en el nivel del mar por efecto de corrientes marinas que periódicamente se intensifican o relajan, entre otros.

En cuanto al posible efecto que tendría un incremento del nivel del mar en la península de Yucatán, no existen predicciones particulares acerca de las consecuencias que se observarían en la costa, en buena medida por que la incertidumbre de las condiciones y respuestas regionales es aún mayor que la global. Baste citar lo siguiente: es un hecho que la península ha sido objeto de diversas fluctuaciones en el nivel del mar y evidencia de ello es la existencia de los cenotes (Lugo-Hubp *et al.*, 1992). Por otro lado, la emersión de la península se presentó en diferentes etapas geológicas siendo la parte norte la última en hacerlo, pues se sabe (Quezada, 2001) que al final del Cretácico, hace 65 millones de años, el agua cubría hasta Uman, al sur de Mérida, con una profundidad cercana a los 0.5 m. A la luz de lo anterior, parecería contradictorio que la península emergiera y a la vez sufriera subidas y bajadas del nivel del mar y del nivel freático, posiblemente la explicación de ello tenga que ver con que la parte norte de la península sigue

<sup>1</sup>Proceso geológico de ascensión o hundimiento de la corteza terrestre.



**Figura 9.** Diferencias de la circulación termohalina en estadales fríos y cálidos (Uriarte, 2003).

emergiendo (Durham, 1985), al grado que en el último siglo la costa del Golfo y Progreso se han separado cerca de 200 m y a que, de acuerdo con el USGS (2005) y con Sykes *et al.* (1982), la placa del Caribe se sigue desplazando hacia el noreste ensanchando la brecha entre las placas suramericana y norteamericana. La suma de todos estos factores, sumados a los asociados a un incremento del volumen oceánico (*e.g.* erosión de zonas costeras, aumento de área hidráulica) hace muy compleja la predicción de los escenarios regionales ya que el nivel de mar no necesariamente subirá en todos los sitios ni lo hará con la misma magnitud. Adicionalmente, el resultado de una supuesta subida del nivel del mar no forzosamente será negativo de manera generalizada.

En todo caso, aceptando la posibilidad de un incremento del nivel del mar, las secuelas que podrían presentarse en la península de Yucatán, obviamente involucran un avance del mar hacia el continente cuya magnitud dependerá del volumen descargado al océano producto del deshielo y de la expansión térmica de los océanos. De acuerdo exclusivamente con las leyes de la conservación de la materia y de la termodinámica, el deshielo de los polos, al enfriar las aguas superficiales, originaría una reducción en la intensidad de la corriente del Golfo cerca de los polos, lo cual no significa que la circulación oceánica se detendría entre los trópicos. Luego, rasgos geológicos como el Canal de Yucatán y el estrecho de Florida sufrirían un aumento de la sección hidráulica lo que, a su vez, produciría que la península de Yucatán y Florida, así como algunas partes de la costa de Cuba sufrieran erosión e inundaciones diferenciales en las que las partes más recientemente emergidas serían las primeras en desaparecer. Es interesante señalar que derivado del aumento en la sección hidráulica y por fricción, el flujo al interior del Golfo de México podría ser de menor magnitud, por lo que se generarían zonas de depositación de sedimentos, con las consecuencias que ello implica.

Desde el punto de vista biológico, el decremento de la salinidad en el mar por efecto de deshielo de los polos tiene poca probabilidad de afectar la distribución de salinidad en los trópicos (especialmente en las costas), por efectos de dilución, al punto de afectar a los manglares. Por otro lado, en una tierra más caliente donde el balance de calor Polos-Trópico este alterado, la salinidad en las costas podría tender a aumentar. Es conocido que el manglar es el mejor control natural contra las inundaciones, por lo que su pérdida, a largo plazo, aumenta considerablemente la vulnerabilidad de las zonas costeras. Por otro lado, es innegable el impacto negativo que tendría la variación de la temperatura del mar en las estructuras coralinas del arrecife mesoamericano; los corales que se componen de diversos organismos marinos se desarrollan bajo condiciones específicas de temperatura y salinidad que, al modificarse en forma relativamente abrupta, no permitirían la adaptación de los individuos y los organismos inevitablemente morirían, socavando en gran medida la capacidad que exhiben los arrecifes para disipar la energía del oleaje en condiciones normales y eventos extraordinarios. Esta alteración en los sistemas de retroalimentación entre el sistema litoral y el terrestre, no permitiría el restablecimiento del estado natural de las playas, lo que provocaría gradualmente la pérdida de las mismas; dadas estas condiciones la línea de costa avanzaría hacia el continente, eliminando la zona de humedal.

Si bien, la aportación de la actividad humana en el calentamiento global y las consecuencias de éste siguen en tela de juicio, es innegable que las acciones antrópicas en las costas de la península de Yucatán han provocado un estado de daño alarmante por la pequeña escala temporal en que esto ha sucedido. En la costa noreste del estado de Quintana Roo, muchas de las playas han sido modificadas directamente, para albergar actividades turísticas y/o industriales, con la implementación de estructuras marinas o rellenos de arena, así como uso y explotación de esquemas sociales y económicos sobre ellas; e indirectamente a través de los impactos en la hidrología y ecología de los ambientes costeros. La construcción de edificaciones sobre las dunas de las playas y los rompeolas sobre la zona litoral han limitado el comportamiento natural del sedimento en el sistema litoral, muchos de los humedales o zonas de manglar, así como lagunas costeras han sido modificados alterando la relación natural con las costas. Todos estos cambios debilitan la capacidad de respuesta natural de la costa ante los efectos adversos que provocan las tormentas tropicales y huracanes y obviamente las hacen mucho más vulnerables al cambio climático de largo plazo. Las actuaciones que urge llevar a cabo, entonces, deben encaminarse a resolver los problemas de corto y mediano plazo que han sido provocados, en su mayoría, por mala planeación e irresponsabilidad en el desarrollo costero a fin de restaurar los recursos naturales que se han dañado gravemente sin necesidad de cambio climático alguno.

## **ASPECTOS GEOLÓGICOS DE LA COSTA NORESTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO Y LA PENÍNSULA DE YUCATÁN**

La península de Yucatán (figura 10); colinda al norte y al oeste con las aguas del Golfo de México, mientras que al este con el Mar Caribe. Políticamente, la extensión territorial de la pe-

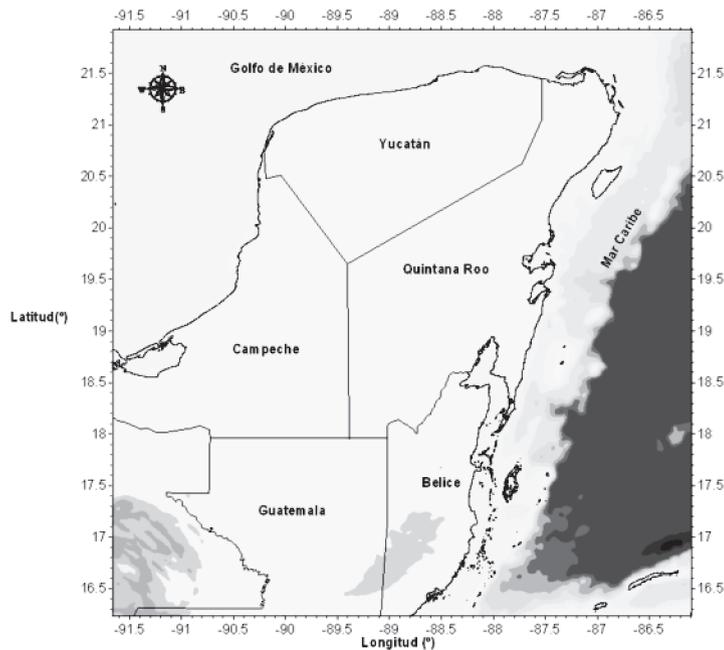


Figura 10. Península de Yucatán.

nínsula se encuentra dividida en tres estados: Yucatán (39 288.55 km<sup>2</sup>), Campeche (56 033.96 km<sup>2</sup>) y Quintana Roo (43 869.49 km<sup>2</sup>) (INEGI, 2007).

Los rasgos morfológicos que exhibe una costa son función de los distintos agentes, fenómenos y procesos que actúan en ella, por otro lado la respuesta que muestran los materiales de la playa ante el embate del oleaje, las corrientes marinas, el viento y el acarreo litoral depende de las características físicas de las arenas de la línea de playa. En la línea de costa del noreste de Quintana Roo es posible identificar que el material de depósito predominante en las playas, proviene de afloramientos de roca sedimentaria consistente en calcita o residuos calcáreos de organismos marinos, por lo que es común encontrar pequeños cantiles y salientes que dividen la línea de costa en múltiples celdas litorales. La identificación de calizas<sup>2</sup> en la plataforma continental de las playas del noreste de la península de Yucatán, provoca que éstas se diferencien del resto de las playas de la península. La forma que esboza la línea de costa del estado de Quintana Roo fue originada por procesos tectónicos, ya que existe una falla geológica con dirección norte-noreste-suroeste. Esta falla hace que algunas playas del sur del estado sean extremadamente confinadas en comparación con otras al norte y noreste de dicho estado. Debido a la ac-

<sup>2</sup>Sedimento consistente de calcita o de residuos calcáreos de organismos. Con frecuencia contiene minerales de dolomita, partículas arcillosas y arenosas. A la caliza se le llama además según el componente o textura de la misma (oolítica, compacta, cristalina, detrítica, etc.)

tividad tectónica que se registró en el pasado en esta región (las costas del estado de Quintana Roo han sido tectónicamente estables desde el último período interglaciar, 4000-5000 años antes), se cree que la isla de Cozumel surgió a partir de un encallamiento tectónico. Siendo precisamente, la isla de Cozumel la que interrumpe la barrera arrecifal Mesoamericana que se localiza de manera intermitente y paralela a la línea de costa de Quintana Roo, a lo largo de 650 kilómetros. A causa de la naturaleza geológica de la costa del noreste de la península, es posible encontrar cientos de cayos o islotes en la parte posterior del arrecife. Una peculiaridad que se observa en el margen este de la península, es la presencia de lagunas someras que se encuentran delimitadas con manglares que crecen sobre terrenos de lodo calcáreo o de los mismos arrecifes de coral (West, 1962).

Para tratar de comprender el comportamiento de los sistemas litorales, es necesario analizar la evolución histórica de éste, pero desde una perspectiva global que permita realizar conjeturas acerca de la respuesta que tendrá el sistema en un futuro; el estudio del marco global debe iniciar desde la composición geológica de la región en la cual se encuentra inmerso el sistema. Los sistemas litorales de la Riviera Maya y de Cancún se localizan en una península cuya composición geológica consiste en carbonatos autigénicos y anhidritas que se originaron desde el Cretácico Medio-Aptiano (124.5 MA) hasta el Mioceno (23.3 MA); siendo ésta la principal característica geológica que comparten la península de Yucatán y la plataforma de Florida. El análisis de sedimentos cretácicos ha demostrado un hundimiento continuo del estrato marino que se presentó desde el Cretácico (145.6 MA) hasta parte del Eoceno (56.5 MA); siendo en el Cretácico donde prevalecieron las condiciones necesarias para la formación de material evaporítico. Debido a la gran cantidad de rocas evaporíticas localizadas en la península y a su amplia extensión geográfica, desde el norte de Guatemala, sureste de Chiapas y norte de la península, se reconocen a todas las “evaporitas de Yucatán” como una combinación de anhidritas, yesos, dolomías y calizas del Cretácico Medio (97 MA). La península de Yucatán se encuentra cubierta casi en su totalidad de sedimentos del Terciario<sup>3</sup> (López, 1973).

La península de Yucatán es una porción de tierra que emergió en el Cretácico; durante la Era Paleozoica (570 MA) la península permaneció bajo el nivel del mar (figura 11a) mientras que el territorio de México se identificaba como un archipiélago de islas de diferentes tamaños. Esta condición prevaleció durante los periodos del Triásico (245 MA) y Jurásico (208 MA) (figuras 11b y 11c). A partir del Cretácico Inferior (145.6 MA) se presentaron las condiciones necesarias para el depósito de grandes masas de evaporitas (figura 11d). Sin embargo, la inexistencia de sal en la tierra que emergió, indica que la sedimentación de las evaporitas (calizas, dolomías y anhidritas) se iniciara a partir del Albaniano-Cenomaniano (112-97 MA).

En el Cretácico Superior (65 MA), un lado de la porción central comenzó a emerger hasta quedar expuesta. En el Terciario y Cuaternario (figuras 11e y 11f) se presentaron facies<sup>4</sup> de plataforma somera en ambientes de supramarea<sup>5</sup>, que fueron generados por la continua oscilación

<sup>3</sup> *cf.*: figura 8 para referencia de las escalas geológicas.

<sup>4</sup> Conjunto de rocas con determinadas características.

<sup>5</sup> Zona de la costa que se encuentra delimitada por el nivel de pleamar de la marea.

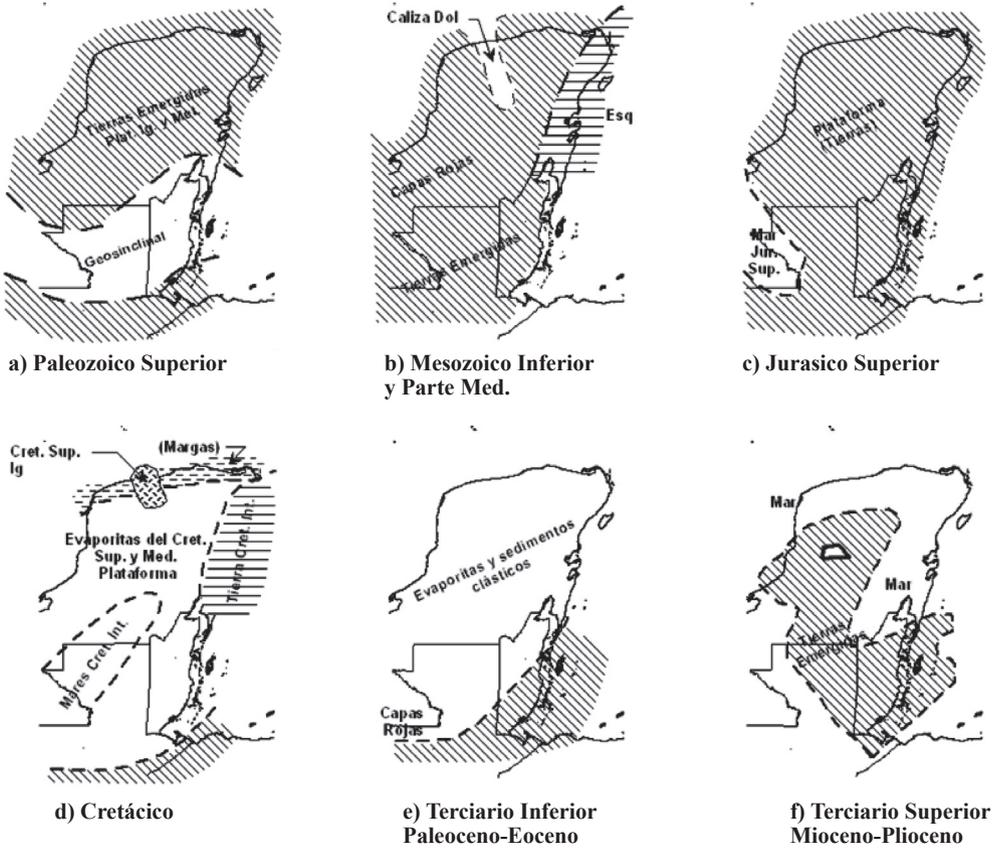


Figura 11. Paleogeología de la península de Yucatán (López, 1973).

del nivel del mar. Al final del Plioceno (2.48 MA) y ya en el Cuaternario (1.64 MMA) la península adquiere la forma actual, observándose alineamientos de arrecifes al norte del banco de Campeche, los cuales se encuentran formados esencialmente de material calcáreo; ya que la carencia de ríos en la masa de tierra peninsular limita de una manera importante la presencia de sedimentos del tipo terrígeno. En la tabla 1 se presenta la columna geológica de la península de Yucatán (Butterlin y Bonet, 1963; López 1973).

Así, desde el punto de vista morfo-tectónico se concluye que la península de Yucatán se originó a partir de la emersión de la plataforma continental; en la mayor parte de ella se identifica una llanura de relieve moderado y suave, mientras que en la parte oriental se profundiza rápidamente por erosión. Esta porción de tierra es una zona tectónicamente estable, en la que se observan rasgos casi planos por la ausencia de relieves positivos de importancia; que facilitan la libre precipitación de carbonatos que más tarde darán lugar a la formación de rocas carbonatadas. Una de las características de la porción central y norte de la península de Yucatán es que

**Tabla 1.** Columna geológica de la península de Yucatán (CNA, 1991).

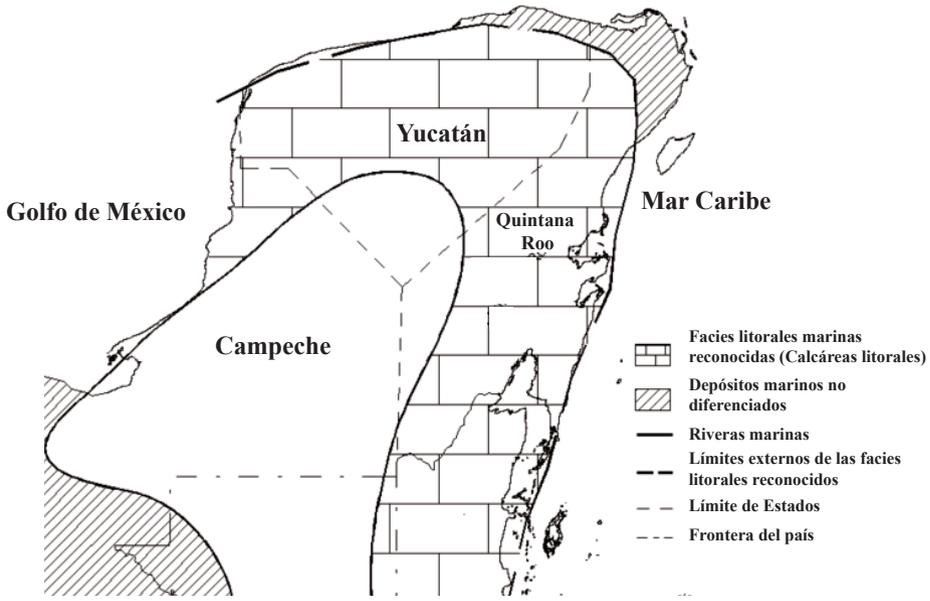
Edad	Espesor (m)	Litología
Reciente y Pleistoceno (del presente a 1-5 millones de años).	100	Calizas coquiníferas color crema con abundantes huellas de moluscos.
Plioceno y Mioceno (1.5 a 23 millones de años).	200	Formación Carrillo Puerto, calizas fosilíferas blancas a amarillentas, duras y masivas, con calizas arenosas interestratificadas .
Oligoceno (23 a 36 millones de años).	260	Calizas blancas a cremas, con capas de margas arcillosas blancas y bandas silíceas.
Eoceno Superior (36 a 42 millones de años).	100	Formación Chichen Iztá (miembro Chumbec), calizas blancas, cristalinas y masivas.
Eoceno Medio (43 a 52 millones de años).	185	Formación Chichen Iztá (miembro Pisté), calizas microcristalinas color blanco, de grano fino con horizontes arcillosos, las calizas presentan textura sacaroides.
Paleoceno-Eoceno Inferior (52 a 66 millones de años).	100-350	Formación Chichen Iztá (miembro Abacal). Formación Eoceno Inferior Indiferenciado. Formación Icaiché. Calizas blancas cristalinas y dolomitas silicificadas, con yesos hacia la parte inferior.
Cretácico (66 a 144 millones de años).		Margas, lutitas, calizas, dolomías y evaporitas.

al no existir ríos superficiales a través de cuales fluya el agua de las precipitaciones atmosféricas o de la condensación, el líquido se percola hacia el subsuelo formando mantos freáticos; ésta agua subterránea tiende a disolver las calizas superficiales (fenómeno conocido como karst) originando cenotes. Otra consecuencia de la falta de drenaje superficial es que no existe aporte de sedimentos terrígenos al mar.

En la figura 12, se muestra el mapa geológico de la península de Yucatán (Butterlin, 1958; López, 1973; Nolasco, 1986; CNA, 1991). Los sedimentos carbonatados del Pleistoceno (1.64 MA) y del Holoceno (0.61 MA) fueron ampliamente distribuidos en las márgenes litorales de la plataforma de la península, en una etapa transgresiva, donde el nivel del mar alcanzó de 3 a 6 metros por encima del nivel actual (figura 7). Los sedimentos calcáreos depositados son característicos de ambiente eólico-costero y de playa (Szabo *et al.*, 1978).

## CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE PUNTA MAROMAS A CANCÚN

Una vez que ha sido establecido el marco geológico global de los sistemas litorales del noreste de la península de Yucatán a través de los diversos periodos y épocas geológicas, es necesario especificar las características geológicas desde una perspectiva más regional. Para ello, el análisis de los sedimentos que se encuentran en la zona de estudio puede abordarse a partir dos peculiaridades importantes que se observan en la región de Tulum-Punta Maromas-Puerto Morelos-Cancún.



**Figura 12.** Mapa geológico de la península de Yucatán.  
(Modificada de Butterlin y Bonet, 1963).

La zona de estudio presenta dos características relevantes: 1) el sedimento que se deposita en las playas es una acumulación de calcarenitas<sup>6</sup> y 2) las planicies costeras se generaron a partir del incremento del nivel de mar en el Pleistoceno Tardío (0.1 MA). Las rocas carbonatadas que se identifican en las playas, se componen de material oolítico<sup>7</sup> que se genera por la acción de las olas y corrientes paralelas a la costa. La sedimentación en la línea de costa del noreste del estado de Quintana Roo es diferente a la que se plantea en las costas del Mar Caribe, ya que en dicho modelo se centra la depositación de material carbonatado en bancos de material, dominados por mareas.

En la región de la línea de costa que se analiza es posible identificar una planicie de paleodunas, la cual se eleva por encima del nivel del mar de 5 a 50 metros y tiene una longitud de 150 kilómetros, con un espesor que varía de 0.5 a 4 kilómetros; dicha estructura geológica reposa sobre un estrato de material carbonatado. La planicie de paleodunas formada en el Pleistoceno Tardío cubre el noroeste de la península y termina en la frontera sur de Xel Ha. En su parte más ancha, la planicie tiene alrededor de 20 paleodunas que son paralelas a la actual línea de costa. Las crestas de las paleodunas son de 1 a 5 metros sobre el nivel del valle de las mismas y la separación que existe entre paleodunas es de 50 a 200 metros. En el continente y en la zona donde se identifican las paleodunas, se considera un bajo relieve kárstico con una elevación de 8 a 10

<sup>6</sup>Sedimentos calcáreos con diámetros aproximadamente de 1/16 milímetros, en este caso de origen bioclástico.

<sup>7</sup> Esferas calcáreas con diámetros inferiores a 2 milímetros.

m sobre el nivel del mar. Por otra parte, la fisiografía de las paleodunas suele ser la típica que se observa a partir de la depositación de arenas provenientes de ambientes costeros. Al noroeste de Cancún se localizan 2 cinturones diferentes de paleodunas y valles del Pleistoceno (1.64 MA). La superficie costera data del Pleistoceno Tardío (0.126 MA) y se encuentra compuesta por calizas micriticas<sup>8</sup> o calizas provenientes de arrecifes y de las partes frontales de los mismos (Ward y Brady, 1979; Ward, 1985).

Por otro lado, la línea de costa que se ubica entre Cancún y Xel Ha muestra tres estratos de sedimentos:

1. El estrato inferior se compone de facies inferiores, que son una característica de granos bioclásticos<sup>9</sup> finos a granos medios de calcarenitas con pequeñas láminas de calciruditas<sup>10</sup>. Los componentes dominantes de los detritos<sup>11</sup> de arena son: algas verdes de la especie "*Halimeda*", moluscos y granos microcristalinos de material aglomerado; los conglomerados de lentejuelas son compuestos de conchas de moluscos, cabezas de coral y litoclastos<sup>12</sup> de caliche negro y gris.
2. El estrato intermedio se encuentra compuesto de materiales que van de bioclastos y oolitas bien graduadas a calcarenitas gruesas con numerosas capas de conchas y lentejuelas de calciruditas.
3. Para el estrato superior de calcarenitas, las facies más importantes se consideran como: bien clasificadas a clasificadas, de material oolítico con granos finos a gruesos; así como, calcarenitas biogénicas con inclusiones de capas de conchas.

Al norte de Puerto Morelos, la planicie costera del calcarenitas reposa sobre una corteza subáerea (caliche) donde el material que se identifica en la parte superior son calizas de coral sin datar o registro; mientras que al sur, bajo la planicie de paleodunas, las calcarenitas reposan sobre unas micritas no estratificadas y calcarenitas que pasan sobre la misma corteza subáerea. Las calcarenitas que se encuentran debajo de la planicie costera entre Cancún y Puerto Morelos, se depositan sobre una superficie ondulada de caliches de una antigua caliza.

Debido a la evidencia que presenta la configuración del fondo marino en la parte interna de la zona litoral, en muchas de las playas es posible afirmar que las olas y las corrientes longitudinales son los principales agentes que ocasionan la depositación de arena en las costas del noreste de la península de Yucatán; ya que el fondo emigra predominantemente de manera paralela a la costa y hacia la zona oceánica del sistema litoral. Cabe señalar que en la zona no es posible identificar depósitos de canales regidos por la marea.

Por otro lado, la abundancia de interclastos y corales que alcanzan el tamaño de las gravas en la planicie costera, demuestra que éstos fueron depositados por fuertes oleajes y corrientes litorales que generalmente se asocian con las tormentas. Las conchas y cabezas de coral que

---

<sup>8</sup> Granos de carbonato que se disuelven en el medio.

<sup>9</sup> Sedimentos de origen animal o vegetal.

<sup>10</sup> Sedimentos calcáreos constituidos por pequeños guijarros, intraclastos y bioclásticos.

<sup>11</sup> Fragmentos de rocas o minerales procedentes de rocas preexistentes.

<sup>12</sup> Pequeños fragmentos de roca.

se identifican, aparentemente son depositadas a partir de las secciones de los arrecifes; suele ser frecuente encontrar en las facies de los asentamientos transversales mezclas de vestigios de corales y moluscos que fueron modificados por la abrasión así como, conchas, caliche, calcarenitas intraclásticas.

A partir de la comparación con otras costas, tales como las de Florida, Bermudas y Carolina del Norte, el patrón de los eventos eustáticos del nivel del mar durante el Pleistoceno y el Holoceno se pueden resumir de la siguiente forma<sup>13</sup> (Ward y Wilson, 1974):

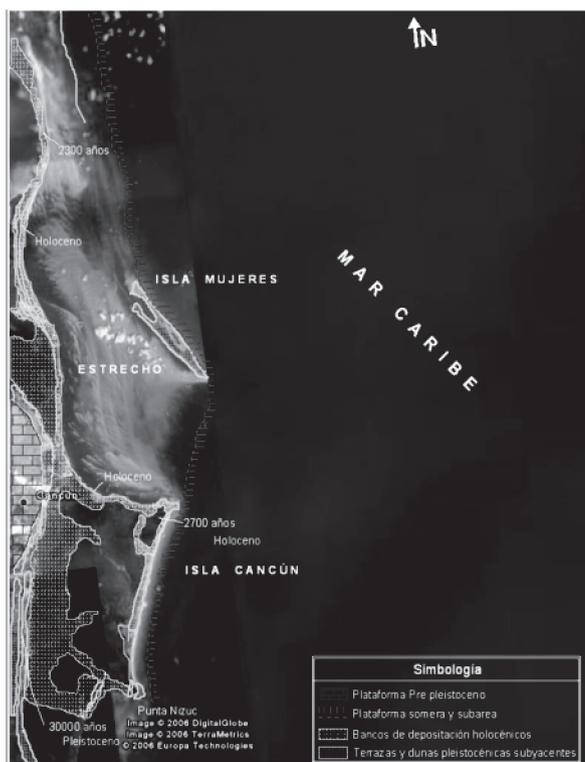
1. A fines del Pleistoceno, en el Sangamoniano, el nivel del mar subió 5 metros (tomando como referencia el nivel actual) originando un depósito de sedimentos de playa, lo cual se puede evidenciar hacia el sur y hacia el noroeste de Puerto Juárez (hoy en día, zona metropolitana de la ciudad de Cancún).
2. En el Wisconsiniano, el nivel del mar bajo 2 ó 3 metros con respecto al nivel actual, por lo que la línea de costa se retiró mar adentro. Al estabilizarse el nivel, se formaron varias terrazas de sedimentos de forma paralela a la línea costera actual. El nivel del mar siguió descendiendo lentamente y dejó como testigos de este hecho, una serie de terrazas escalonadas que fluctúan entre los 10 y los 140 metros por debajo del nivel actual.
3. Durante el período post-glacial, hace 18 000 años, el nivel del mar osciló con franca tendencia transgresiva, formándose varias terrazas que se encuentran entre los 60 y 70 metros ó los 30 y 40 metros bajo el nivel del mar actual.
4. Hace 5 000 ó 6 000 años, el nivel del mar estaba 4 ó 5 metros por debajo del nivel actual, el cual ha ido ascendiendo gradualmente hasta alcanzar la cota actual.

En la línea de costa que se localiza desde Tulúm hasta Punta Sam, se observan principalmente los sedimentos eolianíticos del Pleistoceno, dunas y arenas de playa del Holoceno (figura 13). En la costa de la zona de Tulúm se observan sedimentos de playa del Holoceno y eolianitas del Pleistoceno. En Playa Paraíso, los sedimentos recientes están constituidos por arena fina, moderadamente bien clasificada, formada principalmente por corales y, en menor proporción, por microforaminíferos bentónicos, espículas de alcionarios, etc. Esta arena procede en su mayor parte de la destrucción de la barrera arrecifal, localizada aproximadamente a 0.5 km de la costa. La barrera arrecifal finaliza hacia el norte en Punta Nizuc, extremo sur de Cancún, a unos 100 m de la orilla de la playa. Aparentemente, el arrecife termina en este lugar por dos razones: a) la disminución de la profundidad del agua hacia el norte y b) debido a la competencia que existe entre el desarrollo de arrecifes y los bancos de oolitas, las cuales son más abundantes al norte de Punta Nizuc, haciendo que el fondo se encuentre en constante movimiento. En Tulúm, afloran eolianitas del Pleistoceno formando los acantilados del Mar Caribe y cuya composición litológica varía de un sitio a otro, de acuerdo a las condiciones locales de depósito.

En la zona de playa que corresponde a Puerto Morelos y su periferia, el material sedimentario está constituido por calizas coquinoideas formadas en ambiente somero de playa, en la que se observan buenos ejemplos de bioespátita, bioesparrudita y ooespátita. Esta coquina se compo-

---

<sup>13</sup> *vid.* Figura 5, figura 8 y figura 11.



**Figura 13.** Configuración de las áreas costeras en el periodo del Pleistoceno. (Google Earth; Ward y Brady, 1979).

ne esencialmente de fragmentos de conchas y moluscos, así como de corales mal clasificados (Formación Carrillo Puerto).

En las playas de Cancún e Isla Mujeres, los agentes que controlan la movilidad del sedimento son: las corrientes litorales, la acción del oleaje, las mareas y el viento; antes de las modificaciones antropogénicas en la zona, dichos agentes distribuían el material calcáreo en cinco ambientes sedimentarios (Ward y Brady, 1979; Aguayo *et al.*, 1980):

1. Complejos arrecifales, que se desarrollan desde el extremo sur de Cancún hacia el sur de Tulum,
2. Playas disipadoras de alta energía en mar abierto, generando gran cantidad de oolitas que son depositadas a lo largo de la isla de Cancún,
3. Megarrazaduras de fondo, entre el continente e Isla Mujeres (Bahía Mujeres),
4. Dunas eolíticas y litorales, las cuales conforman a las dos islas, Cancún y Mujeres, y
5. Lagunas restringidas que se desarrollaron durante el Pleistoceno Tardío y el Holoceno a causa del depósito de tómbolos en los extremos sur y norte Isla Cancún.

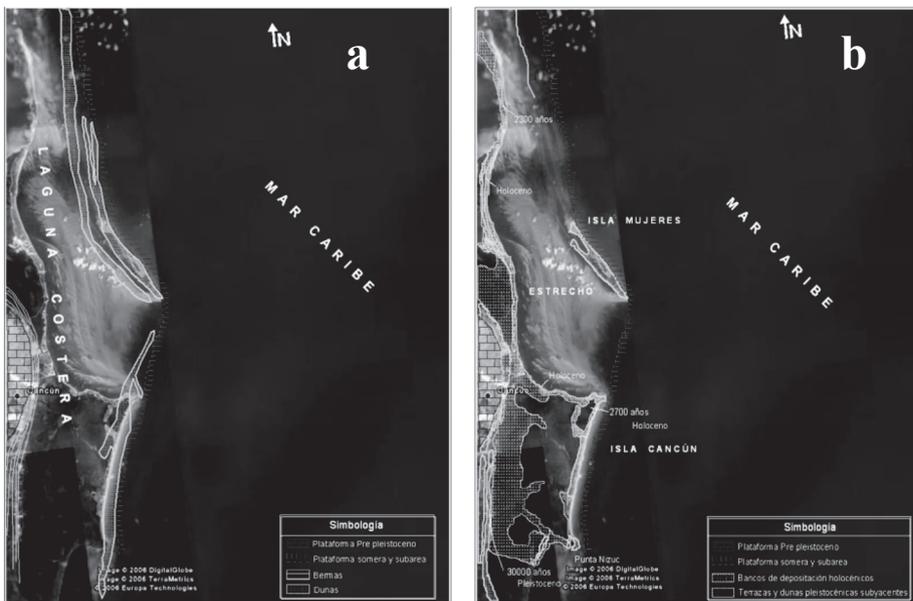
Debido a la relevancia que posee Cancún en el sector turístico del país y a los grandes problemas costeros que afronta es necesario detallar de manera particular las características de

esta isla barrera. Cancún mide aproximadamente 13 kilómetros de largo por 0.5 km de ancho. La isla barrera se encuentra unida a la península por medio de unos tómbolos situados en los extremos norte y sur. Las partes principales de Cancún corresponden a remanentes de crestas de dunas pleistocénicas (figura 14a), las cuales se depositaron cerca del borde externo de una terraza situada actualmente a 10 metros de profundidad la cual se formó durante un descenso del nivel del mar, que ocurrió probablemente en la etapa temprana de la regresión Wisconsiana (hace 30 000 años). Posteriormente, durante la transgresión holocénica se formaron tómbolos en ambos extremos de la isla, acumulándose además dunas en el extremo oriental del cinturón eolianítico del Pleistoceno (figura 14b) (Ward, 1974). La plataforma continental es estrecha al sur de la isla y está controlada por una serie de bloques fallados normalmente; los sedimentos se depositan actualmente en un ambiente lagunar, protegidos por una barrera arrecifal. Al norte, los sedimentos se acumulan en dunas y bermas en la zona litoral a lo largo del estrecho.

En la isla barrera de Cancún se detectan 3 tipos de ambientes depositacionales:

1. Ambiente de playa
2. Ambiente de laguna abierta o estrecha
3. Ambiente de laguna restringida y protegida

El ambiente de playa se presenta a todo lo largo de la costa oriental de la isla, donde el impacto del oleaje del Mar Caribe es casi normal a la línea de costa. El material que era posible identificar antes que se establecieran los desarrollos turísticos era arena muy fina y muy bien clasificada, formada casi en su totalidad de oolitas y en menor proporción fragmentos de corales.



**Figura 14.** Configuración de las áreas costeras en el periodo del a) Pleistoceno (1.64 MA) y b) Holoceno (0.61 MA) (Google Earth; Ward y Brady, 1979).

La línea de playa forma parte de un cinturón de sedimentos oolíticos que corre paralelamente a la costa del Mar Caribe, desde Cancún hasta Isla Blanca; esta isla se cataloga como una formación morfológica que disipa grandes cantidades de energía del oleaje, dado que el área es influenciada por un oleaje persistente e intenso. Es por ello que en las playas se presenta una buena clasificación del sedimento. En la actualidad se carece de dunas naturales, pero en el pasado las dunas holocénicas estaban formadas de oolitas bien clasificadas. La arena de la zona de rompientes de Punta Cancún está constituida por material arenoso muy grueso y moderadamente bien clasificado conformado en su totalidad por fragmentos biogénicos. Actualmente mucha de esta arena proviene de los rellenos que se han hecho con la finalidad de evitar la erosión de las eolianitas pleistocénicas que forman la punta. Los sedimentos de playa de Punta Nizuc están formados por arena mal clasificada que está constituida por fragmentos de corales y menor cantidad de moluscos, briozoarios, espículas de esponjas, alcionarios y equinodermos, micro foraminíferos bentónicos y escasas oolitas. Este material proviene de la barrera arrecifal que se encuentra al sur-suroeste de Punta Nizuc así como de los corales que se localizan en las cercanías de dicho lugar (Aguayo *et al.*, 1980).

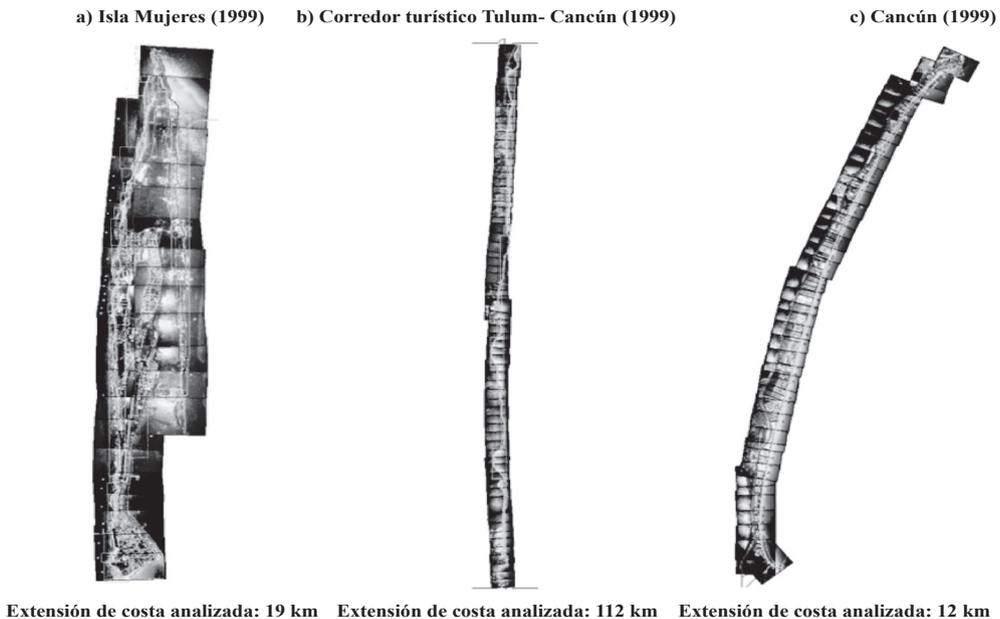
Las rizaduras y megarrizaduras del fondo marino han sido usadas para describir el ambiente de laguna abierta. Se advierte que los depósitos sedimentarios están influenciados por la corriente del Caribe que pasa a través del estrecho que existe entre Isla Mujeres y la península. Las rizaduras del piso marino consisten de arena fina muy bien clasificada formada principalmente por corales y microforaminíferos bentónicos. Gran parte de los sedimentos probablemente provienen de la barrera arrecifal que se encuentra al sur de Cancún y son transportados por la corriente del Caribe y depositados en el estrecho. La megarrizadura en la costa del estrecho adyacente al tómbolo norte, consiste en arena fina, moderadamente bien clasificada y se compone en su totalidad de oolitas, con menores cantidades de fragmentos biogénicos. El material proviene principalmente del cinturón oolítico holocénico de la costa oriental de la isla, y de las eolianitas pleistocénicas. El sedimento resultante es transportado hacia el noroeste por la corriente del Caribe.

En el ambiente de laguna protegida y restringida entre Cancún y la península de Yucatán, se encuentran una serie de lagunas, la mayor de ellas la Laguna Nichupté. La laguna se encuentra protegida del Mar Caribe por la isla barrera y su circulación es restringida debido a los dos tómbolos situados en los extremos norte y sur de la barrera. La única comunicación directa que existe entre la laguna y el mar son unos canales de marea angostos que atraviesan los tómbolos. La laguna principal contiene bancos calcáreos de forma alargada, los cuales la dividen en tres lagunas menores interiores, casi aisladas una de la otra. Los bancos se forman a expensas del crecimiento de manglares y su localización está controlada por las terrazas y dunas pleistocénicas subyacentes. Estos bancos aíslan a las pequeñas lagunas del Inglés y Bojórquez de la parte principal de la de Nichupté. La superficie rocosa que se origina de la península tiene una inclinación hacia el oriente, encontrándose ésta en la parte central de la laguna, a una profundidad de 12 metros; esta profundidad se mantiene más o menos constante hacia el oriente, hasta que abruptamente disminuye, aflorando nuevamente en la porción occidental de la Isla Cancún.

## CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La caracterización geomorfológica de la zona que abarca el corredor turístico Tulum-Cancún (Riviera Maya) y Cancún-Isla Mujeres, fue realizada a partir de la construcción de fotomosaicos georeferenciados de imágenes aéreas de escala 1:5000 (figura 15); para la zona de la Riviera Maya, las fotografías con las cuales se trabajó, fueron tomadas en el año 1999. Para la isla barrera de Cancún, la caracterización se desarrolló utilizando diferentes series de imágenes, correspondientes a los años 1985, 1990 y 1999. Debido a la importancia económica que representa Cancún para el sector turístico del país (derrama económica basada en más de 30 000 habitaciones de hotel), se analizaron los compartimientos litorales que se desarrollaron antes y después del huracán Gilberto (1988), así como la configuración costera que existía en este sitio, antes del huracán Wilma (2005).

Para efectuar el reconocimiento de las diversas formas morfológicas que existían en las áreas de estudio, los sistemas litorales fueron conformados por otros subsistemas y microceldas (celdas y compartimientos litorales). El origen de valorar a la costa como un sistema que se encuentra integrado por diferentes subsistemas, permite identificar las interrelaciones que coexisten entre las variables que conforman al sistema original. Es precisamente la complejidad de la interacción entre los distintos elementos del sistema, lo que faculta a que éstos lleguen a ser



**Figura 15.** Fotomosaicos elaborados para la caracterización geomorfológica.

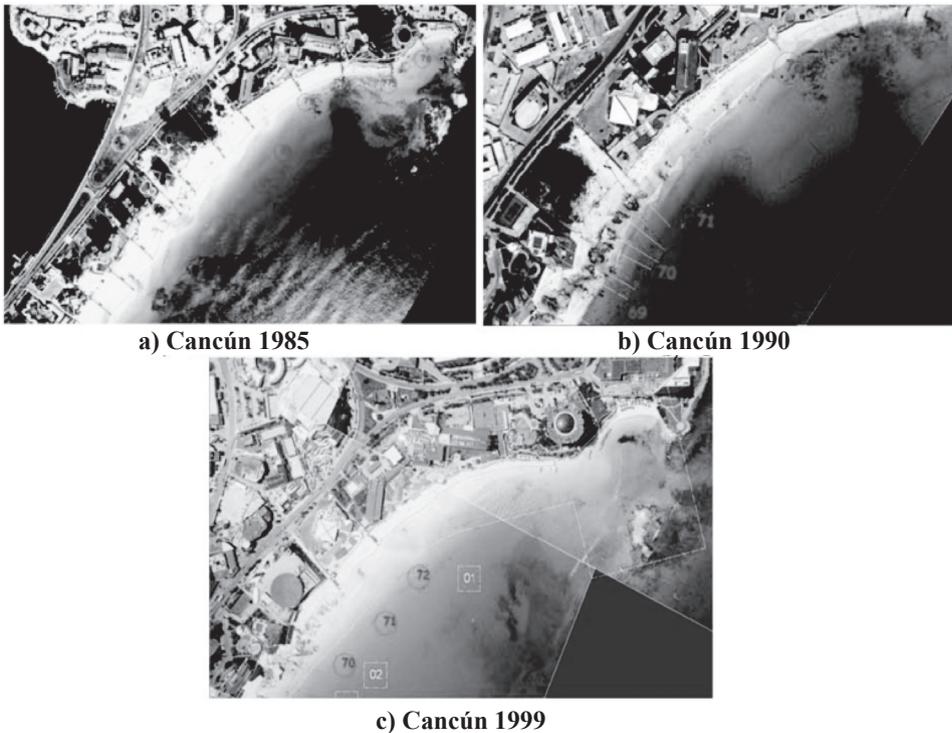
comprendidos mediante el uso de niveles de generalización. El detalle en el cual los sistemas litorales se definen puede variar de acuerdo al enfoque de generalización que se elija; existen tres maneras con las cuales es posible identificar la correlación que existe entre los elementos que participan en un sistema litoral: el enfoque de una caja negra es utilizado para identificar solamente las principales partes de un sistema; por el contrario, un enfoque de caja blanca se relaciona al estudio cuantitativo de la relación de todos los agentes, procesos y fenómenos que se reconocen en las celdas litorales y finalmente, en el enfoque de caja gris se identifican los elementos que conforman sistemas y subsistemas pero de manera cualitativa y se establecen las relaciones que existen entre las variables de los sistemas litorales. Para la caracterización que fue desarrollada en este trabajo, en el estudio de las celdas litorales, se hizo uso del análisis de caja gris, con lo que fueron identificados los componentes del sistema, tales como: salientes, bajos, afloramientos de rocas, ríos, barras, bocas litorales, arrecifes, etc.

Para generar una base de datos que almacenara el inventario geomorfológico se obtuvieron: las coordenadas geográficas de las fronteras que delimitaban las celdas litorales fueron obtenidas, las dimensiones físicas de la playa (ancho y longitud de la playa), el material predominante que se observaba sobre la playa (arena, grava, rocas o una combinación de ellas), la forma en planta que presentaba la línea de playa (recta, semirectilínea o la forma de una playa que se encuentra entre dos salientes, ya sean naturales o edificadas por el ser humano). Si la forma de la playa de la celda presentaba una forma de curva (playa encajada), las dimensiones de las líneas de control que se proyectan en este tipo de playas eran medidas de manera aproximada.

Los rasgos morfológicos relevantes que se consideran en la caracterización, en caso de existir, son: tómbolos, bajos, barras, semitómbolos, arrecifes, deltas, fuentes (pequeñas desembocaduras de escurrimientos superficiales), drenes naturales (cañones submarinos), afloramientos de agua y rocas. Solamente se consideraron los rasgos antes mencionados, debido a que éstos influyen más sobre las formas que las playas de arena tienden a desarrollar. Para delimitar las celdas litorales, se utilizaron como fronteras las salientes naturales; adicionalmente, si se observaban estructuras marinas construidas sobre la playa, dichos obstáculos se consideraban de igual manera, como fronteras de las celdas litorales.

Con el objeto de realizar un inventario más detallado de las características de las playas, al analizar las celdas, se identificaron las estructuras marinas, edificadas por el hombre, que se encontraban sobre la orilla de la playa (escolleras, rompeolas emergidos y sumergidos); además se determinó si éstas provocaban o tenían algún tipo de influencia positiva o negativa sobre la forma de las playas aledañas a ellas. Finalmente, tratando de asociar el impacto antropogénico en las playas, se clasificaban las construcciones (de uso turístico o residencial) que existían sobre alguna de las secciones de la playa. Una vez que era obtenida la información referente a la morfología de las celdas litorales, el análisis concluía con un diagnóstico o comentario acerca de los rasgos morfodinámicos o morfológicos que se observaban en cada una de las celdas analizadas.

En lo que respecta a la caracterización que se realizó a la línea de playa de Cancún del año 1985 (figura 16a), solamente se encontró una celda litoral, la cual tenía como fronteras físicas



**Figura 16** Celdas litorales de Cancún.

Punta Nizuc y Punta Cancún. En toda la línea de playa no se apreciaron características morfológicas que influyeran de una manera drástica en la forma que tenía la playa; de igual manera no se identificaron obstáculos naturales que llegaran a alterar la configuración de la playa, así como el acarreo litoral. El rasgo más relevante desde el punto de vista geomorfológico fue el relacionado a la formación de barras paralelas a la línea de playa; en algunas zonas, las barras podían considerarse como del tipo ondulatorio. Otro aspecto interesante en la caracterización de la línea de playa de Cancún fue observar el ancho de la playa, puesto que se registró un promedio de 20 a 23 metros. Es importante resaltar que el fotomosaico se integraba con fotografías de 1985, tres años antes del paso del huracán Gilberto por la península de Yucatán y al cual se le atribuyó la mayor erosión de playas hasta entonces en la zona y resultó ser el elemento desestabilizador del equilibrio del sistema litoral de Cancún. En 1985, a través de las imágenes, ya era posible percibir que las playas de Cancún sufrían de problemas graves de erosión, con la reducción del ancho de playa de 40 metros a 20 metros.

Para la caracterización de la línea de playa de Cancún del año 1990 (figura 16b), dos años después del huracán Gilberto, se identificaron siete celdas litorales; los aspectos que resaltaron del análisis de este fotomosaico fueron los relacionados a la aparición de elementos rocosos en las playas. A partir de los afloramientos rocosos, algunas celdas se dividieron en microsistemas.

En ciertas celdas se reconoció la formación de barras perpendiculares a la playa; la erosión que presentaban algunas celdas con respecto a otras era evidente, por ejemplo, la celda que tenía como una de sus fronteras a Punta Nizuc, era inobjetable el grado de erosión que sufrían las playas, ya que en algunos de los sectores de la línea de la playa se encontraban completamente erosionados, conservando tan sólo una franja de 3 metros. La aparición de los estratos rocosos demostró la inestabilidad del equilibrio que tenía la playa. Para el año 1999 (figura 16c), se observó que la línea de playa de Cancún, se encontraba compuesta de 10 celdas litorales. A partir de la delimitación de la playa, se registró que antes del huracán Gilberto (1988), el estado morfológico de la playa, no podía considerarse como estable; posteriormente al huracán, el sistema litoral trata de restaurar su estado anterior al huracán Gilberto, pero al ser alterados los mecanismos de retroalimentación a lo largo de veinte años, el sistema no posee la capacidad de autoregenerarse y continuamente se erosiona (Delgado, 2007), por lo que tienden a desarrollar continuamente un estado de equilibrio metaestable, lo cual ocurriría si el sistema no hubiera sido rigidizado. Se sabe que, una vez alterado, el sistema de playa en Cancún se encuentra en un estado de erosión crónico. El equilibrio de una playa es un concepto que depende del tiempo y éste puede inferirse a partir de la morfología que se identifica en una escala de tiempo particular; el prescribir el equilibrio de una sistema costero debe considerarse como una componente de gran trascendencia en la morfodinámica costera, ya que las distintas formas costeras tratan de ajustarse u oscilar hacia cierto estado de equilibrio, particularmente por la retroalimentación negativa entre las variables que se ven implicadas en los sistemas costeros. El concepto de equilibrio morfológico es una generalización que es muy útil, puesto que éste nos proporciona una visión de los posibles cambios que sufrirá la playa o la costa.

Para la Riviera Maya se reconocieron 67 celdas litorales, lo que mostró de una manera clara, los distintos tipos de playas que pueden formarse a partir del acarreo litoral y la influencia que ejercen el oleaje, las corrientes litorales y las tormentas en la erosión de las playas; a través de la morfología se estudió la gran dependencia que existe entre los arrecifes litorales y la zona de manglar con el sistema litoral. Al distinguir las formas de la línea de playa de Tulúm a Playa del Carmen, se reconoció que éstas conformaban una línea de costa “dentada”, es decir, una costa compuesta con playas de formas rectas, encajadas o semiencajadas.

En la costa que se encuentra localizada entre Tulúm y Xel-Ha, se encontraron estructuras de rocas, que en la mayoría de los casos delimitaban playas con formas encajadas o semiencajadas; en algunas de estas playas se logró identificar cómo la arena que se depositaba sobre la playa, había sido removida, dejando al descubierto estratos de roca. En una longitud aproximada de 40 kilómetros se registraron veinticinco playas encajadas, en otros segmentos de las celdas litorales, se identificaron semitómbolos que según su configuración permitían suponer la dirección predominante del acarreo longitudinal de los sedimentos. En esta zona también fue posible observar que ciertas dársenas descargaban sedimentos y que de igual manera que los semitómbolos, a partir de la pluma de sedimentos era posible corroborar la dirección del acarreo litoral dominante. En catorce de las veinticinco playas expuestas, fue posible encontrar segmentos del arrecife coralino Mesoamericano; en dichas playas, se podía verificar que no se

presentaban problemas de erosión severa, inclusive fue evidente relacionar al arrecife con la forma de las playas; a partir del reconocimiento de los patrones de dirección de los frentes de ola, era posible ver el efecto de la estructura arrecifal sobre el oleaje, ya que dichas estructuras actuaban como rompeolas sumergidos, que provocan la disipación de energía del oleaje. Por otro lado, en la mayoría de las playas encajadas se identificaron vestigios de posibles cordones litorales, que provocaban que la energía del oleaje que pasaba a través del arrecife, al encontrar en su paso hacia la playa a este cordón, la energía se disipará de nuevo, ocasionando con ello, que el oleaje que llegaba a la costa fuera considerablemente menor al oleaje que rompía en el arrecife. Debido a las características de las playas, muchas de ellas se consideraron como disipativas.

Para la línea de playa que existe entre Playa del Carmen y Punta Nizuc se detectaron cuatro playas semiencajadas, exceptuando dichas playas, se encontró que la forma que proyectaban las playas era de líneas semirectas. Precisamente en esta zona fue posible constatar la influencia que tienen el arrecife coralino y la zona de manglar en las costas, por ejemplo en la periferia de Punta Maromas, es posible reconocer una punta de arena, en la cual su comportamiento se rige por el arrecife de coral que se encuentra en la zona exterior de la playa y las corrientes litorales. En la celda correspondiente a esta punta, se observó que las playas presentan problemas de erosión principalmente, por el desplante de estructuras marinas que interrumpen el acarreo litoral que existe sobre la costa. Por medio de las fotografías, fue posible identificar cómo el sedimento se movía a través de la laguna arrecifal, donde una cantidad del volumen de sedimentos oscila entre las playas de la celda y otra cantidad de arena sale del sistema por la ruptura del cordón arrecifal. En la celda correspondiente a Punta Bete, se encontraron evidencias de canales entre el mangle y la playa, que posiblemente tienen la función de desalojar tanto el agua como el sedimento que son depositados por algún evento meteorológico extremo en la zona del humedal. En este sitio se podía observar perfectamente, la interacción que debe de existir entre los elementos de retroalimentación de la playa.

En Isla Mujeres se identificaron 52 celdas litorales, del número total de celdas determinadas en 44 de ellas, se identificó algún elemento rocoso (acantilados, plataformas, salientes, etc.) en la playa. Las playas donde la arena era el material predominante se ubican en la parte noroccidental de la isla; mientras que en la parte suroriental y toda línea de costa de Isla Mujeres que se delimita con el Mar Caribe, se consideraron como playas de acantilados.

Existen múltiples parámetros que se ven implicados en la determinación de la forma de la playa, sin embargo al acarreo litoral se le reconoce como la principal variable que configura un sistema costero; a partir de la caracterización morfológica, en la costa noreste del estado de Quintana Roo se identificaron sistemas litorales donde su forma fue originada por el acarreo y lavado de los sedimentos. Las formas de las líneas de playa entre Tulum y Playa del Carmen son moldeadas, en su mayoría por el movimiento de sedimentos por lavado; mientras que los contornos de las playas de Playa del Carmen a Cancún son generados por el acarreo.

No obstante que todas las playas del mundo presentan cierto grado de erosión y deposición, la naturaleza siempre tratará de reestablecer un balance entre ambos procesos. Cuando

el sistema litoral es modificado por la intervención humana sin comprender las relaciones y las interacciones que existen entre los diferentes componentes del sistema, el proceso de regeneración natural se complica. Precisamente, los problemas de erosión que experimenta Cancún y algunas de las playas del corredor turístico Tulum-Cancún, se agravan por el efecto adverso que han ocasionado los efectos antropogénicos de la zona, puesto que éstos, generalmente, no consideran las respuestas morfológicas que pueden producirse al alterar con sus edificaciones el sistema natural. Entre los principales efectos negativos que producen las acciones antropogénicas en las celdas litorales que se revisaron, se encontró la interrupción del flujo de sedimentos por la implementación de estructuras perpendiculares a la costa, observándose los problemas de erosión que producen dichas estructuras; también se detectó que la infraestructura hotelera, generalmente se edifica en la zona de mangle o de dunas costeras; las secciones de las playas se alteran al construir muros perimetrales. En algunas celdas se detectaba la presencia de rompeolas paralelos a la costa, que en tan sólo algunos casos, solucionaban parcialmente problemas de erosión, pero éstas estructuras modificaban la hidrodinámica y con ello, el comportamiento morfodinámico de toda la celda.

El análisis de morfología costera muestra que los huracanes pueden considerarse como uno de los medios a los que recurre la naturaleza para restaurar las condiciones de equilibrio o para generar nuevos estados en respuesta a alteraciones de largo plazo. Desafortunadamente en muchos de los casos, el comportamiento de los sistemas costeros se concibe como un sistema lineal; sin embargo, éstos son sistemas complejos y dinámicos que exhiben mecanismos de retroalimentación, ya sean positivos o negativos. En el caso de Cancún se identificó que los elementos de retroalimentación negativos, como pudieran ser las bocas litorales intermitentes que existían entre el sistema lagunar y el sistema litoral (Pedrozo, 2008) han sido obstruidas y todo el sistema rigidizado, debido a la construcción de infraestructura. Esto ha ocasionado que la línea de playa ya no tenga la capacidad de recuperar sus equilibrios de manera natural y ha entrado en un estado de erosión continuo. Por otro lado, los mecanismos positivos (*i.e.* las barras y las dunas de las playas de Cancún, en especial éstas últimas) han sido completamente alteradas a tal grado que las edificaciones han sido desplantadas en esta sección de la playa, provocando con ello, una gran vulnerabilidad del sistema litoral; las dunas y las barras representan los conductos por los cuales la playa tiende a tener la capacidad de mantener cierto balance, hasta el momento que el sistema se modifica por los distintos procesos, agentes y fenómenos que se presentan en las líneas de playas.

El equilibrio morfológico que poseen algunas de las playas de la costa de Quintana Roo, se considera dinámico, exceptuando la línea de playa de Cancún que podría haberse encontrado en un equilibrio metaestable hasta antes de la intervención humana. Las playas de la Riviera Maya, especialmente las que se encuentran protegidas por arrecifes, guardan un estado de equilibrio estable de manera temporal, pero de manera contraria, si el equilibrio de dichas playas se estudia a mediano y largo plazo, se consideraría dinámico. Desde la perspectiva de la morfología costera, la costa noreste de Quintana Roo es un caso excepcional para estudiar, ya que en ella se presentan sistemas costeros que son estables, dinámicos o hiperestables; las playas de

Puerto Morelos y Tulúm representan las playas que poseen un equilibrio estático, mientras que las playas de Playa de Carmen, Xcaret y Tres Ríos (entre otras) se consideran con un equilibrio dinámico. La mejor ejemplificación de playas con equilibrio hiperestático en nuestro país, se tiene en toda la isla barrera de Cancún.

Como resultado de la caracterización que se realizó, todas aquellas playas que exhiben la interacción entre los dos mecanismos de retroalimentación, son capaces de regresar a un estado de equilibrio previo a cualquier evento que modifique dicho estado de manera temporal. Los arrecifes coralinos además de desempeñar un papel como disipadores de la energía del oleaje, tienden a consolidar los mecanismos de retroalimentación positiva y negativa.

La comprensión y el conocimiento de la geología de la península de Yucatán, así como el reconocimiento de las características geológicas particulares de la zona de interés, permiten concebir la problemática que experimentan las líneas de playas al carecer de fuentes naturales de abastecimiento de sedimentos una vez, que las playas pierden arena.

El contexto que proporciona reconocer las formas morfológicas que brindan la retroalimentación (positiva o negativa) de los sistemas litorales y cómo dichos rasgos interactúan en ciertos periodos de tiempo, permitirá un manejo y/o explotación sustentables de los recursos naturales del sistema litoral, cuando éstos sean requeridos para satisfacer los diferentes usos (ambientales, protección o recreación) de un costa o playa.

## CONCLUSIONES

Comparar las formas costeras en diferentes sitios, permite identificar una secuencia de las distintas etapas de desarrollo que han sufrido esos contornos hasta el día de hoy. La interpretación correcta de las formas costeras que existen en el presente carecerá de validez, si en ella no existe una apreciación de los diferentes cambios geológicos y climáticos que se han presentado durante el Pleistoceno. Una apreciación del clima de manera global es necesaria para entender la variación de los diferentes procesos geomorfológicos.

La descripción de los rasgos morfológicos puede considerarse como una herramienta primordial para el estudio del comportamiento de cualquier costa, línea de playa y sistema litoral, puesto que permite reconocer e identificar de una manera cualitativa los diferentes agentes, procesos y fenómenos que integran un sistema costero; además este tipo de análisis permite comprender, cómo el medio marino y terrestre interactúan a lo largo de las diferentes escalas de tiempo-espacio que se elija, ya que las interrelaciones desarrolladas entre ambos medios pueden ser abordadas al corto, mediano y largo plazo. Sin embargo, todo análisis geomorfológico deberá estar sustentado bajo un marco geológico que faculte un conocimiento que permita disipar incertidumbres acerca de la génesis y composición de los distintos materiales que se depositan en las costas; dicho conocimiento aportará las claves necesarias para entender de una mejor manera la actuación del sedimento ante los diversos mecanismos que rigen el comportamiento de una playa.

Desafortunadamente, en la mayoría de los casos donde se desea estudiar el comportamiento de una playa, se tiende a subestimar la gran relevancia y utilidad que proporcionan el conocer la geología y la geomorfología de un sitio específico, ya que no se vislumbra que el entendimiento de la composición del material, así como la evolución de los rasgos de las costas y playas a través de diferentes periodos de tiempo, permitirán con ello realizar perspectivas a futuro, acerca del comportamiento del sistema; la información que aportan las herramientas de análisis antes mencionadas, proporcionarán un marco científico que pueden ser aprovechado para un mejor manejo social y ambiental, así como una explotación sustentable de los distintos recursos naturales que se encuentran en una playa.

Es innegable, el hecho que existirá un incremento del volumen de los gases invernadero en la atmósfera de la Tierra y esto se sumará al calentamiento global, lo que a su vez producirá un incremento en el nivel de todos los océanos y mares del mundo, sin embargo, otros factores tienen repercusiones en las variaciones climáticas y cambios en el nivel del mar, es por ello que no es posible afirmar que solo el cambio climático sería el único responsable del posible aumento del nivel del mar. No existen dudas acerca de que en las próximas décadas si se registrará una expansión en el volumen de las masas oceánicas, pero aún no es posible afirmar los efectos del incremento del nivel del mar en una zona específica, considerando los múltiples factores implicados en el ascenso y descenso de dicho nivel.

Por otro lado, no se puede dejar de lado que independientemente de los procesos geológicos y de largo plazo, las alteraciones de origen humano sobre las zonas costeras han resultado más efectivas en la destrucción de los equilibrios ecosistémicos que cualquier evento natural. Es por ello que a la par de la preocupación y preparación para los eventos del orden de décadas, se debe caminar hacia la explotación responsable de los recursos costeros que están siendo dañados irreversiblemente en temporalidades mucho más cortas.

## LITERATURA CITADA

- Aguayo, J., R. Bello, M. Vecchio, J. Araujo, y M. Basañez, 1980. Estudio sedimentológico en el área de Tulum-Cancún-Isla mujeres, Estado de Quintana Roo, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 41(1-2):15-32.
- Bird, E., 1993. Submerging coasts: the effects of a rising sea level on coastal environments. John Wiley & Sons, UK.
- Britannica Inc., 1995. Coast, Enciclopedia Britannica, volume 3. Encyclopaedia Britannica.
- Butterlin, J., 1958. Reconocimiento geológico preliminar del territorio del estado de Quintana Roo. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 10(9-10):531-570.
- Butterlin, J., y F. Bonet, 1963. Mapas geológicos de la península de Yucatán. *Ingeniería Hidráulica en México*, 1(18):65-71.
- Cifuentes, J., P. Torres-García, y M. Frías, 2002. El océano y sus recursos. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química, volumen 12 de La ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica, México.

- CNA, 1991. Actualización geohidrológica del acuífero de la zona norte del estado de Quintana Roo. Informe final realizado por Infraestructura Hidráulica y Servicios S.A. de C.V.
- Dansgaard, W., W. Dansgaard, y H. Tauber, 1969. Glacier Oxygen-18 content and Pleistocene ocean temperatures. *Science*, 166: 499-502.
- Delgado, A., 2007. Análisis de la dinámica geomorfológica de la zona hotelera de Cancún como contribución al desarrollo de un plan de manejo costeros. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche.
- Drake, F., 2000. Global warming. The science of climate change. Hodder Arnold Publication. London 288 p.
- Durham, J., 1985. Movement of the Caribbean plate and its importance for biogeography in the Caribbean. *Geology*, 13: 123-125.
- Gallegos, A., 2006. Clima oceánico: los mares mexicanos ante el cambio clima global. p. 41-52. En J. Martínez, y A. Fernández (eds.), Cambio climático: una visión desde México. Semarnat, México.
- Gibbard, P., S. Boreham, K. Cohen, y A. Moscarillo, 2007. Global chronostratigraphical correlation tale for the last 2.7 million years v. 2007b. Subcommission on Quaternary Stratigraphy, Department of Geography, Universidad de Cambridge, Inglaterra.
- Goodrich, J., 1996. Comments on regional simulations of greenhouse warming including natural variability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 33:3-4.
- INEGI, 2007. Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. INEGI, México.
- INEGI, 2008. Sistema de cuentas Nacionales de México. Producto Interno Bruto por entidad federativa 2001-2006. INEGI, México.
- IPCC, 2001. Cambio climático 2001. La base científica. Reporte Técnico, UNEP-WMO.
- López, E., 1973. Estudio geológico de la península de Yucatán. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 25(1-3):23-73.
- Lugo-Hubp, J., J. Aceves-Quezada, y R. Espinasa-Pereña, 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología*, 10(2): 143-150.
- Meehl, G.A., W.M. Washington, W.D. Collins, J.M. Arblaster, A. Hu, L.E. Buja, W.G. Strand, y H. Teng, 2005. How much more global warming and sea level rise? *Science*, 307(5716): 1769-1772.
- Neff, U., S. Burns, A. Mangini, M. Mudelsee, D. Fleitmann, y A. Matter, 2001. Strong coherence between solar variability and the moonson in Oman between 9 and 6 kyr ago. *Nature*, 411: 293- 293.
- Nolasco, M., 1986. Sedimentología litoral de los estados de Yucatán y Quintana Roo. Tesis de licenciatura.
- Pedrozo, D., 2008. Respuesta hidrodinámica del sistema lagunar Nichupté, Cancún, México. UNAM, México. Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Quezada, S., 2001. Breve historia de Yucatán. Fideicomiso de historia de las Américas, Serie: Breves historias de los estados de la República Mexicana. EFE, El Colegio de México. México.
- Robinson, A., N. Robinson, y W. Soon, 2007. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 12: 79 – 90.
- Ruiz, G., 2004. Modelos para determinar la geomorfología de la línea de playa en costas en equilibrio. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Ruiz de Elvira, A., 2001. Quemando el futuro. Clima y cambio climático. Nivola Libros y Ediciones, S.L. Madrid, España. 128 p.

- Schönwiese, C., 1995. Klimaänderungen. Data, analysen, prognosen. Ed. Springer-Verlog. Berlin. 224 p.
- Singer, F. (ed.), 2008. Nature, Not Human Activity, Rules the Climate. Summary for Policymakers of the Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change, Chicago, IL: The Heartland Institute. 50 p.
- Sykes, L., W. McCann, y A. Kafka, 1982. Motion of the Caribbean plate during last 7 million years and implications for earlier Cenozoic Movements. *Journal of Geophysical Research*, 87(B13): 10656 – 10676.
- Szabo, B., W. Ward, A. Wiedie, y M. Brady, 1978. Age and magnitude of the late Pleistocene sea-level rise on the eastern Yucatán Peninsula. *Geology*, 6(12):713–715.
- Thornbury, W., 1969. Principles of Geomorphology. John Wiley & Sons, US.
- United States Geological Survey, 2005. Geologic Map of North America.
- Uriarte, A., 2003. Historia del Clima en la Tierra. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 p.
- Ward, W.C., y J. Wilson, 1974. General aspects of the northeastern coast of the Yucatán Peninsula. p. 96-105. *In: Geological Society of America. Field Trip 2, Annual Meeting of the Geol. Soc. of America, US.*
- Ward, W.C., y M. Brady, 1979. Strandline sedimentation of carbonate grainstones, Upper Pleistocene, Yucatán Peninsula. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 63:362–369.
- Ward, W., 1985. Quaternary geology of northeastern Yucatán Peninsula. p. 62-72. *In: W. Ward, A. Weidie, and W. Back, (eds.). Geology and hydrogeology of the Yucatan and quaternary geology of northeastern Yucatán Peninsula. New Orleans Geological Society, USA.*
- West, R., 1962. Physical geography of the Yucatan platform. p. 58-62. *In: Peninsula of Yucatan, Field trip guidebook. New Orleans Geological Society, US.*
- Woodroffe, C., 2003. Coasts: form, process and evolution. Cambridge University Press, UK.

Escofet, A., R. Contreras y A. Monti, 2010. Análisis de vulnerabilidad orientado a la gestión litoral a partir del uso de hábitat , p. 159-180. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Análisis de vulnerabilidad orientado a la gestión litoral a partir del uso de hábitat

*Anamaria Escofet, Rosa Contreras y Alejandro Monti*

---

## RESUMEN

Para contribuir a la identificación de la vulnerabilidad de los objetos naturales y sociales del espacio litoral se indagó la predicción de que los especialistas de hábitat serían más vulnerables que los generalistas, frente a un disturbio como la elevación del nivel medio del mar. La hipótesis fue que la vulnerabilidad diagnosticada en términos ecológicos puede ser traducida a los términos operativos que plantea la gestión del riesgo, e incorporarse al proceso de gestión del espacio litoral. Estudios sobre uso de hábitat por parte de 22 especies de aves playeras a lo largo de 400 km de costa entre Tijuana y El Rosario (Baja California, México) muestran que una elevación de hasta 110 cm en el nivel medio del mar implicaría la pérdida del 30% de las playas, y una progradación del 70% restante, con una afectación de la abundancia entre 28 y 30% en las tres especies obligadas de playas marinas, entre 15 y el 23% en las seis especies facultativas de playas marinas y entre 0 y 11% en 13 especies facultativas. Se identificó una *vulnerabilidad natural o intrínseca* en las playas marinas, una *vulnerabilidad ecológica* en los playeros, y una potencial *vulnerabilidad institucional* en el proceso de gestión, por factores que impidieran una planeación de largo plazo para mantener intacto el 70 % de las playas con bajo riesgo de pérdida por inundación frente al evento de elevación marina, y así conservar el hábitat y la integridad del elenco de playeros migratorios.

## INTRODUCCIÓN

El modo en que los sistemas naturales y sociales podrían responder frente a eventos climáticos mayores, tal como la elevación del nivel medio del mar, ha sido tema central en las últimas décadas, movilizándolo conocimiento disciplinario, y esfuerzos interdisciplinarios para la revisión crítica de las tendencias de uso de los espacios litorales. Así, existen exploraciones geomorfológicas para estimación de impacto y riesgos (Turner *et al.*, 1996; Titus y Richman, 2001; Cooper *et al.*, 2005) o proyecciones de cómo la disminución del periodo de exposición del intermareal podría afectar las abundancias actuales de elementos bióticos conspicuos y característicos, como las aves playeras, al incidir sobre su base de alimentación y descanso (Galbraith *et al.*, 2005 ; Le V. dit Durell *et al.*, 2006).

Visualizando la elevación del medio del mar como un agente amenazante, y a los espacios costeros como el receptor del mismo, la identificación de la vulnerabilidad de los objetos naturales y sociales del espacio litoral deviene en un tema central (Doornkamp, 1998). En ese contexto, se reconoce que la concepción de vulnerabilidad y riesgo, y la terminología asociada, han evolucionado según la disciplina que la haya abordado, y que urge trabajar para una consistencia que apoye la efectividad en la gestión bajo una visión holística e integral (Cardona, 2001).

En esa línea, presentamos resultados selectos sobre uso de hábitat por parte de 22 especies de aves playeras en los 400 km de costa comprendidos entre Tijuana y El Rosario (Baja California, México). El trabajo original de Contreras-Motolinía (1999) utilizó un modelo propuesto por Kolasa (1989) que vincula la naturaleza del hábitat, el grado de especialización, y la relación entre abundancia y modo en que se usa el hábitat. Estableciendo que la abundancia de una especie es función del número de hábitats que ocupa y del número total de hábitats posibles, el modelo permite explorar predicciones sobre abundancia relativa de especialistas y generalistas, grupos de especies según rango ecológico y abundancia, y vulnerabilidad diferencial de especialistas y generalistas frente a un disturbio que afectara a los hábitats.

Sobre esa base, nos propusimos indagar si los resultados específicos sobre vulnerabilidad diferencial de especialistas y generalistas frente a una elevación del nivel medio del mar podrían asimilarse a las expresiones generales de riesgo, bajo la hipótesis de que la vulnerabilidad diagnosticada en términos ecológicos puede ser traducida a los términos más operativos que plantea la gestión del riesgo, y de ese modo incorporarse al proceso de gestión del espacio litoral en la zona de estudio.

## ESTADO DEL ARTE

### MARCO CONCEPTUAL

A los fines de este trabajo, es relevante plantear los conceptos de hábitat y uso del hábitat, y el empleo del término vulnerabilidad en los ámbitos de la ecología y estudios de riesgo.

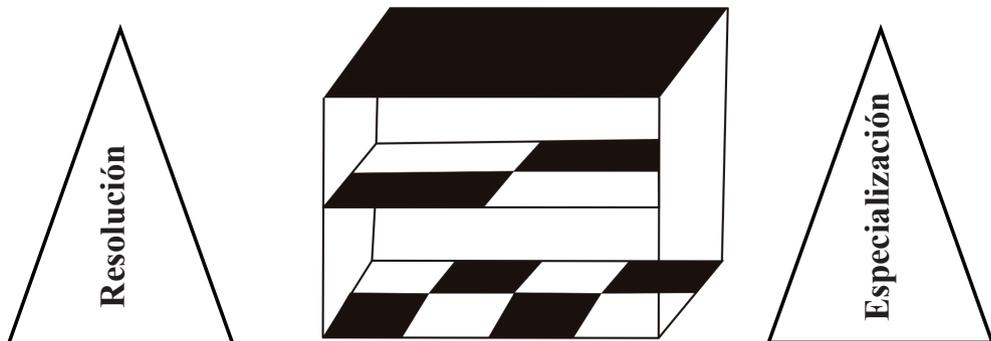
## Hábitat y uso del hábitat

Un tema central de la ecología es la relación entre los recursos del ambiente, la respuesta de las especies a dichos recursos, y el modo en que esto se traduce en los patrones de abundancia (Pianka, 1978; Odum, 1986; Ricklefs, 1990; Krebs, 1994).

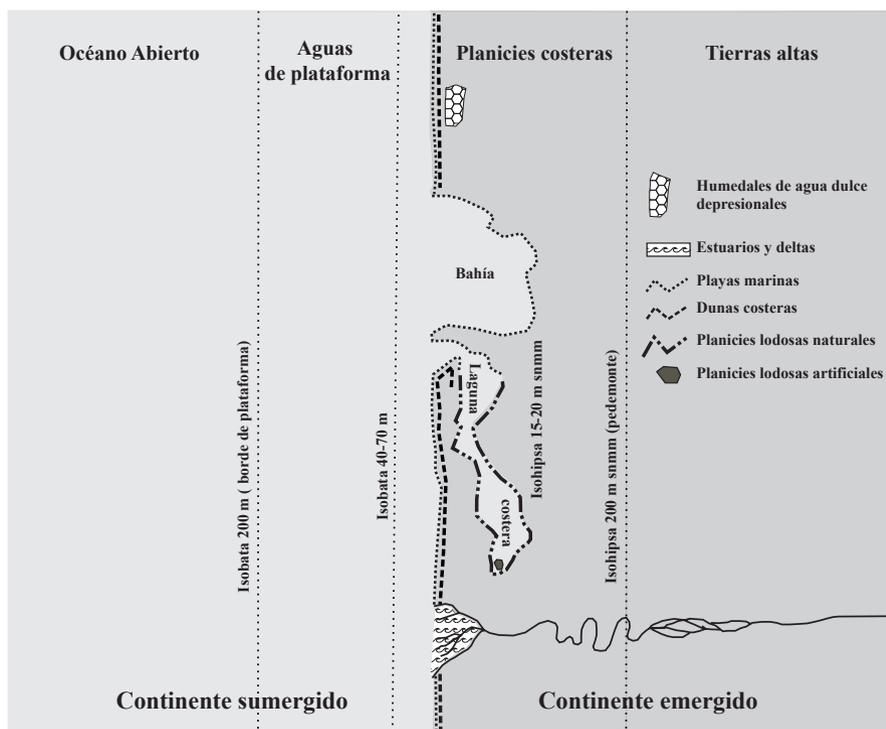
La definición de unidades espaciales que reflejen unidades ecológicamente relevantes es esencial para proveer divisiones naturales del paisaje que sirvan de referencia a la investigación y planeación de uso de suelo (Ray y Hayden, 1992). En ese sentido, para diseño de reservas, identificación de ecosistemas frágiles, y programas de monitoreo, se impone indagar la relación entre unidades ecológicamente relevantes y unidades cartográficas, ya que la descripción de patrones de distribución de abundancia depende del diseño de los muestreos, y de la escala cartográfica a la que se hayan separado los hábitats (Hays *et al.*, 1981; Dethier, 1992; Bricker y Ruggiero, 1998).

Conceptualmente, son los principios de heterogeneidad ambiental los que guían este tipo de aproximación, con sus refinamientos en cuanto a estructura jerárquica del ambiente (Kolasa, 1989; Kolasa y Pickett, 1991; Keddy, 1991). De este modo, es posible visualizar la estructura del hábitat como una jerarquía de subdivisiones donde los fragmentos aparecen cada vez más pequeños como una función del incremento en la resolución con que la especie percibe el ambiente. Así, serían los especialistas, que perciben el espacio como heterogéneo, los que utilizan las pequeñas subdivisiones, mientras que los generalistas perciben el espacio en modo más homogéneo y emplean los fragmentos más grandes. Sobre esta base, es posible predecir que las especies especialistas serían más vulnerables a la desaparición de algún hábitat (figura 1).

Las aves playeras constituyen un conjunto adecuado para estudios de uso de hábitat a escala paisajística, ya que presentan afinidad con una variedad de sustratos inundables con distribución espacial heterogénea, que se concentran en una franja litoral relativamente angosta, y que en un perfil mar-tierra se presentan secuencialmente (figura 2).



**Figura 1.** Representación esquemática del ambiente, donde la homogeneidad o heterogeneidad dependen de la resolución a la cual las especies perciben sus hábitats. Tomado de Contreras-Motolinía (1999).



**Figura 2.** Esquema idealizado de la distribución en la franja litoral de los principales sustratos inundables utilizados por aves playeras. A partir de Escofet (2004) y Hernández-Leonel (2005).

Los playeros migratorios, que visitan ecosistemas de diferentes, son un grupo particularmente estudiado, ya que su estatus poblacional y como grupo, pueden revelar mucho acerca del estado de los ecosistemas visitados, y por lo mismo, promueven muchas acciones internacionales de conservación. En la zona de estudio, que forma parte del Corredor Migratorio del Pacífico, se ha comprobado la asincronía y segregación espacial de las especies de playas marinas y de planicies lodosas (Palacios *et al.*, 1991) y sobre esa base se ha propuesto el mantenimiento del mosaico de hábitat, y de pequeños apostaderos a lo largo del corredor (López-Urriarte *et al.*, 1997) como base esencial para conservar la integridad del elenco migratorio (Escofet, 1994).

## Vulnerabilidad

La acepción del sustantivo *vulnerabilidad* es “calidad de vulnerable”. La acepción del adjetivo *vulnerable* es “que puede ser herido o dañado”. La clave para tratar con el término *vulnerabilidad* reside en entender que descansa sobre la definición de *vulnerable*, y que tal definición conlleva la noción de dos elementos: uno “que puede ser herido o dañado” y uno capaz de causar herida o daño. La vulnerabilidad es entonces una condición que sólo se visualiza en presencia del otro elemento; no se puede hablar de “vulnerabilidad” por sí sola, sino de “vulnerabilidad

frente a algo”. De la claridad con que este concepto sea tratado por las diferentes disciplinas que utilizan el término vulnerabilidad, depende la claridad con que puedan analizarse casos concretos en los que el resultado de la interacción adquiera dimensiones sociales preocupantes, que se desean disminuir (Cardona, 2001).

### *Ecología del disturbio*

En esta rama de la ecología, el vocablo vulnerabilidad aparece asociado a la díada *agente efector-agente receptor*, base fáctica insoslayable que subyace a cualquier cambio notorio en objetos de la naturaleza, pudiendo a dicho cambio llamársele *disturbio* o, preferentemente, *perturbación*. Al *agente efector*, o *agente de disturbio*, se le asocian rasgos tales como la intensidad y la frecuencia, mientras que al *agente receptor* se le asocia la vulnerabilidad. La magnitud de la interacción entre ambos, o *perturbación*, que generalmente se mide en pérdida de biomasa del agente receptor, dependerá de qué tan intenso y/o frecuente haya sido el agente efector, y de qué tan vulnerable haya sido el agente receptor, a esa exacta condición del agente efector (Dethier, 1984; Rykiel, 1985; Pineda y Escofet, 1989; Escofet, 1989; López-Uriarte, 1997).

En *ecología*, los agentes de disturbio y los eventos de perturbación están incorporados en la dinámica modeladora de la diversidad, reconociéndose que en condiciones naturales opera un sabio balance entre intensidad y frecuencia de los agentes de disturbio: alta intensidad y baja frecuencia, o baja intensidad y alta frecuencia (Connell, 1978; Souza, 1984). Lo anterior está íntimamente ligado con la noción de *estabilidad* (y variedad de significados asociados) que se ocupa de analizar los modos en que un determinado escenario natural se recupera luego de una perturbación (Holling, 1973; Orians, 1975; Westman, 1978). Progresivamente, se fue haciendo importante incorporar las acciones humanas como agente de disturbio, reconociéndose que además de violar el balance intensidad-frecuencia, y por lo mismo desafiar los umbrales de recuperación en que han sido evolutivamente moldeadas las respuestas de los sistemas naturales, introducen agentes cualitativamente desconocidos por la naturaleza (Jacobs, 1975).

### *Teoría del riesgo*

En esta disciplina, la vulnerabilidad aparece asociada a la *ecuación general del riesgo*

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza, o Peligro} \times \text{Vulnerabilidad}$$

El riesgo, o probabilidad de que ocurra una determinada pérdida, o daño, es función de dos factores: la probabilidad de que se manifieste una *amenaza*, o *peligro*, y la *vulnerabilidad* de los *objetos expuestos* a tal amenaza o peligro, pudiendo distinguirse en este segundo término (1) el grado de exposición de los elementos a una determinada amenaza y (2) el factor interno de selectividad, o predisposición intrínseca, que determina el grado de afectación (Cardona, 1993a y b).

La creciente necesidad social de intervenir en la disminución del riesgo (Lavell y Argüello, 2003) ha extendido el uso del término vulnerabilidad para abarcar (a) objetos expuestos tangibles (es decir, con expresión espacial concreta sobre el terreno) y (b) aspectos sociales, sin

expresión espacial concreta, pero vinculados a conductas públicas o privadas que contribuyen a la construcción social de la vulnerabilidad. Así, se habla de una vulnerabilidad física, ecológica y/o natural, cuando se refiere a objetos expuestos tangibles, con expresión espacial concreta sobre el terreno, y de vulnerabilidad económica, social, política, técnica, ideológica, cultural, educativa, institucional, cuando se refiere a políticas públicas, actitudes y otras componentes sociales que inciden en el proceso de gestión (Wilches-Chaux, 1993; Cardona, 2001).

### *Alcances y equivalencias entre aproximaciones*

La equivalencia entre Ecología del Disturbio y Teoría del Riesgo es directa en lo que se refiere a objetos expuestos tangibles, sean estos del medio natural o antrópico. La expresión “*objetos expuestos tangibles*”, propia del riesgo, es particularmente idónea para el planteamiento de los casos, porque permite circunscribir el concepto de vulnerabilidad a los límites físicos, tangibles, de los objetos de interés directo, y visualizar la vulnerabilidad no tanto como una condición universal de tales objetos, sino como una singularidad de la relación respecto a un determinado agente efector (peligro, o amenaza) que debe claramente identificarse.

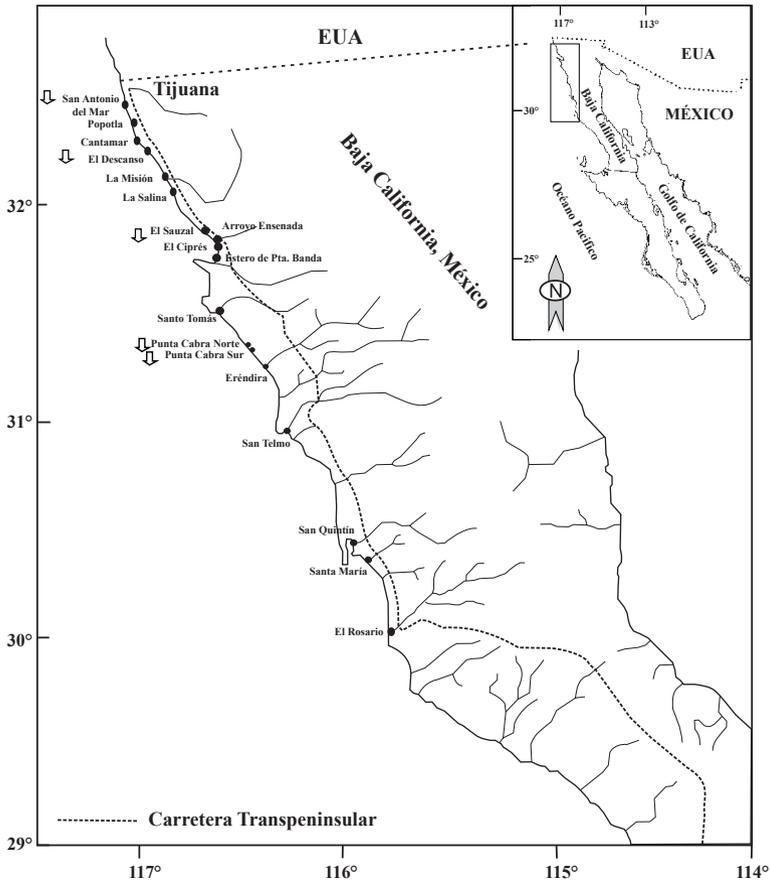
En ese contexto, a los fines de un diagnóstico del territorio, la aproximación del *disturbio* puede refinarse con aportaciones del riesgo en lo que hace a tipos de vulnerabilidad. En general, la natural, la física, y/o la ecológica aplican a objetos expuestos tangibles pero, más específicamente, la natural y la ecológica aplica a objetos del medio natural, y la física a objetos del medio antrópico (Cardona, 1993a y b; Wilches-Chaux, 1993). Otra aportación desde el riesgo es que la forma de ecuación en que se presentan sus términos, que no necesariamente obliga a resolverla numéricamente, contribuye mucho al planteamiento de los casos, porque fuerza a especificar los dos términos de la diada *efector-receptor*, y automáticamente ayuda a visualizar cuál de los términos admitiría su intervención para reducir la condición de riesgo actual y/o evitar la consolidación de una situación de riesgo futuro (gestión del riesgo).

Es justamente en los planteos de la gestión del riesgo cuando entran en juego los demás tipos de vulnerabilidad, los que se aplican al contexto social, y que permiten visualizar los factores económicos, sociales, políticos, técnicos, ideológicos, culturales, educativos y/o institucionales, que favorecen o desfavorecen determinadas alternativas de gestión.

## EL CASO DE ESTUDIO

### Los datos y el modelo

Los datos básicos provinieron de 218 censos de aves playeras en 18 sitios y ocho tipos de hábitat a lo largo de 400 km de costa comprendidos entre Tijuana (San Antonio del Mar, 32 26 N, 117 06 W) y El Rosario (30 02 N, 115 47 W) y a lo ancho de una franja que incluyó los aproximadamente 50 m de ancho del intermareal, y 3 km tierra adentro, totalizando unos 1 220 km<sup>2</sup> (figura 3).



**Figura 3.** Área de estudio, indicando los sitios en los que se relevó el hábitat playas marinas. Las flechas señalan las playas en las que ocurriría un evento de pérdida frente a un aumento del nivel medio del mar.

Las unidades ecológicamente relevantes se identificaron en (a) cartas topográficas, 1:250 000 y 1: 50 000 (INEGI, 1981a); (b) Carta de uso de suelo y vegetación, 1: 250 000 (INEGI, 1981b); (c) fotografía aérea del puerto de Ensenada, B.C., 1: 9 500 (Ceseña, 1990); (d) carta urbana de usos y destinos del suelo propuestos, 1:35 000 (Ceseña, 1990).

Los conteos, ya corregidos para normalizar por número de censos, y eliminando dos especies ocasionales que tuvieron solamente uno o dos individuos en el total, arrojaron un elenco de 22 especies de playeros y 2 183 individuos (tabla 1).

Estos datos se emplearon para explorar el Modelo de Estructura Jerárquica del Ambiente (Kolasa, 1989) cuya ecuación general es

$$N = f(Rx^2 / Ry)$$

**Tabla 1.** Los datos de hábitat y de especies de aves playeras, utilizados en los cálculos. (gris claro = especies obligada de playas marinas; blanco = especies facultativas de playas marinas; gris oscuro = especies facultativas).

Especie	Playas marinas (17 sitios)	%	Estuarios y deltas (9 sitios)	%	Dunas (1 sitio)	%	Planicies lodosas naturales (3 sitios)	%	Planicies lodosas artificiales (1 sitio)	%	Lagunas de agua dulce (2 sitios)	%	Campos de cultivo (3 sitios)	%	Embalses y Presas (1 sitio)	%	Total
<i>Calidris mauri/omiuatilla</i>	49	12	137	35	0	0	140	36	54	14	6	1	0	0	8	2	394
<i>Catroporphorus semipalmatus</i>	212	60	23	7	0	0	116	33	0	0	0	0	3	0	0	0	355
<i>Limosa fedoa</i>	126	37	31	9	13	4	141	41	0	0	1	0	29	0	0	0	341
<i>Calidris alba</i>	313	98	4	1	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	320
<i>Limnodromus spp.</i>	56	25	22	10	0	0	125	56	0	0	9	4	0	9	4	4	222
<i>Pluvialis squatarola</i>	80	56	14	10	2	2	46	32	0	0	0	0	0	0	0	0	143
<i>Calidris alpina</i>	1	2	31	43	0	0	26	37	12	17	0	0	0	0	0	0	70
<i>Charadrius vociferus</i>	4	6	54	84	0	0	1	2	0	0	4	6	1	0	0	1	64
<i>Namenius phaeopus</i>	26	50	1	3	2	5	17	33	0	0	2	3	3	0	0	0	51
<i>Charadrius alexandrinus</i>	26	65	1	2	0	0	12	31	1	2	0	0	0	0	0	0	40
<i>Himantopus mexicanus</i>	0	0	14	36	0	0	6	15	0	0	17	45	1	0	0	1	38
<i>Arenaria interpres</i>	21	69	0	0	0	0	9	30	0	1	0	0	0	0	0	0	30
<i>Arenaria melanoccephala</i>	23	94	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
<i>Charadrius semipalmatus</i>	8	32	14	58	0	0	0	0	2	8	0	1	0	0	0	0	24
<i>Recurvirostra americana</i>	0	0	2	11	0	0	1	10	9	63	2	15	0	0	0	0	15
<i>Namenius americanus</i>	0.2	2	1	5	1	10	5	38	0	0	0	0	6	0	0	0	13
<i>Actitis macularia</i>	2	16	9	83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	11
<i>Tringa melanoleuca</i>	0	0	3	32	0	0	5	49	2	19	0	0	0	0	0	0	10
<i>Calidris canutus</i>	6	70	2	26	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	9
<i>Charadrius wilsonia</i>	0	6	0	0	0	0	0	2	3	92	0	0	0	0	0	0	3
<i>Apibriza virgata</i>	3	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
<i>Tringa flavipes</i>	0	0	0	0	0	0	2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Número de especies	20	18	18	5	5	20	13	84	42	42	10	5	6	5	5	22	
Número de individuos	955	364	19	658	18	364	84	42	18	42	18	5	6	18	5	22	2 183

Donde  $N$  es la abundancia de la especie  $x$ ,  $R_x$  es el rango ecológico de la especie (número de hábitat ocupados) y  $R_y$  es el rango total (número disponible de hábitat). La función cuadrática incorpora una corrección para considerar el modo en que la especie usa el ambiente, comparando cada caso contra un blanco ideal en que el ambiente fuera percibido en modo uniforme (generalistas absolutos; todos los hábitats usados en la misma medida).

El modelo vincula la naturaleza del hábitat, el grado de especialización de las especies, y la relación entre la abundancia de las especies y el modo en que éstas usan el recurso hábitat. En términos generales, establece que la abundancia de una especie es función del número de hábitat que ocupa, y del número total de hábitats posibles; permite explorar predicciones sobre la abundancia relativa de especialistas y generalistas, sobre grupos de especies según su rango ecológico y abundancia, y sobre vulnerabilidad diferencial de especialistas y generalistas. Específicamente, sugiere seis predicciones:

- 1) El número de especies especialistas debe ser mayor que el de las generalistas;
- 2) Los especialistas, en promedio, deben ser menos abundantes que los generalistas;
- 3) La densidad de los especialistas debe ser menor que la de los generalistas;
- 4) El rango ecológico y la abundancia deben estar positivamente correlacionados;
- 5) Debe haber grupos de especies según la similitud de su rango ecológico y abundancia;
- 6) Los especialistas serían más vulnerables a un disturbio que pudiera causar la desaparición de hábitat.

Los resultados completos pueden consultarse en Contreras-Motolinía (1999). En este capítulo se presentan únicamente los resultados de la exploración de la predicción # 6.

### **La vulnerabilidad de los playeros frente a elevación del nmm**

La exploración de la predicción # 6, en la cual están involucrados la vulnerabilidad y el disturbio, requirió la selección de (1) escenarios de disturbio y (2) criterios para medir vulnerabilidad frente a la desaparición de hábitat. Uno de los escenarios de disturbio escogidos fue la elevación del nivel medio del mar, en la cual la desaparición de hábitat ocurriría en una secuencia fija que empezaría desde el mar. El otro escenario, que sólo será mencionado comparativamente aquí, fue la desaparición de hábitat por cambios de uso de suelo, en el cual la desaparición de hábitats sería al azar.

Como criterio para medir la vulnerabilidad de los playeros frente a la desaparición de hábitat, se procedió conforme a categorías de especialidad que distinguen tres grupos de especies según su abundancia en diferentes hábitat (Croonquist y Brooks, 1991): *obligadas de un determinado hábitat* (90 al 100% de su abundancia en ese hábitat); *facultativas de un determinado hábitat* (ocupan otros hábitat, pero reúnen 50 al 89% de su abundancia en uno determinado); *facultativas* (ocupan otros hábitat, con menos del 50% de su abundancia en uno determinado). Así, se encontró que de las 22 especies registradas, tres son *obligadas de playas marinas*, con 94, 98 y 100% de su abundancia en ese hábitat, seis especies son *facultativas de playas marinas*, por ocupar otros hábitat pero reunir entre 53 y 78% de su abundancia en playas marinas, y las

restantes 13 son especies *facultativas*, por presentar mayores abundancias en otros hábitat y solamente 0 a 40% en playas marinas (tabla 1).

Previamente a la exploración de la vulnerabilidad de los playeros, se procedió según estándares establecidos (Daniels *et al.*, 1993) y se calculó el porcentaje de playas que desaparecerían en la zona de estudio si ocurriera una elevación del nivel medio del mar entre 16 y 110 cm. Para esto, en la franja comprendida entre los cero y los tres m de elevación snmm, se relevaron las playas y el cambio fisiográfico adyacente. Se estableció que ocurriría una inundación permanente, o pérdida del hábitat, en playas que tuvieran una combinación de cantiles mayores a 3 m, y distancia de 3 a 24 m al cambio fisiográfico más próximo, y que un desenlace de progradación ocurriría en las que tuvieran cantiles de 3 m o menos, y presentaran desembocaduras de arroyos o dunas adyacentes a la playa. Así 30% de las playas marinas de la región estudiada experimentarían inundación permanente, y 70% experimentaría progradación (tabla 2).

Sobre esa base se calculó el porcentaje de la abundancia total de playeros que sería afectado a nivel regional en caso de ocurrir una elevación del nivel medio del mar como la supuesta. Para

**Tabla 2.** Identificación de eventos de pérdida (↓) o progradación (⇒) de playas frente a un aumento del nivel medio del mar.

Localidad	Características de la costa Consideras	Distancia al cambio fisiográfico más próximo (m)	Evento posible
San Antonio del Mar	Playa con cantil (30 m)	24	↓
Popotla	Playa con cantil (14 m)	3	↓
Cantamar	Playa con boca de arroyo	-	⇒
El Descaso	Playa con cantil (2.7 m) coronado con dunas; boca de arroyo	77	⇒
La Misión	Playa con boca de arroyo	-	⇒
La Salina	Playa con dunas	62	⇒
El Sauzal	Playa con cantil (6 m)	17	↓
Arroyo Ensenada	Boca de arroyo	-	⇒
El Ciprés	Playa con dunas	0	⇒
Estero de Punta Banda	Playa con dunas	123	⇒
Santo Tomás	Playa con boca de arroyo y dunas	108	⇒
Punta Cabra Norte	Playa con cantil (5-10 m)	16	↓
Punta Cabra Sur	Playa con cantil (13 m)	15	↓
Eréndira	Playa con boca de arroyo	-	⇒
San Telmo	Playa con boca de arroyo	-	⇒
San Quintín	Planicie lodosa con cantil (3 m)	7	⇒
Santa María	Playa con boca de arroyo y dunas	42	⇒
El Rosario	Playa con boca de arroyo y dunas	139	⇒

esto, la abundancia proporcional de cada especie en el hábitat playas marinas se multiplicó por 0.3, que es la probabilidad de que en la región ocurra una pérdida o inundación permanente de ese hábitat si se diera una elevación como la supuesta. Se estimó que resultaría afectada entre 28 y 30% de la abundancia total de las tres especies *obligadas de playas marinas*, entre el 15 y el 23% de la abundancia de las seis especies *facultativas de playas marinas*, y entre 0 y 11% de la abundancia de las 13 especies *facultativas* (tabla 3).

**Tabla 3.** Abundancia de las especies de aves playeras, ordenadas según su grado de especialidad respecto al hábitat playas marinas.

Especie	Abundancia presente en playas marinas, respecto al total de la especie (%)	Afectación de la abundancia (%) en un escenario de inundación permanente del 30% de las playas	Especialidad
<i>Aphriza virgata</i>	100	30	Obligadas de playas marinas
<i>Calidris alba</i>	98	29	
<i>Arenaria melanocephala</i>	94	28	
<i>Calidris canutus</i>	70	21	Facultativas de playas marinas
<i>Arenaria interpres</i>	69	21	
<i>Charadrius alexandrinus</i>	65	19	
<i>Catoptrophorus semipalmatus</i>	60	18	
<i>Pluvialis squatarola</i>	56	17	
<i>Numenius phaeopus</i>	50	15	
<i>Limosa fedoa</i>	37	11	Facultativas
<i>Charadrius semipalmatus</i>	32	10	
<i>Limnodromus spp.</i>	25	8	
<i>Actitis macularia</i>	16	5	
<i>Calidris mauri/minutilla</i>	12	4	
<i>Charadrius vociferus</i>	6	2	
<i>Charadrius wilsonia</i>	6	2	
<i>Calidris alpina</i>	2	1	
<i>Numenius americanus</i>	2	0	
<i>Himantopus mexicanus</i>	0	0	
<i>Recurvirostra americana</i>	0	0	
<i>Tringa melanoleuca</i>	0	0	
<i>Tringa flavipes</i>	0	0	

## LECTURA DE LA VULNERABILIDAD

### Disturbio

La lectura de la vulnerabilidad surge de los resultados que confirman la predicción # 6 del modelo, en el sentido de que es la condición de especialización la que define la vulnerabilidad frente a la manifestación de un agente de disturbio. De ese modo, frente a una elevación del nivel medio del mar entre 16 y 110 cm se identifica un gradiente de afectación de la abundancia (28-30%; 15-21%; 0-11%) a lo largo del gradiente de especialidad (especies obligadas de playas marinas - facultativas de playas marinas - facultativas).

Al mismo tiempo, contrastando estos resultados con los de la proyección de otro escenario de disturbio (cambios de uso de suelo, en el cual la desaparición de hábitats sería al azar) se confirma el planteamiento general de que la vulnerabilidad no es una condición universal sino una singularidad respecto a un determinado agente efector. Tomando como ejemplo la desaparición de planicies lodosas, la abundancia de las especies de playas marinas resultaría afectada solamente entre 0 y 1 % en el caso de las *obligadas de playas marinas*, y entre 4 y 33 % en el caso de las especies *facultativas de playas marinas* (Contreras-Motolinía, 1999).

### Riesgo

En términos de Riesgo se identifican dos objetos expuestos a la amenaza de elevación del nivel medio del mar: playas y aves playeras. Por otra parte, el caso permite visualizar uno de los aspectos más difíciles en el análisis de la vulnerabilidad de los objetos expuestos tangibles, que es la separación entre (1) el grado de exposición a un determinado agente, y (2) el factor que determina la severidad de los efectos de tal agente, o *factor interno de selectividad*.

El grado de exposición se visualiza únicamente en un perfil mar-tierra, que incluye la totalidad de los hábitats regionales para aves playeras, y donde la amenaza o peligro es la elevación del nivel medio del mar (ver figura 2). Así emerge claramente que el grado de exposición de las playas marinas es mayor, por estar físicamente más cercanas al efector, y que lo mismo ocurrirá con sus usuarios preferentes.

El factor interno de selectividad debe explorarse independientemente en los dos objetos expuestos: playas, y aves playeras. En ambos casos, el trabajo original contiene la información pertinente, aunque no expresada en los términos de enlace que exponemos a continuación.

### Playas

En el caso de las playas, el factor interno de selectividad frente a la elevación del nivel medio del mar es su conformación, que es exactamente lo que el trabajo original identifica en el paso previo a la exploración de la vulnerabilidad de los playeros. Cierta conformación (cantiles mayores de 3 m; distancia de 3 a 24 m al cambio fisiográfico más próximo) imprimiría condiciones de mayor vulnerabilidad y favorecería una inundación permanente, mientras que otra conformación (cantiles de 3 m o menos; presencia de desembocaduras de arroyos, o de dunas

adyacentes) corresponde a una condición menos vulnerable porque permitiría la progradación de la playa, y la recuperación del hábitat en ese segmento.

En términos de tipos de vulnerabilidad, en este caso podría hablarse de *vulnerabilidad natural o intrínseca*, que es la que corresponde identificar cuando al cambiar las condiciones externas, el objeto expuesto tangible puede verse limitado en su permanencia (Cardona, 1993a y b; Wilches-Chaux, 1993). En este caso, sería la geofoma playas marinas, particularmente aquellas con cierta conformación morfológica, el objeto de la naturaleza que podría ser limitado en su permanencia, o expresión espacial tal y como la conocemos, en caso de que las condiciones externas cambiaran (elevación del nivel medio del mar).

### *Aves playeras*

En el caso de las aves playeras, el factor interno de selectividad frente a la elevación del nivel medio del mar es el grado de especialización en el hábitat *playas marinas* (a mayor especialización en ese hábitat, mayor vulnerabilidad y viceversa). En este caso, pueden identificarse tres grados posibles: alta vulnerabilidad para las tres especies *obligadas de playas marinas*, mediana vulnerabilidad para las seis especies *facultativas de playas marinas*, y baja vulnerabilidad para las 13 especies *facultativas*.

En términos de tipos de vulnerabilidad, en este caso podría hablarse de *vulnerabilidad ecológica*, que es la que corresponde identificar cuando lo susceptible a ser dañado no es tanto la estructura física de los objetos, sino un proceso vital (Wilches-Chaux, 1993). En este caso, el proceso ecológico bajo amenaza sería el uso de hábitat.

## PLANTEAMIENTO DEL RIESGO

Pueden plantearse dos cálculos para el riesgo, uno para playas y otro para playeros. En el primer caso, el cálculo es directo, y descansa sobre los datos de vulnerabilidad de playas (tabla 2). Para playeros, el cálculo debe apoyarse en la vulnerabilidad de playas, detalle atinadamente previsto en el desarrollo de la investigación base (tabla 3). El siguiente paso es formular los términos de la ecuación general del riesgo en la forma específica que dé sentido a cada caso.

### Playas

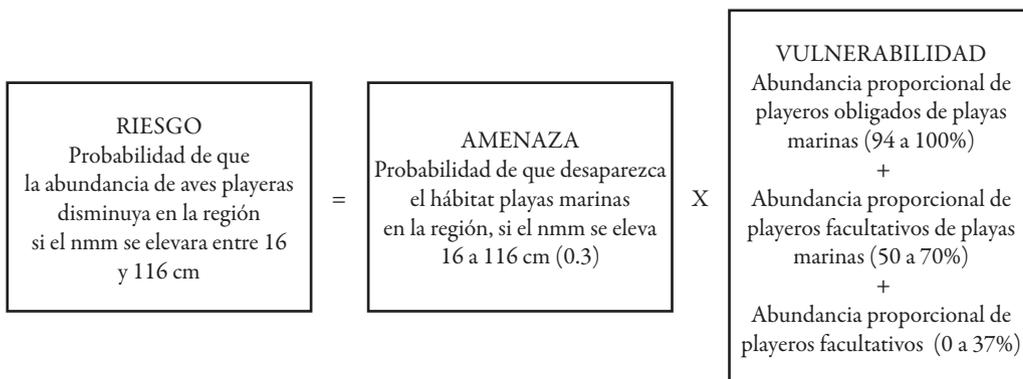
Para las playas, la formulación de cada término sería:

<p><b>RIESGO</b> Probabilidad de pérdida de playas marinas en el sector estudiado</p>	=	<p><b>AMENAZA</b> Probabilidad de una elevación del nmm entre 16 y 110 cm (en este caso, certeza, 1, que es el supuesto)</p>	X	<p><b>VULNERABILIDAD</b> Proporción de playas con cantiles de 3 m o más, y distancia de 3 a 24 m al cambio fisiográfico más próximo (en este caso, 30%, o 0.3)</p>
---	---	--	---	--

De este modo, el riesgo de una pérdida de playas marinas sería de 30% (0.3)

## Playeros

En este caso, dado que existen grados de vulnerabilidad asociados con grados de especialidad, los cálculos pueden desglosar ese nivel de refinamiento.



De este modo, tomando los puntos inferiores del recuadro de Vulnerabilidad, resultaría afectado el 43 % de la abundancia total de playeros ( $94 + 50 + 0 = 144$ ;  $144 \times 0.3 = 43.2$ ) y tomando los puntos superiores, resultaría afectado el 64% de la abundancia total de playeros ( $100 + 70 + 37 = 207$ ;  $207 \times 0.3 = 62.1$ ).

Estos resultados coinciden con los que se presentan en la tabla 3 (col 3), sumando los valores inferiores (28; 15; 0) y los valores superiores (30; 21; 11) ya que estos integran el paso de multiplicar por 0.3 la abundancia proporcional de cada especie.

Esto comprueba que los datos originales contenían un cálculo implícito del riesgo para cada categoría de especialidad, es decir, un cálculo de la probabilidad de que disminuya la abundancia de, respectivamente, especies *obligadas de playas marinas*, *facultativas de playas marinas*, y *facultativas*.

De este modo, el cálculo con base en los datos originales equivaldría al concepto de Riesgo Total (Cardona, 1993a y b) al resultar de la sumatoria de los riesgos parciales:

Riesgo Total (Probabilidad de que la abundancia de aves playeras disminuya en la región si el nmm se elevara entre 16 y 116 cm) = Probabilidad de que disminuya la abundancia de especies *obligadas de playas marinas* (28 a 30 %) + Probabilidad de que disminuya la abundancia de especies *facultativas de playas marinas* (15 a 21 %) + Probabilidad de que disminuya la abundancia de especies *facultativas* (0 a 11 %) = 43-64 %

## PLANTEAMIENTO DE LA GESTIÓN

El caso permite plantear la gestión del riesgo tanto en términos de conservación de la biodiversidad, específicamente de las aves playeras migratorias, como en términos de sus hábitats, con lo que eso conlleva en la planeación de uso de suelo.

La condición analizada es desafiante en términos dinámicos, porque el grueso de la información en ecología del disturbio proviene de organismos sesiles, que frente a un agente efector

responden directamente con la estructura de sus cuerpos (Souza, 1984) mientras que nuestros datos involucran organismos móviles, que pueden compensar conductualmente la reducción de hábitat ocasionada por el agente efector.

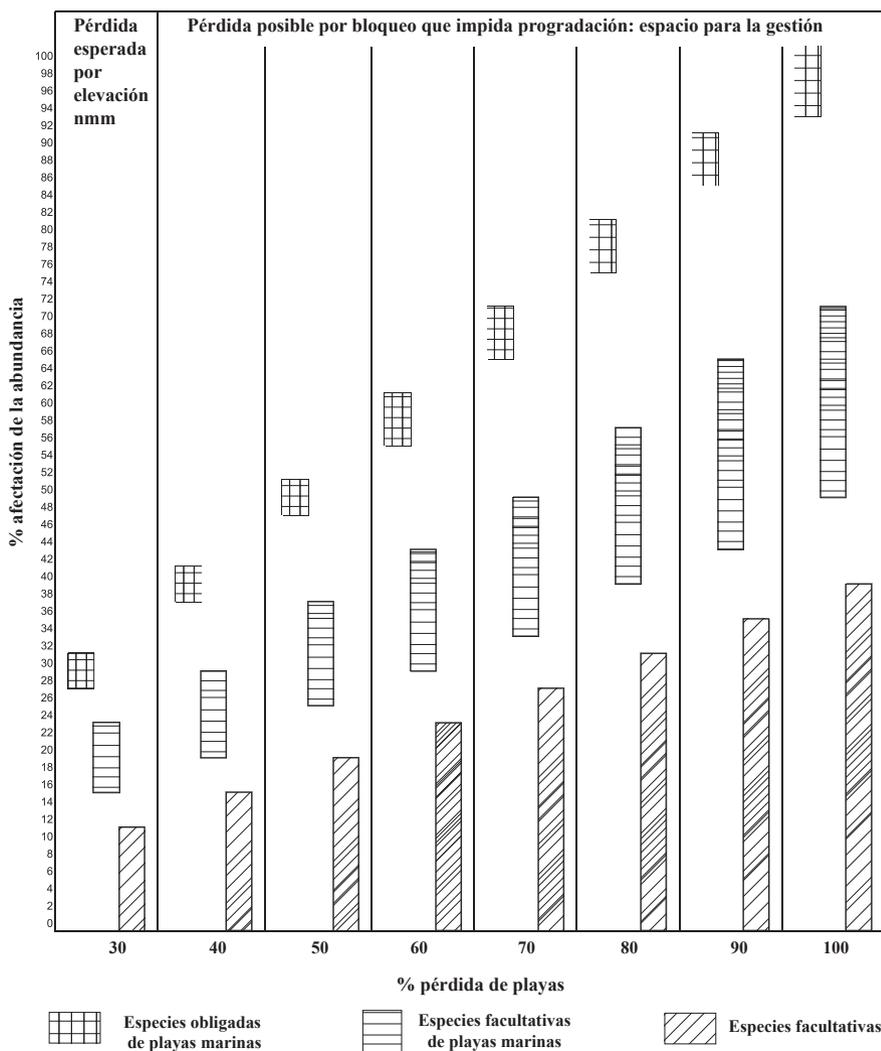
En ese sentido, la heterogeneidad regional presenta dos ángulos promisorios para la gestión litoral. Por un lado, la segregación altitudinal (perpendicular a la línea de costa) de los hábitats propios de playeros, permite visualizar a las playas marinas como el hábitat con mayor grado de exposición a la elevación del nivel medio del mar, en contraste con una serie de hábitat mucho menos expuestos. Por el otro, las diferentes conformaciones latitudinales (a lo largo de la costa) del hábitat más expuesto a una elevación del nivel medio del mar, es decir, las playas marinas, permiten visualizar grados de vulnerabilidad frente a tal elevación, donde un nada despreciable 70% de las playas tiene bajo riesgo de pérdida por inundación frente al evento de elevación marina.

Entonces, frente a la amenaza de una elevación del nivel medio del mar (que por ser un fenómeno climático, sería el término no manejable de la ecuación general del riesgo) la gestión litoral podría sin embargo incidir en la disminución del riesgo atendiendo al segmento más sensible o vulnerable a tal amenaza, es decir, sobre las especies *obligadas de playas marinas*. Para esto, y aprovechando que solamente 30 % de las playas marinas se perdería por la elevación esperada, la prioridad de la gestión sería el mantenimiento del resto de las playas, con menor vulnerabilidad, que podrían progradar, y así restablecerse el hábitat.

Sin embargo, la conservación de la totalidad del elenco de playeros pediría una programación cuidadosa de acciones en la franja continental más costera, desde la línea de costa hasta unos 3 km hacia el continente, a fin de retener el abanico de hábitats sobre los que descansa la diversidad de playeros. La primera prioridad, ya señalada, sería impedir cualquier bloqueo físico que pudiese detener la progradación que naturalmente ocurriría en 70% de las playas. La segunda prioridad sería mantener el abanico de humedales existentes, y eventual creación de humedales artificiales.

En ese sentido, habiendo en la región estudiada 70% de la costa en condiciones de progradar, la oportunidad está abierta para una gestión prospectiva (Lavell y Argüello, 2003) y para analizar en términos de vulnerabilidad institucional (Wilches-Chaux, 1993) aquellos aspectos que facilitarían o dificultarían una planeación a largo plazo como la que requiere la gestión prospectiva.

En apoyo a esta propuesta de gestión, la proyección teórica del rango de afectación de la abundancia de aves playeras en escenarios de pérdida creciente del hábitat playas marinas, permite contrastar las pérdidas inevitables en caso de una elevación, y el amplio rango de pérdidas evitables mediante una gestión adecuada (figura 4).



**Figura 4.** Proyección teórica del rango de afectación de la abundancia de aves playeras en escenarios de pérdida creciente del hábitat playas marinas, indicando pérdidas inevitables en caso de una elevación, y pérdidas evitables mediante la gestión.

## LECCIONES APRENDIDAS

El análisis que ofrecemos, con obvias aplicaciones a la planeación del territorio costero, descansa sobre una separación de hábitat a escala fina (1: 9 500, y relevamientos directos) pero su grado de operatividad podría menguar si hubiera menor definición espacial.

Se muestra que la vulnerabilidad diagnosticada con una aproximación ecológica puede ser traducida sin problemas a términos más operativos que plantea la gestión del riesgo, y enlazarse con procesos de gestión del espacio litoral, encontrándose en ese proceso las aristas sociales de la vulnerabilidad.

La correspondencia entre conceptos de disturbio y riesgo planteados, y el enlace con la gestión, son compatibles con aproximaciones ingenieriles que modelan la interacción entre (1) agentes de peligro (*e.g.* viento, oleaje, o mareas de tormenta), (2) rasgos físicos, biológicos y sociales de la costa que los reciben, y a los cuales se asocia el vocablo vulnerabilidad y (3) las acciones y/o diseños que pueden disminuir los efectos dañinos de la interacción (Mendoza *et al.*, 2006).

Entendemos que la correspondencia señalada arriba obedece a que ambas aproximaciones plantean la vulnerabilidad con una perspectiva de concepto más que de definición, y un concepto determina todo lo que puede incluir una palabra, mientras que las definiciones determinan todo lo que debe excluir una palabra (Abbagnano, 1961; Fernández-Christlieb, 2004). En estos casos el concepto de vulnerabilidad se mantiene, y eventualmente se asigna el tipo de vulnerabilidad que corresponda, sin redefinir términos.

En cambio, la correspondencia no es tan directa, aunque igualmente posible, con aproximaciones como las del Instituto Nacional de Ecología (INE), que reservan el término fragilidad para los objetos expuestos tangibles del medio natural, y el término vulnerabilidad para los elementos del medio social, incluyendo objetos expuestos tangibles de origen antrópico (INE, 2007). En ese caso, como el enfoque diagnóstico del INE está orientado por el Modelo de Presión-Estado-Respuesta (OECD, 1993) los tipos de vulnerabilidad de los objetos expuestos tangibles pueden tratarse como indicadores de estado del medio físico-biótico (fragilidad) y del medio social (vulnerabilidad). Un poco más difícil es la correspondencia con aproximaciones que desdoblán y redefinen términos tales como vulnerabilidad, fragilidad, y sensibilidad, sin necesariamente añadir operatividad (Malvárez-García *et al.*, 2000; Zacharias y Gregr, 2004; Walter *et al.*, 2004; Cooper, 2005).

El planteamiento que ofrecemos podría ser difícil de operar en la vida real, dado que la ocupación urbana de la franja litoral es una tendencia mundial muy establecida (que en la región se manifiesta de modo vertiginoso) y porque la conservación del elenco de playeros migratorios no podría competir ni como argumento ni como prioridad frente al desarrollo urbano. Sin embargo, las predicciones visualizadas desde la óptica de los playeros han ayudado a identificar segmentos de la costa en los que los efectos serían más severos si los ambientes no pudieran progradar, ya sea por topografía abrupta o por presencia de estructuras bloqueadoras, lo cual automáticamente advierte sobre desaciertos en la elección de muchos de los usos establecidos (Galbraith *et al.*, 2005) que a su vez, impondrían nuevas causales para la consolidación de otros escenarios de riesgos (Mustin *et al.*, 2007; Vinchon *et al.*, 2009).

## SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES

Los profesionales costeros (Clark, 1998) pueden encontrar atractivos nuestros resultados, que a partir de datos sobre un segmento muy emblemático del medio natural, como son los playeros, van enlazando ordenadamente el ámbito de la gestión, con equivalencias rastreables. En ese enlace, una vez identificada la amenaza o peligro, los pasos recomendables serían la iden-

tificación de objetos expuestos tangibles, y la proyección de la gestión, asignando al término vulnerabilidad la acepción más amplia, que puede refinarse en sucesivas aproximaciones.

Nuestra lectura de la gestión del riesgo no es la más convencional, ya que habitualmente se considera intervenir sobre la amenaza como alternativa principal para reducir el riesgo, con lo cual, en caso de amenazas naturales, se abusa de su inevitabilidad y se soslaya la responsabilidad social de reducir la vulnerabilidad. En cambio, aquí se sugiere que un adecuado diagnóstico de las fuentes de vulnerabilidad habilita una lectura más integral del escenario de riesgo-disturbio, derivando estrategias de gestión más realistas y responsables.

## **AGRADECIMIENTOS**

Reconocemos a M. Mondragón (CICESE) la diligente confección de tablas y figuras, a G. Chávez (INAH-BC) las sugerencias para mejorar la figura 3, y a J. Serrano (Ciencias Marinas, UABC) los atinados comentarios al primer manuscrito.

## **LITERATURA CITADA**

- Abbagnano N., 1961. Diccionario de Filosofía. Fondo de Cultura Económico, México.
- Bricker O., y M. Ruggiero, 1998. Toward a national program for monitoring environmental resources. *Ecological Applications*, 8 (2):362-329.
- Cardona OD., 1993a. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad, y el riesgo, elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. p. 51-74. En: A. Maskrey (comp.). Los Desastres no son Naturales. La Red-ITDG, Colombia.
- Cardona OD., 1993b. Manejo ambiental y prevención de desastres. p. 75-93. En: A. Maskrey (comp.). Los Desastres no son Naturales. La Red-ITDG, Colombia.
- Cardona OD., 2001. La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Disponible en [www.desenredando.org/public/articulos/index.html](http://www.desenredando.org/public/articulos/index.html).
- Ceseña C., 1990. Fotografía aérea escala 1:9 500 Puerto de Ensenada, B.C. México. Archivos personales, 1990.
- Clark JR., 1998. Coastal Seas, the Conservation Challenge. Blackwell Science, Oxford.
- Connell J.H., 1978. Diversity in tropical rain forest and coral reefs. *Science*, 199:1302-1310.
- Contreras-Motolinía, R., 1999. Exploración del modelo de estructura jerárquica del ambiente (Kolasa, 1989) en la zona costera del Pacífico de Baja California, México. Tesis de Maestría, Departamento de Ecología, CICESE, México.
- Cooper MJP., MD. Beevers, y M. Oppenheimer, 2005. Future sea level rise and the New Jersey coast, assessing potential impacts and opportunities. Disponible [www.princeton.edu/~cmi/news/Future%20of%20Sea%20Level%20Rise%20and%20the%20New%20Jersey%20Coast.pdf](http://www.princeton.edu/~cmi/news/Future%20of%20Sea%20Level%20Rise%20and%20the%20New%20Jersey%20Coast.pdf).
- Croonquist M., y R. Brooks, 1991. Use of avian and mammalian guilds as indicators of cumulative impacts in riparian-wetland areas. *Environmental Management*, 15 (5):701-714.
- Daniels RC, TW. White, y KK. Chapman, 1993. Sea-level rise: destruction of threatened and endangered species habitat in South Carolina. *Environmental Management*, 1993; 17(3): 373-385.

- Dethier MN., 1984. Disturbance and recovery in intertidal pools: maintenance of mosaic patterns. *Ecological Monographs*, 54: 99-118
- Dethier MN., 1992. Classifying marine and estuarine natural communities: an alternative to the Cowardin System. *Natural Areas Journal*, 12 (2):90-100.
- Doornkamp JC., 1998. Coastal flooding, global warming and environmental management. *Journal of Environmental Management*, 52:327-333.
- Escofet A., 1989. Ecología aplicada en Baja California. p. 285-318. En: J. de la Rosa-Véleza y F. González-Farías (eds.). *Temas de Oceanografía Biológica en México*. Ensenada.
- Escofet A., 1994. Evaluación de hábitat y de fuentes de disturbio. p. 497-525. En: G. de la Lanza-Espino y C. Cáceres-Martínez (eds.) *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*. UNAM-UABC, México.
- Escofet, A., 2004. Aproximación conceptual y operativa para el análisis de la zona costera de México: un enfoque sistémico-paisajístico de multiescala. Tesis de Doctorado, Fac. Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, Baja California, México.
- Fernández-Christlieb P., 2004. *La sociedad mental*. Anthropos, México.
- Galbraith H, R. Jones, R. Park, J. Clough, S. Herrod-Julius, B. Harrington, y G. Page, 2005. Global climate change and sea level rise: potential losses of intertidal habitats for shorebirds. Disponible en [www.treesearch.fs.fed.us/pubs/32117](http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/32117).
- Hays R., C. Summers, y W. Seitz, 1981. *Estimating wildlife habitat variables*. Fish and Wildlife Service, US Department of the Interior, Washington. DC.
- Hernández-Leonel, ML., 2005. La fauna de fondos blandos en el corredor costero Tijuana-El Rosario (BC, México): un análisis de la comunidad. Tesis de Maestría en Ecología Marina. CICESE. Ensenada, BC. 2005.
- Holling CS., 1973. Resilience and stability in ecological systems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 4:1-23.
- Instituto Nacional de Ecología (INE), 2007. *Términos de referencia generales para el Programa de Ordenamiento Ecológico de la región costero terrestre del Golfo de México y Mar Caribe*.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1981a. *Cartas topográficas. Escalas 1:250 000 y 1:50 000*. Secretaría de Programación y Presupuesto.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1981b. *Carta de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000*. Secretaría de Programación y Presupuesto.
- Jacobs J., 1975. Diversity, stability and maturity in ecosystems influenced by human activities. p. 187-207. En: W. H. van Dobben & R. H. Lowe-McConnell (eds.). *Unifying Concepts in Ecology*. Dr W. Junk B. V. Publishers, The Hague.
- Keddy PA., 1991. Working with heterogeneity an operator's guide to environmental gradients. p. 181-201 En: J. Kolasa y STA. Pickett (eds). *Ecological Heterogeneity*. Springer-Verlag, New York.
- Kolasa J., 1989. Ecological systems in hierarchical perspective: breaks in community structure and other consequences. *Ecology*, 70 (1):36-47.
- Kolasa J., y STA. Pickett, 1991. *Ecological Heterogeneity*. Springer-Verlag, New York, 1991.
- Krebs J., 1994. *Ecology, the Experimental Analysis of Distribution and Abundance* (fourth edition) Addison Wesley Longman Inc, USA.
- Lavell A, y M. Argüello, 2003. *Gestión del riesgo: un enfoque prospectivo*. Colección Cuadernos de Prospectiva 3, PNUD.

- Le V. dit Durell SEA., RA. Stillman, RWG. Caldow, S. McGorrt, AD. West, y J. Humphreys, 2006. Modelling the effect of environmental change on shorebirds: A case study on Poole Harbour, UK. *Biological Conservation*, 131(3):459-473.
- López-Uriarte E., A. Escofet, E. Palacios, y S. González, 1997. Migrant shorebirds at sandy beaches located between two major wetlands on the Pacific coast of Baja California (México). *Natural Areas Journal*, 17 (3):212-218.
- Malvárez-García G., J. Pollard, y R. Domínguez-Rodríguez, 2000. Origins, management and measurement of stress on the coast of southern Spain. *Coastal Management*, 28: 215-234
- Mendoza E., JL. Quiñone, y R. Silva, 2006. Estudio experimental de la forma estable de diques rompeolas. XIV Congreso Nacional de Oceanografía, Manzanillo, Col. México.
- Mustin K., WJ. Sutherland, y JA Gill, 2007. The complexity of predicting climate-induced ecological impacts. *Climate Research*, 35: 165-175.
- Odum EP., 1986. Fundamentos de Ecología. Nueva Editorial Interamericana, México DF.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 1993. OECD core set of indicators for environmental performance reviews. Environment Monographs, 83 p.
- Orians GH. 1975. Diversity, stability and maturity in natural ecosystems. p. 139-148. En: W. H. van Dobben & R. H. Lowe-McConnell (eds.). Unifying Concepts in Ecology. Dr W. Junk B. V. Publishers, The Hague.
- Palacios E., A. Escofet A, y DH. Loya-Salinas, 1991. El estero de Punta Banda, Baja California, México, como eslabón del "Corredor Migratorio del Pacífico": abundancia de aves playeras. *Ciencias Marinas*, 17 (3):109-131.
- Pineda J., y A. Escofet, 1989. Selective effects of disturbance on populations of sea anemones from northern Baja California, México. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 55:55-62.
- Pianka E., 1978 Evolutionary Ecology (2<sup>nd</sup> edition) Harper & Row Publishers, NY.
- Ray GC., y BP. Hayden, 1992. Coastal zones ecotones. p. 403-420. En: AJ Hansen, y F di Castri (eds.). Landscape Boundaries, consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows. Springer-Verlag, NY
- Ricklefs R., 1990. Ecology (3<sup>rd</sup> edition). W. H. Freeman and Company, NY.
- Rykiel EJ., 1985. Toward a definition of ecological disturbance. *Australian Journal of Ecology*, 10:361-365.
- Souza WP., 1984. The role of disturbance in natural communities. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 15: 353-391.
- Titus JG., y Ch. Richman, 2001. Maps of lands vulnerable to sea level rise: modelled elevations along the US Atlantic and Gulf coasts. *Climate Research*, 18: 205-228.
- Turner RK., S. Subak, y WN. Adger, 1996. Pressures, trends, and impacts in coastal zones: interactions between socioeconomics and natural systems. *Environmental Management*, 20 (2):159-173.
- Vinchon C., S. Aubie, Y. Balouin, L. Closset, M. Garcin, D. Idier, y C. Mallet, 2009. Anticipate response of climate change on coastal risk at regional scale in Aquitaine and Languedoc Roussillon (France). *Ocean and Coastal Management*, 52:47-56.
- Walter B., CS. Holling, SR. Carpenter, y A. Kinzig, 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9 (2): 5. Online [www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/](http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/).

- Westman WE., 1978. Measuring the inertia and resilience of ecosystems. *BioScience*, (11): 705-710.
- Wilches-Chaux G., 1993. La vulnerabilidad global. p. 9-50. En: A. Maskrey (comp.). Los Desastres no son Naturales. La Red-ITDG, Colombia.
- Zacharias MA., y EJ. Gregr, 2004. Sensitivity and vulnerability in marine environments: an approach to identifying vulnerable marine areas. *Conservation Biology*, 19(1):86-97.



Padilla Souza, C., H. Alafita-Vásquez, y E. Andreu-Montalvo, 2010. Factores de riesgo para los arrecifes coralinos y sus mecanismos de respuesta ante los efectos del cambio climático global, p. 181-204. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Factores de riesgo para los arrecifes coralinos y sus mecanismos de respuesta ante los efectos del cambio climático global

*Claudia Padilla Souza, Héctor Alafita-Vásquez y Erika Andreu-Montalvo*

---

## RESUMEN

Los arrecifes coralinos son ecosistemas complejos, interrelacionados con ambientes terrestres y marinos, que se encuentran seriamente amenazados por los efectos del cambio climático que han estado alterando su estructura y funcionamiento. Además, estos ambientes están expuestos a una serie de factores de riesgo generados a una escala local y regional, principalmente derivados de actividades antrópicas, los cuales incrementan su vulnerabilidad e impiden el desarrollo de mecanismos de adaptación ante un ambiente cambiante. Esta situación evidencia la urgente necesidad de realizar ajustes en las estrategias y objetivos tradicionales de conservación para los ambientes arrecifales, siendo importante que se implementen medidas de manejo regionales y locales con una visión holística e integradora. Bajo este precepto, se establece un nuevo paradigma para la conservación de los arrecifes coralinos, el cual consiste en diseñar e implementar estrategias de adaptación al cambio climático global, a través de fortalecer la resiliencia en estos ambientes, permitiendo que sus mecanismos de respuesta naturales actúen para adecuarse al cambio. Con esta intención se propone una estrategia para la conservación de los arrecifes coralinos, que incluye la integración de iniciativas a distintos niveles de acción, enfocada a mantener, conservar e incrementar la resiliencia de estos ambientes. Esta propuesta considera diversas herramientas de manejo las cuales, a través de un proceso integrador, permitirán orientar la toma de decisiones, tanto para el desarrollo como para la conservación, logrando introducir la variable ambiental como criterio primordial. El éxito de esta estrategia estará en función de la medida en que los manejadores de recursos y los

tomadores de decisiones impulsen de manera formal este tipo de iniciativas, en plazos que permitan alcanzar objetivos tangibles y con resultados inmediatos, para hacer frente al cambio climático que sufre nuestro planeta.

## INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son ecosistemas complejos en su estructura y funcionamiento, se encuentran formados por la acumulación de carbonato de calcio que secretan y depositan los organismos que lo habitan. Los corales escleractinios son considerados los constructores primarios por su contribución a la acreción de la estructura arrecifal, a través de la acumulación de sus esqueletos (Schumacher y Zibrowius, 1985), aunque la contribución de muchos otros organismos es indispensable como material de relleno y cementante (Guilcher, 1988). Considerando lo anterior, los arrecifes son verdaderos depósitos de origen biogénico (Wells, 1954), por lo que actualmente, son empleados con éxito para la reconstrucción de condiciones ambientales del pasado reciente (Villaescusa y Carriquiry, 2004; Caderón-Aguilera *et al.*, 2007).

En México, los arrecifes se distribuyen en cuatro áreas principales: Pacífico (sur del Golfo de California hasta Oaxaca y las islas Revillagigedo), donde las condiciones ambientales son desfavorables para su desarrollo; suroeste del Golfo de México (Sistema Arrecifal Veracruzano y los arrecifes de Tuxpan y Lobos), con fuerte influencia terrígena por la desembocadura de ríos; sonda de Campeche, son arrecifes que se desarrollan en un ambiente oceánico; y Caribe Mexicano (costa oriental de la península de Yucatán, incluyendo islas y banco Chinchorro), siendo un área en donde se ha llevado a cabo un alto desarrollo costero.

De estos arrecifes, los del Golfo de México y Mar Caribe son los más reconocidos por su nivel estructural e importancia económica y ecológica, íntimamente asociada a la amplia plataforma continental de la cuenca del Caribe Mexicano, siendo generadores de una gran variedad de bienes y servicios, tanto ambientales como productivos. Desde el punto de vista biológico, los arrecifes han sido considerados los ecosistemas más diversos, productivos y complejos del medio marino, comparados en el medio terrestre con las selvas altas perennifolias (Connel, 1978), que proporcionan refugio, alimentación y zonas de reproducción a una gran cantidad de especies, dentro de las que se encuentran recursos de alto valor comercial. Por otro lado, los arrecifes sirven de protección a la costa de la acción del oleaje, tormentas y huracanes, además de que son formadores de las playas arenosas. Aunado a lo anterior, los arrecifes tienen gran importancia en la generación de condiciones óptimas para el desarrollo de ambientes asociados a ellos, tales como manglares, comunidades de pastos marinos y dunas costeras, existiendo entre estos ecosistemas relaciones ecológicas muy importantes, especialmente de intercambio de nutrientes y biomasa, ya que gran número de animales del arrecife tienen sus etapas larvarias en las praderas de pastos y en el manglar (Mumby *et al.*, 2004).

Ahora bien, si consideramos la ubicación de estos arrecifes, es posible aseverar que se encuentran en algunas de las zonas de mayor importancia económica a nivel nacional, relacionándose así con las actividades productivas básicas para el desarrollo del país tales como el turismo. De

acuerdo a datos de la Secretaría de Turismo, en el periodo de 1998 al 2007, las zonas turísticas de Quintana Roo presentaron un incremento en la afluencia turística del orden de 173%, de modo que esta actividad económica representa, después de la industria petrolera, la más importante generación de divisas del país. Sin duda, el éxito del turismo como actividad altamente productiva está directamente asociado a la existencia de los arrecifes de coral ya que, además de ser un atractivo por su alto valor paisajístico y para el desarrollo de actividades acuáticas, son los responsables de la presencia de arena en estos destinos turísticos.

Desgraciadamente, en la actualidad los arrecifes de coral se encuentran seriamente amenazados por el cambio climático que ocurre a nivel mundial, el cual afecta por igual a ecosistemas terrestres y marinos. La emisión de gases de efecto invernadero es considerada la causa principal al producir cambios en la atmósfera que modifican las condiciones normales del aire y del agua, alterando de esta manera el clima global y con ello el balance ecosistémico. Justo en la zona de intercambio entre las zonas marinas y terrestres se encuentran ubicados los arrecifes de coral, los cuales interactúan tanto con los elementos provenientes de los grandes océanos, como con aquellos que llegan de las masas continentales, lo que los convierte en ecosistemas indicadores del funcionamiento de las condiciones ambientales del mar y la tierra. A pesar de que el cambio climático representa una de las mayores amenazas para los arrecifes, éstos cuentan con mecanismos de regulación ambiental, los cuales son estrategias de adaptación que surgen de procesos evolutivos, que les permiten hacer frente a las adversidades del entorno; entre estas herramientas se encuentran la resistencia y la resiliencia (Grimsditch y Salm, 2006). Esta capacidad evolutiva, generada a través de 250 millones de años, les brinda la posibilidad de adaptarse y recuperarse de daños directos e indirectos; sin embargo, la celeridad e intensidad con la que actualmente se está alterando el patrón ambiental pone en riesgo su capacidad de respuesta, la cual compromete su estabilidad ecosistémica, y con ella los bienes y servicios ambientales que proporcionan.

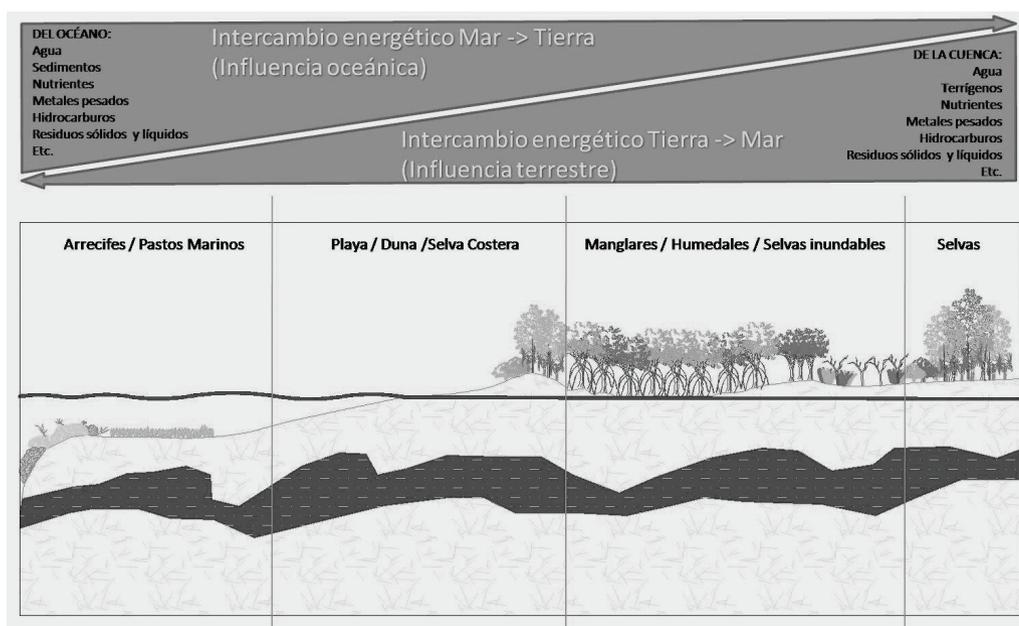
Aunado a los procesos y alteraciones generados por el Cambio Climático Global (CCG) existen factores de presión de escala local y regional, que no sólo alteran las condiciones ambientales óptimas de los arrecifes de coral, sino que incrementan su estrés ambiental impidiéndoles desarrollar o implementar de manera efectiva sus mecanismos de regulación y adaptación. Estos factores se vinculan de manera directa con actividades antrópicas, que no necesariamente obedecen a procesos del CCG, pero que en conjunto y de manera sinérgica incrementan la fragilidad de estos ecosistemas y dificultan sus procesos adaptativos.

Por todo lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo establecer los elementos necesarios para el desarrollo de una franca discusión y análisis de las estrategias que permitan estimular los mecanismos de resistencia y resiliencia de los arrecifes, a través de la comprensión de los efectos generados tanto por el CCG, así como por los factores antrópicos que afectan su capacidad de respuesta, generando de este modo una estrategia de conservación de los arrecifes coralinos ante el CCG.

## FACTORES DE RIESGO PARA LOS ARRECIFES CORALINOS

Los arrecifes coralinos, al ser ecosistemas altamente especializados, resultan vulnerables a los cambios y alteraciones del medio en el que se desarrollan, ya que su distribución está condicionada a parámetros específicos y estables (Goreau *et al.*, 1979). Paradójicamente, estos ambientes se desarrollan en zonas altamente dinámicas, en donde converge una interacción entre agentes de origen terrestre con los propios de la zona marina, de modo que las fuerzas ambientales que actúan en la zona costera determinan en gran medida los factores de riesgo a los que están expuestos. Por una parte, la cuenca costera representa una influencia directa a través de los flujos hidrológicos superficiales y subsuperficiales, mientras que la parte marina interactúa con los flujos energéticos representados por las corrientes oceánicas, de tal modo que ambas regiones representan un aporte de factores de riesgo que alteran directa o indirectamente las condiciones ambientales óptimas en las que se desarrollan estos ambientes (figura 1).

Esta interacción de ambientes y flujos energéticos que determinan la función y estructura de los arrecifes coralinos se ha visto seriamente alterada por los efectos del cambio climático global. Ante esta situación, resulta importante connotar la actuación espacial de los factores y elementos de riesgo a los cuales están expuestos estos ambientes, por lo que para el presente estudio se consideraron dos estrategias para su análisis, enfocadas a facilitar la clasificación de los factores de riesgo con fundamento en sus ámbitos de acción geográfica y en el nivel de detalle que caracteriza el alcance de cada visión.



**Figura 1.** Ejemplificación de las fuerzas y elementos ambientales que interactúan con los arrecifes coralinos en la zona del Caribe Mexicano.

## ANÁLISIS REGIONAL / GLOBAL

Indiscutiblemente, el factor de riesgo más importante desde el punto de vista global para los arrecifes es el cambio climático, el cual ejerce una fuerte presión ocasionando diversas alteraciones (Buddemeier *et al.*, 2004; Hughes *et al.*, 2003). El aumento de la temperatura del océano (Berkelmans y Oliver, 1990), y el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos climatológicos extremos como el fenómeno de “El Niño” (Glynn, 1988), son las principales causas de una mayor superficie de comunidades coralinas afectadas por eventos masivos de blanqueamiento. El aumento en las tasas de precipitación produce una fuerte degradación por una mayor descarga de sedimentos en el océano, que origina también cambios en la salinidad del agua marina (Lirman, 2003). La elevación en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera modifica la composición química marina acidificándola, lo cual afecta el crecimiento de organismos constructores de arrecife al debilitar su estructura (Gattuso *et al.*, 1998; Kleypas *et al.*, 1999). El aumento del nivel medio del mar disminuye la disponibilidad de luz para las comunidades arrecifales altamente dependientes de procesos fotosintéticos.

Este tipo de alteraciones son ampliamente documentadas para los arrecifes de todo el mundo; sin embargo, es importante reconocer que el conocimiento técnico-científico de los mecanismos bajo los cuales operan estos factores es aún incipiente. Esta realidad, aunada a la complicación de implementar estrategias de alcance global, hace que la atención de esta problemática ambiental resulte francamente difícil, con lo que se incrementa la incertidumbre y una falta de objetividad en la toma de decisiones orientadas a la conservación de los arrecifes coralinos.

## VISIÓN LOCAL / REGIONAL

Otro tipo de factor de riesgo para los arrecifes coralinos tiene un alcance más bien regional o local y en su mayoría son ocasionados por acciones antrópicas (Mora, 2008). Las perturbaciones que ocurren a este nivel son ampliamente reconocidas en el ámbito de la conservación de los recursos naturales y durante la evaluación del impacto ambiental, tales como la expansión de las fronteras urbanas, agrícolas e industriales (Jones, 2005; Lipp *et al.*, 2002), el desarrollo no planificado de las zonas costeras (Yañez-Arancibia *et al.*, 1996), las actividades turísticas y de navegación (Esslemont, 1999; Roupael y Inglis, 2000; Zakai y Chadwick-Furman, 2002), y las actividades extractivas y pesqueras (Padilla, 2000; Pikitch *et al.*, 2004).

Estos factores, en términos generales no están directamente relacionados con el CCG, pero pueden interactuar de manera sinérgica al incrementar el grado de vulnerabilidad de las poblaciones coralinas (Gardner *et al.*, 2003; Hughes *et al.*, 2003; Bellwood *et al.*, 2004). Esta situación genera un cambio en el patrón de estrés crónico y constante al cual están sometidos estos ambientes (Buddemeier *et al.*, 2004), lo que dificulta el desarrollo de los mecanismos de regulación que normalmente operan en los organismos y en las comunidades para adaptarse y recuperarse.

A pesar de esto, las comunidades coralinas han demostrado ser capaces de recuperarse tras algún efecto que cause daño y mortalidad esporádica como son los huracanes (Manzello *et al.*,

2007), así como tolerar factores de estrés constantes como puede ser la descalcificación (Fine y Tchernov, 2007). Sin embargo, a pesar de los diversos mecanismos de recuperación de estos ecosistemas, su condición actual es francamente preocupante. Un estudio reciente calificó el estado de salud de las comunidades coralinas del Sistema Arrecifal Mesoamericano. Reporta que en el Caribe Mexicano 50% de los sitios evaluados se encuentran en mal estado, mientras que 37% fue calificado como regular; solo 6% fue considerado en buen estado de salud, mientras que 7% se determinó en estado crítico, sin tener un solo sitio en excelente estado de salud (McField & Kramer-Richards, 2007; Healthy Reefs Initiative, 2008).

## **MECANISMOS DE RESPUESTA DE LOS ARRECIFES CORALINOS ANTE EL CAMBIO**

La compleja interacción de factores de riesgo que actualmente tienen que soportar los arrecifes coralinos ha generado modificaciones importantes en su estructura y en sus funciones, de tal modo que se pueden causar cambios de fase relativamente rápidos entre estados ecológicos de equilibrio, cuando ciertos umbrales de tolerancia son rebasados (Nyström *et al.*, 2000). Por ejemplo, en el Caribe los arrecifes coralinos están experimentando un cambio importante en la dominancia de corales a macroalgas desde la década de los 80, debido a una combinación de factores que incluyen la sobrepesca de peces herbívoros claves y la adición antropogénica de nutrientes al mar (Knowlton, 1992).

Sin embargo, los arrecifes coralinos son ecosistemas complejos, tanto en su estructura, como en su función, en donde se establecen flujos de energía intrincados entre los diferentes componentes bióticos a través de los variados procesos fisiológicos que ocurren en este ambiente. Estas características confieren cierta estabilidad y equilibrio al ecosistema, lo cual permite la existencia de mecanismos de respuesta y estrategias adaptativas para enfrentar situaciones de riesgo (Begon *et al.*, 1990).

Bajo estas consideraciones se esperaría que, de manera ideal, los arrecifes coralinos pudieran ser capaces de resistir la acción de ciertos factores de riesgo, o de recuperarse de los daños que se hayan originado. Como se comentó con anterioridad, estas respuestas para afrontar los cambios ocurren a través de dos mecanismos: la resistencia, entendida como la capacidad de un ecosistema para aguantar o soportar cambios; y la resiliencia, que es la habilidad que posee para recuperarse del cambio (Grimsditch y Salm, 2006). En términos de la estructura y estabilidad de una comunidad, la resiliencia describe la velocidad con la que una comunidad regresa a su estructura original después de que ha sido perturbada y desplazada de ese estado, mientras que la resistencia se refiere a la capacidad que tiene para evitar el desplazamiento de ese estado (Begon *et al.*, 1990). Ante esta perspectiva, la medida en que un ecosistema arrecifal posea características para que estos mecanismos de defensa y respuesta puedan actuar, determinará su destino ante la compleja interacción de cambios a la que actualmente se encuentran expuestos (Hansen & Biringer, 2003).

## RESISTENCIA

Considerando el blanqueamiento, que es uno de los efectos más severos y extendidos que provoca el cambio climático global en los arrecifes coralinos de todo el mundo, la resistencia se hace evidente cuando la mortalidad ocurrida no representa un cambio significativo en la dinámica poblacional de las especies que la hayan presentado, lo cual evita un posible cambio de fases en el ecosistema. Esta resistencia puede lograrse mediante 2 mecanismos: la tolerancia y la evasión (Grimsditch y Salm, 2006).

La tolerancia se refiere a las propiedades fisiológicas actuales de los corales que les permiten evitar la expulsión de las algas simbiotas (zooxantelas), aún bajo condiciones de estrés. Uno de los mecanismos es a través de la aclimatación, en donde se presentan cambios fenotípicos para ajustar sus niveles de tolerancia (Brown *et al.*, 2000). Incluso, el blanqueamiento ha sido planteado como un mecanismo evolutivo de adaptación a altas temperaturas (Buddemeier y Fautin, 1993), al considerar que los corales expelen las zooxantelas con la finalidad de reemplazarlas con otras más resistentes. Esta hipótesis ha sido apoyada con experimentos de trasplantes (Baker, 2001), aunque otros expertos consideran que no necesariamente es una respuesta evolutiva, sino una aclimatación fenotípica (Hughes *et al.*, 2003). Sin embargo, lo que probablemente existe es una diferencia en la respuesta de las zooxantelas a la radiación UV y al calor, siendo que algunos clados son más resistentes que otros (Baker, 2001; Fabricius *et al.*, 2004). Del mismo modo, diferentes especies y morfologías de las colonias varían en su tolerancia al blanqueamiento (Obura, 2005), siendo que especies ramificadas de crecimiento rápido (*e.g. Acropora, Pocillopora*) sufren mortalidades por blanqueamiento más altas que especies masivas de crecimiento lento (*e.g. Montastrea*) (Marshall y Baird, 2000).

Por otro lado, la evasión se refiere a factores oceanográficos o ambientales que crean espacios en donde las condiciones de perturbación son reducidas o nulas (Salm *et al.*, 2001; West y Salm, 2003; Obura, 2005) y tienen que ver más con su ubicación geográfica. Estos pueden ser movimientos de las masas de agua, ya sean originados por eventos de surgencia (Merino, 1997), o fuertes corrientes (West *et al.*, 2003), o presentar algún tipo de protección como la sombra de rocas emergentes o islas, así como el reflejo de la radiación UV por partículas suspendidas como en sitios turbios (Goreau *et al.*, 2000).

En un sentido más amplio, la resistencia de un ecosistema marino es menor cuando la redundancia ecológica es baja, es decir cuando especies claves que juegan un cierto papel ecológico no pueden ser reemplazadas por otras especies dentro del ecosistema (Palumbi *et al.*, 2008). De esta manera, un arrecife coralino que ha estado expuesto a impactos antropogénicos, como pudiera ser la remoción de depredadores mayores por efecto de la pesca, pueden reducir dramáticamente su redundancia ecológica y por tanto alterar su capacidad como ecosistema para resistir un cambio ecológico provocado por factores ambientales globales. Siendo así, la diversidad presente en un ecosistema se relaciona con esta redundancia ecológica, de modo que entre mayor sea la diversidad de especies, de ambientes, de grupos funcionales, de estrategias reproductivas, mayor es la probabilidad de que un ecosistema resista los efectos de una perturbación.

## RESILIENCIA

En el caso de los arrecifes coralinos, la resiliencia se refiere a la capacidad de absorber los cambios o de recuperarse de perturbaciones, manteniendo sus funciones y servicios primordiales (Grimsditch y Salm, 2006). Así, un arrecife que tiende a regresar al mismo estado, incluso después de perturbaciones fuertes tiene alta resiliencia, mientras que uno que cambia a otro estado posee baja resiliencia.

Ciertos factores pueden incrementar la resiliencia de un arrecife coralino, tanto a escala ecológica como espacial (Obura, 2005). Los factores de resiliencia ecológica son propiedades presentes dentro de los límites espaciales de un ecosistema; mientras que los factores de resiliencia espacial se extienden más allá de los límites del ecosistema, y comprenden funciones y procesos de mayor escala.

El principal factor ecológico que afecta la resiliencia de los arrecifes coralinos es la existencia de una diversidad funcional balanceada dentro del arrecife (Gray, 1997), para lo cual es necesario tener una comunidad con una interacción de especies suficiente para recuperarse de perturbaciones (Nyström y Folke, 2001). Un grupo funcional importante para la resiliencia de los arrecifes coralinos son animales forrajeadores, incluyendo peces herbívoros y erizos entre otros. Ellos incrementan la resiliencia de un arrecife al prevenir el cambio de fases de arrecifes dominados por coral a arrecifes dominados por algas al mantener un control sobre el crecimiento algal, lo cual permite el asentamiento de reclutas de corales de lento crecimiento en vez de algas de rápido crecimiento (Nyström *et al.*, 2000). Otros grupos funcionales importantes que contribuyen a la resiliencia en los arrecifes son los corales duros y las algas coralinas responsables de la construcción de la estructura arrecifal, especies que se mueven entre hábitats incrementando la conectividad y sus áreas de soporte como los pastos marinos y los manglares, así como depredadores que previenen la dominancia de especies, y organismos que facilitan el asentamiento de larvas como bacterias, diatomeas y algas coralinas (Grimsditch y Salm, 2006). Esta diversidad funcional y las interacciones ecológicas que se establecen entre ellos confieren equilibrio y estabilidad al arrecife y por ende mayor resiliencia. Sin embargo este equilibrio es frágil y altamente vulnerable a perturbaciones, ya sean de efecto local o global, lo que ocasiona una pérdida o reducción de esta resiliencia.

Un factor espacial importante para la resiliencia de los arrecifes coralinos es la conectividad dentro y entre arrecifes. Poblaciones grandes de coral y descargas de larvas crean alta diversidad genética que es crucial para resiliencia en contra de la perturbación (Nyström y Folke, 2001). Las larvas poseen un movimiento limitado, pero son acarreadas por las corrientes, de manera que pueden viajar grandes distancias, manteniendo interconectados arrecifes distantes (Chia *et al.*, 1984). En este sentido, arrecifes con alta diversidad de corales sanos que funcionan como donadores resultan fundamentales para mantener la diversidad genética y resiliencia de los arrecifes receptores. Por ello, entender los patrones de corrientes, así como los de dispersión larval y conectividad son esenciales para la creación de redes de Áreas Marinas Protegidas (AMP) coherentes. Un aspecto importante que determina el rango en el cual se establece esta conectividad es el mecanismo de reproducción, ya que la reproducción asexual que presentan

algunas especies a través de la formación de fragmentos tiene un aporte local (Highsmith, 1980; Bak y Criens, 1981; Bothwell, 1981), mientras que la reproducción sexual implica una dispersión de larvas hacia otros arrecifes (Babcock y Heyward, 1986; Carlon y Olson, 1993; Fadlallah, 1983). En este último caso, la disponibilidad de sustratos apropiados para el asentamiento de larvas también es esencial para mantener la conectividad (Richmond, 1993).

Otro factor espacial de resiliencia es el que se refiere a un posible cambio de rangos geográficos, que se sustenta en las variaciones de la extensión y distribución que han presentado los arrecifes en el pasado geológico (Buddemeier *et al.*, 2004). Por tanto, existe la posibilidad de que los cambios globales en el clima puedan promover el crecimiento de arrecifes coralinos en áreas marginales, a través de una migración de constructores arrecifales hacia latitudes mayores. Sin embargo, habría que considerar que los corales actuales tendrían que asentarse y sobrevivir en áreas impactadas por actividades antrópicas, por lo que no siempre serían adecuadas para la colonización (Hughes *et al.*, 2003).

## ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN

### DE LOS ARRECIFES CORALINOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

La amenaza que implica el cambio climático global nos sitúa en una realidad que deberá tener fuertes implicaciones en la manera en la que los manejadores de recursos y los tomadores de decisiones gestionen, diseñen e implementen estrategias de conservación. Es un hecho la carencia de información técnica y científica para implementar acciones directas que prevengan y corrijan los daños que estos cambios ocasionan a los arrecifes coralinos; pero dado su inminente deterioro, es necesario y urgente, realizar ajustes a las estrategias y objetivos de conservación, siendo importante implementar medidas de manejo regionales con una visión holística e integradora, en plazos que permitan alcanzar objetivos tangibles y con resultados inmediatos.

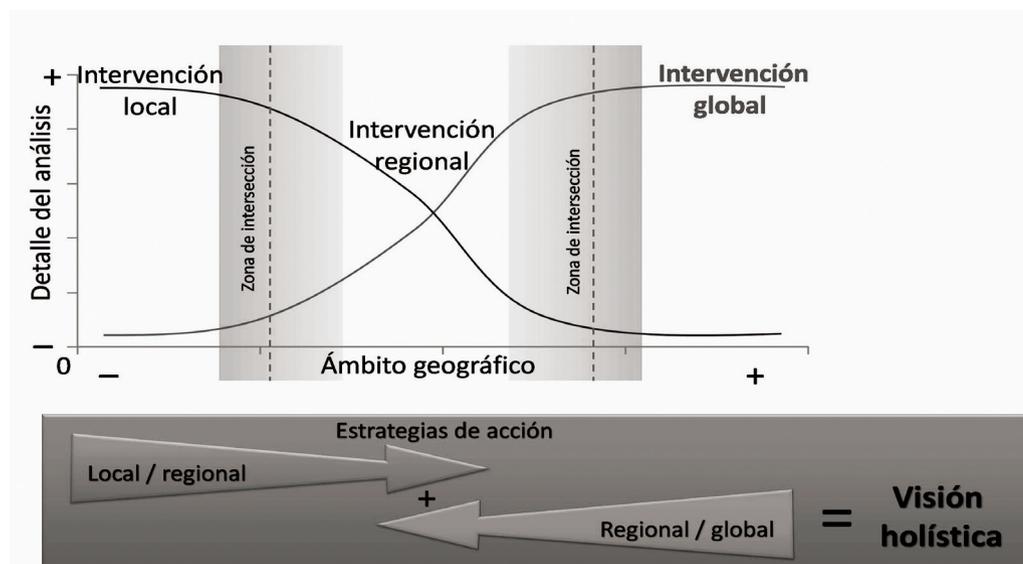
Hasta el momento, la mayoría de los organismos internacionales han reconocido la falta de efectividad de los instrumentos de manejo para reducir el impacto del cambio climático global sobre los arrecifes de coral, al no ser suficientes ni adecuados para entender sus procesos, y mucho menos para controlar sus efectos (Samaniego, 2009). Las estrategias que se han implementado para este fin a nivel global han resultado ser poco exitosas, debido a diversos factores que van desde la falta de sincronía geopolítica, necesidades socioculturales específicas, o simplemente diferencias tecnológicas o en la capacidad de respuesta de cada región. Por otro lado, la atención de la problemática ambiental a nivel local y/o regional presenta fuertes deficiencias, en donde las autoridades locales no han sido capaces de consolidar su estrategia de acción, en ocasiones por desconocimiento, pero también por graves procesos de corrupción o grandes presiones políticas.

Ejemplo de esto ocurre en Quintana Roo, en donde existen iniciativas para desarrollar zonas urbanas bajo Planes o Programas de Desarrollo Urbano (PDU) que proyectan un intenso crecimiento poblacional, sin considerar siquiera la capacidad para la prestación de servicios básicos, y mucho menos garantizar la no afectación de los recursos naturales como los arrecifes

a causa de un mal manejo de residuos y agua. De este modo, los PDU estimularán un desarrollo que requiera el uso de 173 mil millones de metros cúbicos de agua al año en esta entidad (Alafita-Vásquez *et al.*, 2008). En otro contexto, existen iniciativas de desarrollo costero enfocado únicamente a ciertos sectores, como el turismo o la explotación petrolera, que carecen de iniciativas de conservación y manejo integrado de los recursos naturales; tal es el caso de Tabasco, Campeche y Veracruz, en donde los proyectos de exploración, extracción y producción de petróleo cuentan con autorizaciones para el manejo de infraestructura en más de 44 000 km<sup>2</sup> (Zárate-Lomelí *et al.*, 2004), con el inminente riesgo de afectación a los arrecifes de coral ubicados en la cuenca marina de esta región.

Con base en lo anterior, se establece que la generación de problemas y soluciones ambientales referentes a los arrecifes coralinos representan una responsabilidad común, pero diferenciada por los actores que intervienen en ella, de tal manera que su atención deberá obedecer a su grado de intervención y ámbito geográfico de aplicación. Siendo así, es posible lograr un marco de participación local con alcances globales, lo que representa una integración realista y objetiva de aportes particulares a la solución de una problemática de alcances mundiales (figura 2).

De esta manera, considerando las características de los instrumentos actuales para contener los efectos del CCG y los factores de riesgo local/regional, se ha establecido un nuevo paradigma en la conservación en arrecifes coralinos, el cual consiste en diseñar e implementar estrategias de adaptación ante el cambio climático, bajo el concepto básico de fortalecer los procesos de resiliencia en estos ambientes, permitiendo que sus mecanismos de respuesta naturales actúen para adecuarse al cambio. Consecuentemente, la recomendación hacia los encargados del manejo radica en la construcción y generación de estrategias de adaptación de los arrecifes al



**Figura 2.** Conceptualización de la estrategia de acción para la atención de la problemática ambiental que a nivel local, regional y global está afectando a los arrecifes de coral.

cambio climático, a través de mantener, reforzar e incrementar la resistencia y la resiliencia de nuestros arrecifes coralinos (Nyström y Folke, 2001; Salm y Coles, 2001; Salm *et al.*, 2001; Hanse, 2003; Hansen y Biringier, 2003; Hughes *et al.*, 2003; West *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2004; Buddemeier *et al.*, 2004; Obura, 2005; Bellwood *et al.*, 2006; Grimsditch y Salm, 2006, Palumbi *et al.*, 2008).

De este modo, el compromiso de quienes dictan los lineamientos del manejo de los arrecifes y la zona costera deberá enfocarse a encontrar condiciones adecuadas para permitir que los mecanismos de respuesta naturales que poseen estos ecosistemas actúen para adecuarse a los cambios, mientras que el mundo trabaja para reducir nuestra influencia sobre el cambio climático global (Hansen y Biringier, 2003).

### **FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA COMO ESTRATEGIA PARA LA CONSERVACIÓN DE LOS ARRECIFES CORALINOS**

Derivado del análisis previo se observa que existe una real y urgente necesidad de estimular los procesos de resiliencia y resistencia de los arrecifes coralinos, como una medida paralela y complementaria a las acciones de atención del CCG. En este capítulo se han analizado desde las causas que originan el CCG, hasta estrategias generales que permitan la reducción o mitigación de los daños ocasionados por algunos de los factores de riesgo a estos ecosistemas. Sin embargo, en sentido estricto, se hace necesaria la implementación de herramientas e iniciativas con visión integral e integradora de los diferentes sectores involucrados, para definir diversas estrategias que estimulen la resiliencia de acuerdo a sus características de aplicación. Esto hace posible proponer medidas de prevención, acción, coordinación y seguimiento, de modo que la intervención en este proceso pueda ser dirigido objetivamente. Con fundamento en este razonamiento se propone un esquema conceptual de la estrategia de conservación a través de medidas específicas de atención a estos criterios de aplicación para fortalecer la resiliencia de los arrecifes coralinos (figura 3).

### **EVALUACIÓN AMBIENTAL ESTRATÉGICA (EAE)**

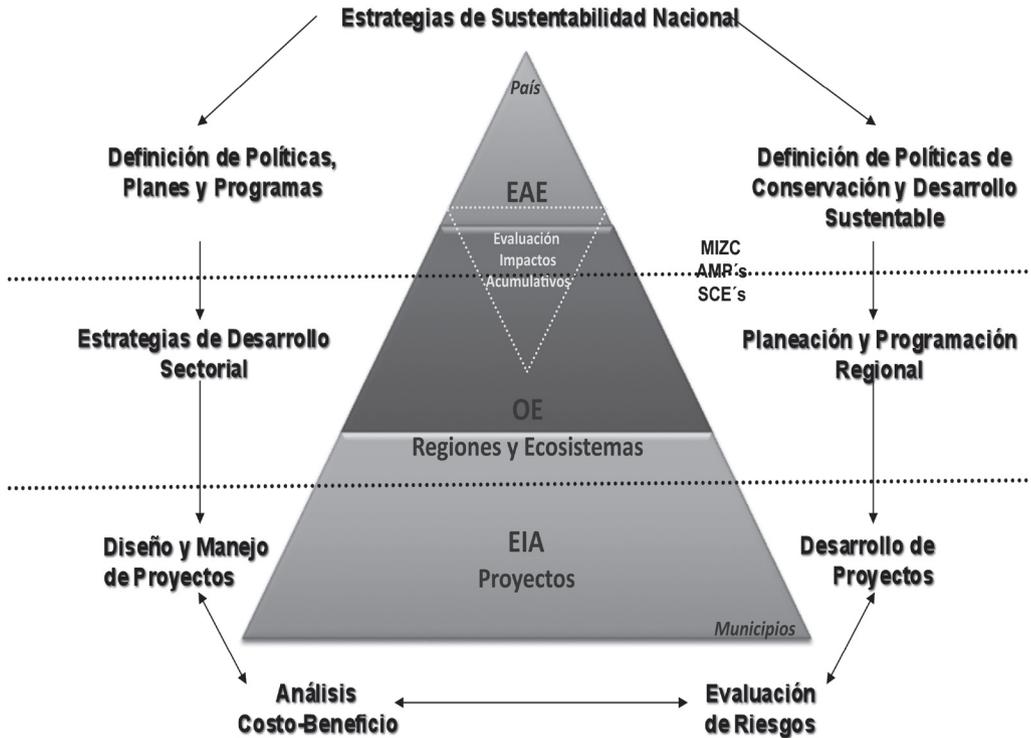
Evidentemente, el proteger, conservar y mejorar la resiliencia de los arrecifes de coral es un proceso complejo y de alcances variados. En México, a pesar de existir una franca evolución en cuanto a estrategias ambientales se refiere, todavía requiere impulsar las estrategias de conservación de una manera intersectorial, máxime en la protección de ecosistemas que, por sus características, representan valores ambientales únicos como son los arrecifes de coral. Considerando lo anterior, se debe resaltar la importancia de los instrumentos de manejo que permiten la conservación y estimulación de la capacidad resiliente de de estos ecosistemas, como es la conformación de redes de Áreas Marinas Protegidas (AMP) y la definición de Sitios de Conservación Estricta (SCE), aunados a las estrategias de protección, los cuales podrán garantizar en gran medida la permanencia de los arrecifes coralinos aún ante los efectos del CCG.



**Figura 3.** Esquema conceptual de la estrategia de conservación para fortalecer la resiliencia de los arrecifes coralinos. EAE = Evaluación Ambiental Estratégica; MIZC = Manejo Integrado de la Zona Costera; AMP = Áreas Marinas Protegidas y SCE = Sitios de Conservación Estricta. PPP = Políticas, Planes y Programas.

Aunado a lo anterior, la implementación de acciones de integración para el Manejo de la Zona Costera (MIZC), incrementan la certidumbre de éxito en la permanencia de los arrecifes coralinos, sin embargo, bajo una óptica realista de las condiciones socio-políticas del país, se requieren instrumentos de mayor profundidad e integración, que abarquen no solo los aspectos técnicos del manejo y conservación y los aspectos de la problemática urbana, turística, agropecuaria, industrial, etc., sino que incluya la integración de la matriz ambiental a los procesos objetivos de la toma de decisiones, a través de la inclusión de ésta, en el desarrollo de las Políticas, Planes y Programas (PPP), considerando estrategias de la política pública ambiental como es la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y el Ordenamiento Ecológico (OE). De esta manera, el círculo virtuoso de la integración intersectorial en los ámbitos locales y regionales, podría cerrarse en el instrumento correspondiente a la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) (figura 4).

De manera puntual, la Evaluación Ambiental Estratégica es un instrumento diseñado para identificar y evaluar las consecuencias ambientales de la formulación e implementación de Políticas, Planes y Programas (PPP), siendo un proceso sistemático para la toma de decisiones, a la par de las consideraciones económicas y sociales (Sadler y Verhemmm, 1996). Es importante mencionar que la EAE reconoce que, por sí mismos, la evaluación de impacto ambiental y el ordenamiento ecológico (y otros instrumentos de política ambiental), no desempeñan un papel relevante en la reducción de problemas ambientales regionales y globales causados por



**Figura 4.** Modelo conceptual de integración de la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), la cual incluye dentro de las estrategias de sustentabilidad nacional las AMP, SCE y MIZC. (Modificada de Zárate-Lomelí *et al.*, 2004).

el crecimiento económico, por lo que la evaluación de efectos acumulativos actuales y futuros de PPP no es considerada. De esta manera, la implementación de la EAE a las políticas, planes nacionales y sectoriales de desarrollo, programas sectoriales, acuerdos comerciales, leyes y regulaciones, a un nivel federal, estatal y municipal, permitiría que fueran concebidas con una visión verdaderamente holística, ya que la EAE aplica en todos los niveles geográficos (Zárate-Lomelí *et al.*, 2004).

Bajo esta perspectiva, la EAE permitirá introducir la variable ambiental en el mismo momento en que se elaboran los planes y programas que concretan las políticas de desarrollo, con lo que se podrá –desde un inicio– integrar las acciones necesarias para evitar las alteraciones ambientales que afectan a los arrecifes coralinos. Asimismo, la EAE permitirá evaluar los efectos ambientales de los PPP y proponer medidas y recomendaciones de manejo para integrar de forma efectiva las dimensiones ambientales en el diseño de los mismos y así diseñar sistemas de seguimiento a las medidas de manejo planteadas, permitiendo adoptar medidas complementarias, asegurando la sustentabilidad de los PPP y con ellas, asegurar la permanencia paralela de los arrecifes coralinos.

La importancia de la EAE como instrumento integrador y como herramienta para la toma de decisiones tiene los siguientes atributos (Zárate-Lomelí *et al.*, 2004):

- Permite integrar el concepto de sostenibilidad en la definición de los modelos de desarrollo.
- Permite integrar las variables ambientales en las primeras fases de los procesos de toma de decisión de manera que: a) se prevengan complicaciones innecesarias y retrasos en los proyectos, b) se consideren alternativas ambientales y técnicas viables que eviten medidas correctivas costosas y c) se reduzca la oposición pública en las fases de proyecto.
- Permite evaluar los impactos indirectos, acumulativos, sinérgicos y de gran escala (regional o transfronterizos) derivados de la multiplicidad de decisiones (proyectos).
- Permite valorar espacial (unidades ambientales naturales) y temporalmente los impactos indirectos, acumulativos y sinérgicos.
- Permite la consideración de alternativas.
- Permite considerar los impactos globales (cambio climático, efecto invernadero, biodiversidad, contaminación, etc.).
- Permite la integración ambiental con otros instrumentos (EIA, OE, ANP).
- Permite definir los diseños y localizaciones más adecuadas para determinados tipos de actuaciones y evaluar los efectos agregados de múltiples actividades y actuaciones al nivel más adecuado.
- Permite coordinar esfuerzos entre planificadores de distintos sectores y con diferentes perspectivas en torno a un mismo proceso de toma de decisión.
- Permite tomar decisiones informadas y con responsabilidad.
- La EAE añade transparencia, participación y control de calidad a los PPP.

Considerando lo anterior, la EAE a nivel internacional puede vislumbrarse como un instrumento de integración global que incluye las visiones locales y regionales, de manera que permita, no sólo la comprensión de los procesos en su conjunto, sino la integración de las acciones para lograr una efectiva reestructuración de los PPP en miras de estimular y conservar la resiliencia en los arrecifes coralinos.

## MANEJO INTEGRADO DE LA ZONA COSTERA (MIZC)

Desde hace algunos años, existen iniciativas regionales que han generado estrategias de Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) (Zárate-Lomelí *et al.*, 2001 y 2004), el cual es un instrumento que puede ser considerado como una de las estrategias actuales para mantener y estimular la resiliencia natural de los arrecifes. El MIZC, ha evolucionado de tal manera que a la fecha, se han propuesto ya, la generación de agendas puntuales de diagnóstico, atención y seguimiento de la zona costera con miras en la protección y manejo sustentable de los recursos naturales que ahí se desarrollan (Zárate-Lomelí *et al.*, 2001), esta iniciativa ha mostrado su valor al haber logrado conjuntar a los principales actores relacionados con el manejo, protección y conservación de la zona costera, así como a los tomadores de decisiones de regiones mexicanas muy importantes y representativas para la conservación de los arrecifes de coral tal como es

el Golfo de México y Mar Caribe; sin embargo, los resultados tangibles en las zonas costeras no se han consolidado por una falta de seguimiento de las autoridades correspondientes.

El MIZC tiene como objetivo fundamental preservar y proteger la productividad, biodiversidad y el funcionamiento básico de los ecosistemas costeros, a través de la estimulación de actividades económicas y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales; asimismo, pretende prevenir y revertir la contaminación y el deterioro de la zona costera desde las actividades desarrolladas en tierra a través de la restauración y rehabilitación de áreas, ecosistemas y procesos ecológicos críticos dañados; actividades fundamentales para mantener la resiliencia en los arrecifes coralinos.

Por otra parte, el manejo adecuado de las zonas costeras a través del MIZC, permitirá reducir la vulnerabilidad de los asentamientos humanos, infraestructura y actividades productivas ante los riesgos naturales, lo cual reduce los impactos ambientales que se generan con las contingencias humanas; así mismo promueve la integración y elaboración de políticas con consenso social para el desarrollo regional sustentable. De este modo, la implementación de acciones encaminadas al MIZC, permitirá la reducción de la fragmentación y pérdida de ecosistemas, cobertura vegetal, biodiversidad y suelos que el aumento de la frontera agropecuaria, urbana e industrial representa, con lo cual se revierten los procesos de contaminación de agua suelo y aire tanto en la zona costera como en la cuenca media y alta a ella asociada. El control del vertido de aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales y residuos sólidos urbanos e industriales entre otros ayuda a mantener la resiliencia en los arrecifes coralinos al permitirles invertir su energía en sus procesos de atención a los efectos del CCG en lugar de invertirlos en la atención a los daños locales ocasionados por estos elementos como son las enfermedades en los organismos constructores.

Por otro lado el MIZC prevé la sobreexplotación y agotamiento de recursos, las afectaciones a población, infraestructura y actividades económicas por fenómenos y riesgos naturales y los efectos de la erosión y acreción litoral por infraestructura portuaria/industrial y aumento en la frontera agropecuaria en las cuencas medias y altas, con lo que indudablemente, su instrumentación será un importante estímulo para la resiliencia de los arrecifes (Zárate-Lomelí *et al.*, 2001; Alafita-Vásquez *et al.*, 2008).

## **REDES DE ÁREAS MARINAS PROTEGIDAS (AMP)**

Considerando la importancia del acervo genético y evolutivo con el que actualmente cuentan los ecosistemas arrecifales, es extremadamente importante el desarrollo y fortalecimiento de Áreas Marinas Protegidas (AMP), que estén directamente vinculadas a la construcción de resiliencia de estos ecosistemas. Estas AMP, desde el punto de vista de su aplicación, pueden ser consideradas como estrategias de prevención que pertenecen a un nivel intermedio entre las visiones globales y locales. Las AMP, de manera ideal deberán trabajar localmente para conservar la resiliencia de sitios con características especiales a través de la integración de redes de AMP que desemboquen en efectos a nivel nacional e internacional (regional/global).

Para la consolidación de las AMP es necesario considerar que no es suficiente contar con zonas bajo algún régimen de protección, sino que los sitios a proteger deben ser ecológicamente significativos, por lo que maximizar la heterogeneidad física y biológica de dicha zona es crucial. Done (2001) describe “la configuración regional perfecta” de un AMP como aquella que contiene una biodiversidad regional apropiada. Asimismo se debe considerar que un área de cada tipo también podría ser insuficiente, ya que se requieren réplicas de hábitats en varias áreas protegidas, para que la pérdida de una sola reserva no implique la pérdida de uno de los hábitats protegidos (Hansen, 2003). Por ello, las redes de reservas están siendo reconocidas como una herramienta poderosa para la protección de ecosistemas marinos, cuyos principales atributos radican en que permiten una mayor cobertura a través de un gradiente de condiciones biogeográficas y oceanográficas, sin la complejidad social, política y económica de establecer una sola reserva de gran tamaño. Las redes también son más efectivas que reservas aisladas para mantener organismos que tienen mecanismos de dispersión a diferentes distancias, como ocurre con la flora y fauna marina puede tener intervalos que van de centímetros a miles de kilómetros (Shanks *et al.*, 2003). Las redes son más capaces de proveer poblaciones fuente para recolonizar áreas dañadas en otras reservas de la red, así como áreas fuera de las redes (Westmacott *et al.*, 2000). Finalmente, tienen la ventaja de crear reservas replicadas, dispersando el riesgo al incrementar la probabilidad de tener biodiversidad representativa, lo cual evitará la pérdida completa con un solo evento de daño.

Bajo este esquema, una red de AMP bien diseñada deberá conservar ambientes representativos que contengan suficiente heterogeneidad física y biológica para mantener una diversidad genética, en donde se pueda establecer medidas para reducir el efecto de ciertos factores de perturbación local, con la intención de conservar la resiliencia de los ecosistemas marinos. Desde un punto de vista evolutivo, mantener la diversidad genética es una medida de prevención para conservar la resiliencia natural de un ecosistema, ya que es incierto qué genes, características o especies podrían conferir una futura ventaja adaptativa ante los cambios globales (Hansen, 2003). Considerando lo anterior, el establecimiento de AMP permite mantener la diversidad natural de los ecosistemas y por tanto los “pools” de diversidad genética, lo cual es una medida precautoria para conservar la resiliencia de estos ambientes, ya que actualmente no es posible predecir con exactitud la forma en la que una localidad cambiará.

Por último, es importante resaltar que estas reservas requieren de un manejo efectivo e integrado, siendo indispensable evitar “áreas protegidas de papel” sin un funcionamiento real, como es posible encontrar en las zonas costeras de México.

## SITIOS DE CONSERVACIÓN ESTRICTA (SCE)

Una estrategia actual que está siendo ampliamente recomendada, es la protección de poblaciones o comunidades con alta resistencia y/o resiliencia, a través de la creación de sitios de conservación estricta (SCE). Esta estrategia es considerada como una medida de acción para el manejo de refugios climáticos que poseen alta estabilidad (Westmacott *et al.*, 2000; Done,

2001; Hansen, 2003), por tanto, es importante destinar esfuerzos a identificar sitios con características especiales, ya sea de ubicación geográfica o por factores endógenos, que las hacen menos susceptibles a los efectos del cambio climático.

Un ejemplo de lo anterior ocurre durante algunos eventos de blanqueamiento de coral que se originan por la exposición a la radiación ultravioleta causada por las altas temperaturas (Dunne y Brown, 2001), encontrando que las zooxantelas producen componentes llamados aminoácidos micosporinos (MAA por sus siglas en inglés) que tienen una acción similar a los bloqueadores solares, y que varían en concentración entre especies y poblaciones (Gleason, 1993). Siendo así, podría ser que algunas poblaciones tuvieran, de manera natural, una mayor concentración de MAA, o una mayor habilidad para inducir estos componentes en situaciones de estrés, lo cual las haría menos vulnerables al blanqueamiento. Incluso se ha planteado que tales factores endógenos pueden estar presentes en una población como resultado de eventos de sobrevivencia a eventos previos de blanqueamiento, siendo una preadaptación a este tipo de perturbación (West y Salm, 2003).

Bajo este esquema de protección, se busca tener un mayor control de las perturbaciones que pudieran afectar a escala local, tales como la sobrepesca, uso turístico, o encallamientos (Bryant *et al.*, 1998), para reducir el número de perturbaciones simultáneas que puedan generar impactos sinérgicos de mayor magnitud (McLusky *et al.*, 1986), y así proteger y fortalecer la resiliencia natural del sitio. De esta manera, se espera que los mecanismos naturales de respuesta que poseen las poblaciones y las comunidades sean capaces de operar procesos de adaptación al cambio climático.

Asimismo y en consideración de la importancia de la estrategia de conservación, es importante dedicar esfuerzos para la pronta identificación de sitios con alta resiliencia, en donde se deberán emplear acciones locales para manejar Sitios de Conservación Estricta (SCE), con la intención de proteger e incrementar su resiliencia, para fortalecer las características y mecanismos que puedan reforzarla e incluso incrementarla. Bajo este esquema de conservación, la premisa principal consiste en establecer mecanismos de control de aquellas perturbaciones que no son debidas al cambio climático global, para contribuir a mantener y mejorar la resiliencia de los arrecifes coralinos. De este modo, las medidas que se emplean a nivel local pueden lograr un mayor control de aquellos factores de riesgo que se consideran perjudiciales para proteger la resiliencia de lugares prioritarios.

## HERRAMIENTAS DE MANEJO

La estrategia de conservación de los arrecifes coralinos que se plantea ante el cambio climático global requiere de ciertas herramientas básicas para su implementación. En primer lugar es importante valorar en la justa medida el alcance de ciertos instrumentos de regulación y manejo, como la EIA y el OE, para lograr introducir la variable ambiental que oriente las políticas, programas y planes de desarrollo en las zonas y en las actividades que puedan afectar a los arrecifes. De manera simultánea, se requiere avanzar decididamente en la elaboración de

diagnósticos para conocer la situación actual de los ambientes naturales, para lo cual resulta crucial la intervención del sector académico a través del juicio de los expertos, quienes cuentan con información sobre su estructura y función, o pueden dictar líneas de investigación para la generación de dicho conocimiento. A la par de estos diagnósticos se deben elaborar protocolos de monitoreo para conocer mejor el sistema, permitiendo la detección de cambios para evaluar su significancia, de modo que contribuya a la toma de decisiones, tanto de desarrollo como de conservación, lo cual dará como resultado una evaluación constante de la eficiencia de las medidas aplicadas. Este conocimiento, también permitirá reconocer sitios que hayan sido dramáticamente degradados, pero que mantienen importancia ecológica, para enfocar esfuerzos en su restauración para recuperar su estructura y función básicas. En este sentido, se considera que sitios que son impactados por encallamiento de embarcaciones o por la acción de tormentas y huracanes son buenos candidatos a ser restaurados, ya que el factor de perturbación que ocasionó el daño fue puntual y no persiste en el tiempo, por lo que existe mayor probabilidad de restablecimiento. En este proceso también es fundamental identificar sitios que probadamente poseen alta resiliencia, en donde se deberán implementar esquemas de protección y conservación estricta.

Finalmente, dada la incertidumbre sobre el origen exacto de los impactos y de las respuestas de los arrecifes al cambio climático, se requiere aplicar un Manejo Adaptativo (Walters, 1986) que permita responder de manera pronta y eficiente ante los cambios que se presentan actualmente y los que potencialmente existirán en el futuro, empleando así una estrategia experimental para valorar su efectividad. Esto obliga a mantener una evaluación constante del éxito de diferentes alternativas de manejo, lo que permite ajustes de acuerdo a la disponibilidad de nueva información (Tompkins, 2002). No obstante, independientemente de la estrategia de manejo que sea implementada, el monitoreo es un elemento esencial para garantizar que las acciones son correctas y efectivas. De esta manera, el monitoreo vinculado al manejo adaptativo establece un experimento "*in situ*" que provee datos para modificar las acciones implementadas y desarrollar una mejor estrategia de manejo.

## PRINCIPIOS PARA IMPLEMENTAR LA ESTRATEGIA

Ante la situación global del cambio climático es importante tener presente que el éxito de una estrategia para conservar los arrecifes de nuestro país está en función de la medida en que los manejadores de recursos y los tomadores de decisiones impulsen de manera formal el tipo de iniciativas que en este capítulo se han discutido, en plazos que permitan alcanzar objetivos tangibles y con resultados inmediatos. En primera instancia, es importante contar con la participación decidida de los manejadores de recursos y comunidades locales, quienes deben estar bien informados y con suficiente nivel de conocimiento sobre sus sistemas en relación al cambio climático. Posteriormente es necesario involucrar a los diferentes actores en el proceso de construir resiliencia para los arrecifes, ya que mucha de la perturbación es originada por el uso de los recursos dentro y fuera de las áreas protegidas. Una vez logrado este nivel de conciencia

y participación se requiere implementar distintos niveles de protección y establecer sitios de conservación estricta para delimitar el desarrollo y el uso de los arrecifes como recurso, para lo cual es necesario que los actores sean parte del proceso para definir este nuevo nivel de protección y entender el beneficio que para ellos representa. Finalmente, el cambio climático es una amenaza que no se puede resolver en el corto plazo, por lo que los sistemas necesitan ser resilientes por décadas, ya que el efecto será más severo si el cambio climático sigue en aumento (Hansen, 2003).

En resumen, la estrategia de manejo de los arrecifes de coral ante el cambio climático global consiste en ganar tiempo para los ecosistemas, permitiendo que sus mecanismos de respuesta, adaptación, aclimatación y eventualmente de selección natural y evolución operen. En este sentido, la estrategia de preservar la resiliencia de los arrecifes coralinos está mostrando ya resultados positivos, encontrando ejemplos concluyentes como los publicados este año por Díaz-Pulido *et al.* (2009), en los que un arrecife resiliente logró revertir procesos de blanqueamiento y sobrecrecimiento algal en un período de tiempo menor a un año, a través de implementar ciertos mecanismos ecológicos de recuperación, regeneración y competencia. Sin embargo, no hay que perder de vista que es necesario hacer esfuerzos por estabilizar los efectos del cambio climático, ya que incluso, la estrategia mejor diseñada para incrementar la resistencia y resiliencia de los arrecifes coralinos ante el cambio climático funcionará por un momento si este no se logra detener (Hansen y Biringer, 2003).

De igual modo, es importante resaltar que todas las herramientas de manejo podrían ser de gran utilidad siempre que obedecieran a un proceso de integración de las mismas, es decir, el manejo integrado de los recursos es una de las principales herramientas de conservación y estimulación de la resiliencia, toda vez que no solo permite la protección y conservación del recurso en sí, sino que regula los factores de riesgo locales y regionales y prevé las estrategias necesarias para el aprovechamiento sustentable. De esta manera, las estrategias de manejo para la protección y conservación de los arrecifes coralinos, su resistencia y su resiliencia, deberán integrarse a estructuras operativas más grandes y complejas que permitan obtener resultados tangibles en múltiples sectores y diferentes escalas geográficas.

## LITERATURA CITADA

- Alafita-Vásquez H., D. Zárate-Lomelí, y J. L. Rojas-Galaviz, 2008. Diagnóstico Ambiental de la Zona Costera de Quintana Roo: Problemas y Necesidades para su Manejo Integrado. Quintana Roo, México. Memorias del Panel de Expertos en Manejo Integrado de Zona Costera.
- Bak R. P. M., y S.R. Criens, 1981. Survival after fragmentation of colonies of *Madracis miriabilis*, *Acropora palmata* and *A. cervicornis* (Scleractinia) and the subsequent impact of a coral disease. *Manila. Proc. 4th. Int. Coral Reef Symp* 1981; 2:221-227.
- Babcock R. C., y A.J. Heyward, 1986. Larval development of certain gamete-spawning scleractinian corals. *Coral Reefs*, 5:111-116.
- Baker A. C., 2001. Reef corals bleach to survive change. *Nature*, 411:765-766.

- Baker A. C., C. J. Starger, T. R. McClanahan, y P. W. Glynn, 2004. Corals' adaptive response to climate change. *Nature*, 430:742.
- Begon M., J. L. Harper, y C. R. Townsend, 1990. Ecology: Individuals, Populations and Communities. Boston: Blackwell Scientific Publications 2<sup>nd</sup> Ed. 945 p.
- Bellwood D. R., T.P. Hughes, C. Folke, y M. Nystrom, 2004. Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429(6994):827-833.
- Bellwood D. R., A. S. Hoey, J. L. Ackerman, y M. Depczynski, 2006. Coral bleaching, reef fish community phase shifts and the resilience of coral reefs. *Global Change Biology*, 12(9):1587-1594.
- Berkelmans R., y J.K. Oliver, 1990. Large scale bleaching of corals on the Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 18:55-60
- Bothwell A. M., 1981. Fragmentation, a means of asexual reproduction and dispersal in the coral genus *Acropora* (Scleractinia: Astrocoeniida: Acroporidae) a preliminary report. Manila. *Proc. 4th Int. Coral Reef Symp*, 2:137-144.
- Brown B. E., R. P. Dunne, M.S. Goodson, y A.E. Douglas, 2000. Bleaching patterns in reef corals. *Nature*, 404, 142-143
- Bryant D., L., Burke, J. W. McManus, y M. Spalding, 1998. Reefs at Risk. WRI. p. 60.
- Buddemeier R. W., y D.G. Fautin, 1993. Coral bleaching as an adaptive mechanism – A testable hypothesis. *BioScience*, 43:320-326.
- Buddemeier R. W., J.A. Kleypas, y R.B. Aronson, 2004. Coral reefs and global climate change: Potential contributions of climate change to stresses on coral reef ecosystems. Pew Centre for Global Climate Change. 33 p.
- Calderón-Aguilera L. E., H. Reyes-Bonilla, y J.D. Carriquiry, 2007. El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: estudios en el Pacífico mexicano. En: B. Hernández-de la Torre & G.Gaxiola-Castro(eds.). Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México. México. Semarnat, INE, CICESE..
- Carlson D. B., y R.R. Olson, 1993. Larval dispersal distance as an explanation for adult spatial pattern in two Caribbean reef corals. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 173:247-263.
- Chia F. S., J. Buckland-Nicks, y C.M. Young, 1984. Locomotion of marine invertebrate larvae: A review. *Canadian Journal of Zoology*, 62:1205-1222.
- Connell, J. H., 1978. Diversity in tropical rain forest and coral reefs. *Science*, 199:1302-1310.
- Diaz-Pulido G., L.J. McCook, S. Dove, R. Berkelmans, G. Roff, *et al.*, 2009. Doom and boom on a resilient reef: climate change, algal overgrowth and coral recovery. *PLoS ONE*; 4(4):e5239.
- Done, T. J., 2001. Scientific principles for establishing MPAs to alleviate coral bleaching and promote recovery. En: R.V. Salm and S. L. Coles (eds). Coral Bleaching and Marine Protected Areas. Proceedings of the Workshop on Mitigating Coral Bleaching Impact Through MPA Design. Honolulu, Hawaii U.S.A: Bishop Museum. Asia Pacific Coastal Marine Program Report # 0102, The Nature Conservancy. p.118. Disponible en: <http://data.aims.gov.au/extpubs/attachmentDownload?docID=969>
- Dunne, R. P., y B. E. Brown, 2001. The influence of solar radiation on bleaching of shallow water reef corals in the Andaman Sea, 1993-1998. *Coral Reefs*, 20:201-210.
- Esslemont G., 1999. Heavy metals in corals from Heron Island and Darwin Harbour, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 38:1051-1054.

- Fabricius K., J.C. Mieog, P.L. Colin, D. Idip, y M.J.H. van Oppen, 2004. Identity and diversity of coral endosymbionts (zooxanthellae) from three Palauan reefs with contrasting bleaching, temperature and shading histories. *Mol Ecol.*, 13: 2445–2458.
- Fadlallah, Y. H., 1983. Sexual reproduction, development and larval biology in scleractinian corals. *Coral Reefs*, 2:129-150.
- Fine M., y D. Tchernov, 2007. Scleractinian coral species survive and recover from decalcification. *Science*, 315:1811.
- Gardner T. A., I. M. Côté, J. A. Gill, A. Grant, y A.R. Watkinson, 2003. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, 301:958–960.
- Gattuso J.P., M. Frankignoulle, I. Bourge, S. Romaine, y R. W. Buddemeier, 1998. Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Global Planet Change*, 18:37–46.
- Gleason D. F., 1993. Differential effects of ultraviolet radiation on green and brown morphs of the Caribbean coral *Porites astreoides*. *Limnology and Oceanography*, 38:1452-1463.
- Glynn P. W., 1988. Predation on coral reefs: some key process, concepts and research directions. *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Coral Reef Symp.*, 1:51-62
- Goreau T. F., N. I. Goreau, y T.J. Goreau, 1979. Corals and coral reefs. *Sci. Am.*, 241:124-135.
- Goreau T., T. McClanahan, R. Hayes, y A. Strong, 2000. Conservation of coral reefs after the 1998 global bleaching event. *Conservation Biology*, 14:5-15.
- Gray J. S., 1997. Report of the 28th Session of GESAMP. London: Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP).
- Grimsditch G. D., y R.V. Salm, 2006. Coral reef resilience and resistance to bleaching. Resilience Science Group Working Paper Series –No. 1. IUCN. 53 p.
- Guilcher A., 1988. Coral Reef Geomorphology. Chichester John Wiley and Sons Ltd. 228 p.
- Hansen L. J., 2003. Increasing the resistance and resilience of tropical marine ecosystems to climate change. p. 157-176. In: L.J. Hansen, J. L. Biringer, and J. R. Hoffman (eds.). A user's manual for building resistance and resilience to climate change in Natural Systems. WWF. 244 p.
- Hansen, L. J., y J.L. Biringer, 2003. Building resistance and resilience to climate change. p. 9-14. In: L. J. Hansen, J. L. Biringer and J. R. Hoffman (eds.). A user's manual for building resistance and resilience to climate change in Natural Systems. WWF. 244 p.
- Healthy Reefs Initiative, 2008. Libreta de calificaciones correspondiente al Sistema Arrecifal Mesoamericano: Una Evaluación de la salud del ecosistema. Disponible en: [www.healthyreefs.org](http://www.healthyreefs.org).
- Highsmith R. C., 1980. Passive colonization and asexual colony multiplication in the massive coral *Porites lutea*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol*, 47:55-67.
- Hughes T. P., A. H. Baird, D. R. Bellwood, M. Card, S. R. Connolly, C. Folke, R. Grosberg, O. Hoegh-Guldberg, J. B. C. Jackson, J. Kleypas, J. M. Lough, P. Marshall, M. Nyström, S. R. Palumbi, J. M. Pandolfi, B. Rosen, y J. Roughgarden, 2003. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 301:929- 933.
- Jones R., 2005. The ecotoxicological effects of Photosystem II herbicides on corals. *Marine Pollution Bulletin*, 51: 495–506
- Kleypas J. A., R. W. Buddemeier, D. Archer, J.P. Gattuso, C. Langdon, y B.N. Opdyke, 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 284:118-120.
- Knowlton N., 1992. Thresholds and multiple stable states in coral reef community dynamics. *American Zoologist*, 32:674-682.

- Lirman D. A., 2003. Simulation model of the population dynamics of the branching coral *Acropora palmata*. Effects of storm intensity and frequency. *Ecological Modelling*, 2(161)(3):167-180.
- Lipp K. E., L. J. Jarrell, D. W. Griffin, J. Lukask, J. Jacukiewicz, y B.R. Joan, 2002. Preliminary evidence for human fecal contamination in corals of the Florida Keys, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 7(44):666-670.
- Manzello D. P., M. Brandt, T. B. Smith, D. Lirman, J. C. Hendee, y R.S. Nemeth, 2007. Hurricanes benefit bleached corals. *Environmental Sciences*, 104(29):12035-12039
- Marshall P. A., y A.H. Baird, 2000. Bleaching of corals on the Great Barrier Reef: differential susceptibilities among taxa. *Coral Reefs*, 19:155-163.
- McField M., y P. Kramer-Richards, 2007. Healthy reefs for healthy people: a guide to indicators of reef health and social well-being in the Mesoamerican Reef Region. With contributions by M. Gorrez and M. McPherson. p. 208. Disponible en <http://www.healthyreefs.org/>
- McLusky D.S., V. Bryant, y R. Campbell, 1986. The effects of temperature and salinity on the toxicity of heavy metals to marine and estuarine invertebrates. *Oceanography & Marine Biology: An Annual Review*, 24:481-520.
- Merino M., 1997. Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems*, 13, 101-121.
- Mora C., 2008. A clear human footprint in the coral reefs of the Caribbean. *Proc Biol Sci.*, 275(1636):767-773.
- Mumby P.J., J. A. Edwards, J. E. Arias-Gonzalez, K. C. Lindeman, P.G. Blackwell, A. Gall, M.I. Gorczynska, A.R. Harborne, C.L. Pescod, H Renken, C.C.C. Wabnitz, y G. Llewellyn, 2004. Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature*, 427: 533-536.
- Nyström, M, C. Folke, y F. Moberg, 2000. Coral reef disturbance and resilience in a human-dominated environment. *Trends in Ecology and Evolution*, 15:413-417.
- Nyström M., & C. Folke, 2001. Spatial resilience of coral reefs. *Ecosystems*, 4:406-417.
- Obura, D. O., 2005. Resilience and climate change: lessons from coral reefs and bleaching in the Western Indian Ocean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science: Science for management in the Western Indian Ocean*, 63: 353-372.
- Padilla C., 2000. Evaluación del potencial de uso sustentable del coral negro en Isla Cozumel y parte sur de Quintana Roo. México: Reporte técnico. CRIP Puerto Morelos. INP/FMCM. p.70.
- Palumbi S. R., K. L. McLeod, y D. Grünbaum, 2008. Ecosystem in action: lessons from marine ecology about recovery, resistance, and reversibility. *BioScience*, 58(1):33-42.
- Pikitch E., C. Santora, E. Babcock, A. Bakun, R. Bonfil, D. Conover, P. Dayton, P. Doukakis, D. Fluharty, B. Heneman, *et al.*, 2004. Ecosystem-based fishery management. *Science*, 305:346-347.
- Richmond R. H., 1993. Coral reefs: present problems and future concerns resulting from anthropogenic disturbance. *American Zoologist*, 33:524-536.
- Rouphael, A. B., y G.J. Inglis, 2000. Take only photographs and leave only footprints?: An experimental study of the impacts of underwater photographers on coral reef dive sites. *Biological Conservation*, 100:281-287.
- Sadler B., y R. Verheem, 1996. Strategic environmental assessment: status, challenges and future directions. Report no. 53. The Hague. The Netherlands: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment.

- Salm R. V., y S. L. Coles (eds.), 2001. Coral Bleaching and Marine Protected Areas. Proceedings of the Workshop on Mitigating Coral Bleaching Impact Through MPA Design, Bishop Museum. Asia Pacific Coastal Marine Program Report no. 0102. Honolulu, Hawaii, USA. The Nature Conservancy. p. 29-31.
- Salm R. V., S. E. Smith, y G. Llewellyn, 2001. Mitigating the impact of coral bleaching through Marine Protected Area design. p. 81-88. *In*: H.Z. Schuttenberg (ed). Coral bleaching: Causes, consequences and response. University of Rhode Island. Disponible en: <http://data.aims.gov.au/extpubs/attachmentDownload?docID=969>
- Samaniego J. (coord.), 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Naciones Unidas. p.148.
- Schuhmacher H., y H. Zibrowius, 1985. What is hermatypic? A redefinition of ecological groups in corals and other organisms. *Coral Reefs*, 4:1-9.
- Shanks A. L., B. A. Grantham, y M. H. Carr, 2003. Propagule dispersal distance and the size and spacing of marine reserves. *Ecological Applications*, 13(1):S159-S169
- Tompkins E., 2002. Desarrollo de resiliencia al cambio climático por medio del manejo adaptativo de los recursos naturales. Trabajo de seminario 10. En: PNUD. Un enfoque de manejo de riesgo climático para la reducción de desastres y adaptación al cambio climático. La Habana, Cuba: Caribbean Risk Reunión del Grupo de Expertos del PNUD: Integración de la reducción de desastres con la adaptación al cambio climático. Management Initiative (CRMI). Disponible en: [www.undp.org/crmi/es/files/docs/10.pdf](http://www.undp.org/crmi/es/files/docs/10.pdf).
- Villaescusa J. A., y J.D. Carriquiry, 2004. Calibración de los paleotermómetros de Sr/Ca y Mg/Ca en el coral *Porites* sp. de Islas San Benedicto, Archipiélago Revillagigedo, México. *Ciencias Marinas*, 30(4):603-618.
- Walters C., 1986. Adaptive Management of Renewable Resources. New York: The Blackburn Press. Macmillan. 374 p.
- Wells J. W., 1954. Recent corals of the Marshall Islands. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 260: 385-486.
- West J. M., y R. V. Salm, 2003. Resistance and resilience to coral bleaching: Implications for coral reef conservation and management. *Conservation Biology*, 17(4):956-967
- Westmacott, S., K. Telekia, S. Wells, y J. West, 2000. Management of bleached and severely damaged coral reefs. Cambridge. IUCN. 36 p.
- Yáñez-Arancibia A., D. Zárate, y V.S. Fandiño, 1996. La evaluación del impacto ambiental en la región del Gran Caribe. p. 587-604. En: A.V. Botello *et. al.* (eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. México. EPOMEX Serie Científica 6. Universidad Autónoma de Campeche. 666 p.
- Zakai D., y N.E. Chadwick-Furman, 2002. Impacts of intensive recreational diving on reef corals at Eilat, northern Red Sea. *Biol Conserv.*, 105:179-187.
- Zárate-Lomelí D., A. Yáñez-Arancibia, R. T. Lacy, A.A. Martínez, H. Alafita-Vásquez, E. Rivera-Arriaga, y J. W. Day, 2001. Términos de Referencia para el Programa de Manejo Integral de la Zona Costera del Golfo de México y Caribe. Xalapa, Veracruz: Segundo Panel: Necesidades para la Gestión Integrada de la Zona Costera.
- Zárate-Lomelí D., J.L. Rojas-Galaviz, y H. Alafita-Vásquez, 2004. Importancia de la Evaluación Ambiental Estratégica para México. Taller: "Situación Actual y perspectivas de la Evaluación de Impacto Ambiental". México D. F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.



De la Lanza Espino, G., J.C. Gómez Rojas, M. Blanco y Correa, F. Flores Verdugo y S. Hernández Pulido, 2010. Vulnerabilidad costera: caso de estudio del sistema de humedales Marismas Nacionales, p. 205-230. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Vulnerabilidad costera: caso de estudio del sistema de humedales Marismas Nacionales

*Guadalupe de la Lanza Espino, Juan Carlos Gómez Rojas, Manuel Blanco y Correa,  
Francisco Flores Verdugo y Salvador Hernández Pulido*

---

## RESUMEN

Dada la complejidad de la zona costera, no solo por ser una zona de transición entre la terrestre y la marina en la que se dejan sentir efectos naturales de ambos ambientes; a lo anterior, hay que sumarle las diversas actividades antrópicas y el actual incremento del nivel del mar consecuencia del cambio climático, cuyo resultado es el alto grado de vulnerabilidad a la que se ve sometida actualmente. Bajo este panorama es necesario realizar estudios holísticos para su conservación y posible manejo, requiriendo información de diferentes fuentes ya sean científicas u oficiales que incluyan geología, física costera, hidrología y clima, fisicoquímica o calidad del agua, biología que permitan la comprensión del comportamiento natural del ecosistema costero, más aquellas actividades socioeconómicas que permitirían a su vez definir los cambios e impactos a que es sujeto tanto reversible como irreversiblemente. El estudio de caso que aquí se presenta es el Sistema Lagunar Marismas Nacionales cuya evolución geohidrológica, uso del suelo agrícola y pecuario, manejo costero como apertura de canales con la consecuente salinización por la intromisión del mar y muerte de manglares, deforestación, sobrepesca y acuicultura, incremento de las poblaciones en vías fluviales y lagunares, deterioro en la calidad del agua, que conjuntamente han llevado a Marismas Nacionales a ser considerada como un área en un grado de deterioro de medio a alto.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de humedales costeros de Marismas Nacionales son los más importantes del Pacífico por su extensión. Están formados por una red de lagunas costeras salobres, manglares, pantanos, marismas, más de 150 000 ha de canales de mareas y llanuras de inundación. Desembocan en este sistema los ríos Baluarte, Las Cañas, Acaponeta, San Francisco, Rosamorada, Bejuco, San Pedro y Santiago con una superficie total de las cuencas de 161 515 km<sup>2</sup> sin considerar al Baluarte y San Francisco. Comprende una superficie aproximada de 248 mil ha, abarca desde Escuinapa (sur de Sinaloa) hasta el sur de San Blas, Nayarit. Declarado como sitio Ramsar número 732, en junio de 1995, reconocido como sitio de las Reservas de la Red Hemisférica de Aves Playeras, además de incluirse en el Programa de Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA por su nombre en español), y en 1998 se identificó y decretó como sitio AICA.

Con base en un estudio realizado por la el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) (2009), en la zona de Marismas Nacionales se encuentra principalmente manglar, vegetación halófila y tular. Las distribuciones de manglar y la vegetación halófila responden claramente a un régimen hidráulico de inundación, siendo por tanto las formaciones vegetales más importantes.

Actualmente existe en proyecto el decreto para establecer como Área Natural Protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera a Marismas Nacionales Nayarit, en los municipios de Acaponeta, Rosamorada, Santiago Ixcuintla, Tecuala y Tuxpan. El proyecto establece a la letra:

Se declara área natural protegida, con la categoría el carácter de Reserva de la Biosfera la región conocida como Marismas Nacionales Nayarit, con una superficie total de 133 854 mil hectáreas, dentro de la cual se ubican dos zonas núcleo con una superficie total de 1 208 hectáreas y 132 645 hectáreas correspondientes a la zona de amortiguamiento. Los objetivos que persigue el anteproyecto son: • Preservar los ambientes naturales representativos de las regiones biogeográficas y ecológicas de los ecosistemas más frágiles, para asegurar el equilibrio y la continuidad de los procesos evolutivos ecológicos, en la ANP • Asegurar la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del área • Preservar las especies bajo algún estatus de riesgo. • Proporcionar un campo propicio para la investigación científica. • Proteger el ciclo hidrológico de cuencas. • Establecer la zonación y subzonación, para ordenar el territorio en función del grado de conservación y representatividad de sus ecosistemas, la vocación natural del terreno, de uso actual y potencial. • Preservar el ecosistema y salvaguardar la diversidad genética de las especies silvestres, en particular de las que se encuentran en peligro de extinción, amenazadas, o sujetas a protección especial, así como las endémicas, por medio de la implementación de programas de protección y manejo ambiental, el aprovechamiento de los recursos para las generaciones futuras, y lograr un desarrollo económico y social para los habitantes de la región, a través de acciones que promuevan y orienten el desarrollo sustentable de las actividades económicas, basadas en el aprovechamiento de los recursos naturales del área, para mejorar la calidad de vida de sus pobladores. (Conanp, 2009).

Para la protección del manglar, se establece en el Artículo 60 de la Ley General de la Vida Silvestre lo siguiente “Queda prohibida la remoción, relleno, trasplante, poda o cualquier otra actividad que afecte la integralidad del flujo hidrológico del manglar, del ecosistema y su zona de influencia; de su productividad natural; de la capacidad de carga natural del ecosistema para los proyectos turísticos; de las zonas de nidación, reproducción, refugio, alimentación y alevinaje; o bien de las interacciones entre el manglar, los ríos, la duna, la zona marítima adyacente y los corales, o que provoque cambios en las características y servicios ecológicos” (DOF, 2007).

Además Marismas Nacionales es importante por tener una fauna diversa con un número considerable de especies endémicas, migratorias, en peligro de extinción y de importancia económica.

El sistema de humedales de Marismas Nacionales se encuentra entre las coordenadas extremas aproximadas 21°53'99" al norte, 20°36' al sur, 103°43' al este, y 105°46' al oeste. Cubre el sistema lagunar Las Cabras-Tecapán-Agua Brava-Mexcaltitán-San Blas, pertenece a la provincia fisiográfica denominada Planicie Costera Nayarita con una superficie de total de 25 600 m. La amplitud de la planicie es en promedio 59.5 km (a partir de la línea de costa y hasta los 200 msnm) configurando una morfología compleja.

## GEOLOGÍA

Marismas Nacionales está conformado por canales de marea, llanuras de inundación, lagunas y manglar que han sido resultado de un amplio sistema de deltas entre las cuencas con una historia y evolución geológicas muy activas así como una particular dinámica marina, además de un patrón climático interanual cambiante. Las características geomorfológicas de la planicie costera han sido consecuencia de dicha dinámica hidrológica; las variaciones en los gastos de los seis ríos que han determinado la magnitud del aporte del material suspendido, que ha incidido en el desarrollo de los deltas y otras formas topográficas. Los ríos que desembocaban a la llanura formaron múltiples cordones de playa que aislaron un alto número de cuerpos de agua. Durante el descenso del nivel del mar se favoreció la existencia de condiciones palustres donde ha crecido un denso manglar. Cabe señalar que durante las trasgresiones y regresiones del mar en un periodo de 7 000 años los deltas han experimentado cambios, que actualmente se han acelerado por el represamiento de los ríos con una visible erosión, como es el caso de la presa Aguamilpa en el río Santiago, donde se aceleraría la erosión en caso de represar el río San Pedro.

## HIDROLOGÍA

### CUENCAS Y SUBCUENCAS

El sistema lagunar de Agua Brava-Mexcaltitán está constituido por tres cuencas: la del río Acajoneta con las subcuencas: Cañas, San Francisco, Rosamorada y Bejuco; la del río San Pedro

Mezquital con ocho subcuencas de las cuales, la del río San Pedro se localiza en la parte baja del sistema lagunar y la del río Santiago que comprende tres subcuencas: la del río Lerma, la del lago Chapala y la del río Santiago, esta última en el estado de Nayarit.

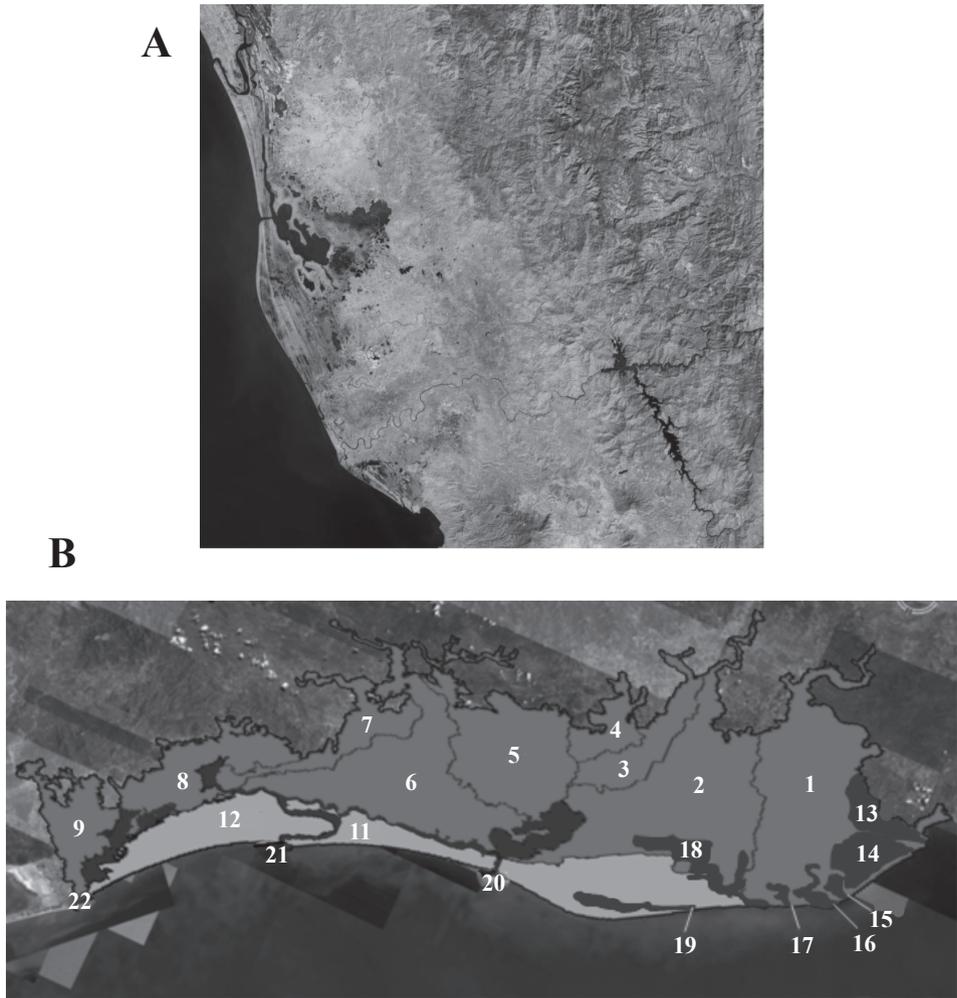
Con base en un criterio hidrológico mixto, es decir considerando las cuencas hidrológicas superficiales, Blanco y Correa (inédito), reconoce nueve cuencas hidrológicas bajas continentales (ríos Santiago, San Pedro, Bejuco, Rosamorada, San Francisco, Acaponeta, Las Cañas, Escuinapa y Baluarte) y tres cuencas hidrológicas locales (considerando solo precipitación: Las Haciendas, Novillero y Teacapán). Además, subdivide las cuencas anteriores de acuerdo a las 10 cuencas mareales que reciben y descargan flujos de marea procedentes del mar a través de bocas marinas (Bocas de El Borrego, San Blas, Cegada, El Asadero, Los Corchos, Camichín-Talegas, El Colorado, Cuautla, Teacapán y Chametla) (figura 1). La regionalización resultante pretende ser una base para avanzar en la comprensión de una dinámica hidrológica conjunta integrada del complejo sistema de humedales en forma integrada y sistémica.

El volumen de escurrimiento medio anual del río Santiago era de 7 000 millones  $m^3$  antes de la construcción de la Presa Aguamilpa, el del río San Pedro de 2 800 millones  $m^3$  y el del río Acaponeta de 1 340 millones de  $m^3$ ; considerados como permanentes que son los principales afluentes al sistema lagunar; además vierten sus aguas los ríos Cañas, San Francisco, Bejuco y Rosamorada que sólo son significativos en periodo de lluvias. Los tres primeros ríos en ocasiones pueden alcanzar máximos escurrimientos debido a la presencia de huracanes y a eventos como los fenómenos de La Niña o El Niño en sus grados más altos; éstos pueden influir directa o indirecta sobre la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes, que se presentan principalmente entre los meses de mayo a octubre, con una mayor incidencia en septiembre. En un periodo de registro de varias décadas, los principales ríos muestran escurrimientos ampliamente variables debidos a lo ya señalado, como se muestra en las figuras 2, 3 y 4.

Cabe señalar que con base en el hidrograma de 1962 al 2001 del río San Pedro, se observa una tendencia a la disminución del escurrimiento que es más notoria en el hidrograma de 1962 al 2006, por lo que ésto debe ser considerado, para futuros manejos hidráulicos (figura 3).

Con base en la información de Conagua (2006) se destaca la tendencia al decremento del escurrimiento en un lapso de siete décadas en los ríos Acaponeta (con una disminución de ocho millones de  $m^3$  en siete décadas) y San Pedro (con una diferencia de 3.4 millones de  $m^3$  en dicho lapso) (figura 2), si se considera que estos ríos aún no han sido represados dentro del estado de Nayarit, y que representan 63% del escurrimiento superficial que recibe la zona actualmente.

Se observa una variación anual aproximadamente similar entre los tres ríos consecuencia de máximas avenidas por eventos meteorológicos diversos. Los registros de la estación hidrométrica Capomal ubicada aguas abajo de la Presa Aguamilpa señalan una marcada tendencia a la disminución del escurrimiento del río Santiago de 102  $Mm^3$  durante 50 años (figura 4).



**Cuencas bajas:** 1. R. Santiago; 2. San Pedro; 3. R. Bejuco; 4. R. Rosamorada; 5. R. San Francisco; 6. Acaponeta; 7. R. Las Cañas; 8. R. Escuinapa y 9. R. Baluarte.  
**Cuencas locales:** 10. Las Haciendas; 11. Novillero; 12. Teacapán.  
**Cuencas mareales:** 13. San Cristóbal; 14. EL Pozo-El Rey; 15. Boca Cegada; 16. Boca del Asadero; 17. Boca de los Corchos; 18. Boca de Camichín-Boca de Talegas; 19. Boca de El Colorado; 20. Boca de Cuautla; 21. Boca de Teacapán; 22. Boca de Chametla.  
(Según M. Blanco y Correa, inédito)

**Figura 1.** (A) Zona de humedales de Marismas Nacionales.  
(tomado de <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl>)  
(B) y su regionalización morfológica-hidrográfica (Tomado de Blanco y Correa inédito).

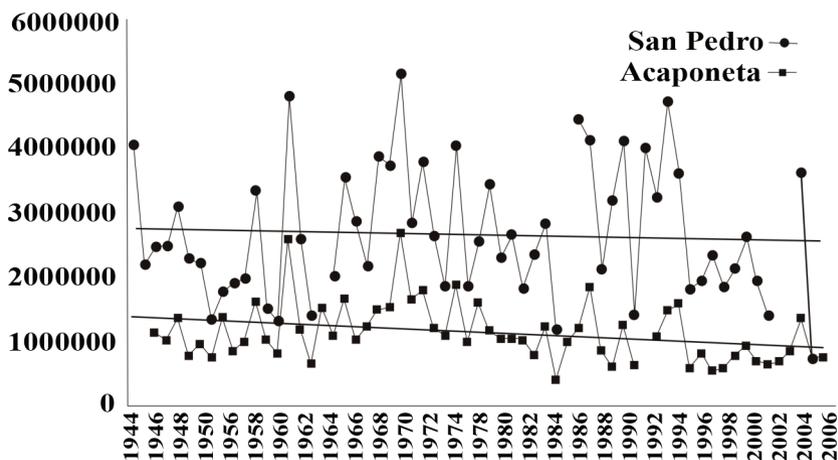


Figura 2. Escurrecimientos de los ríos Acaponeta y San Pedro y su tendencia. Base de datos de Conagua (2006).

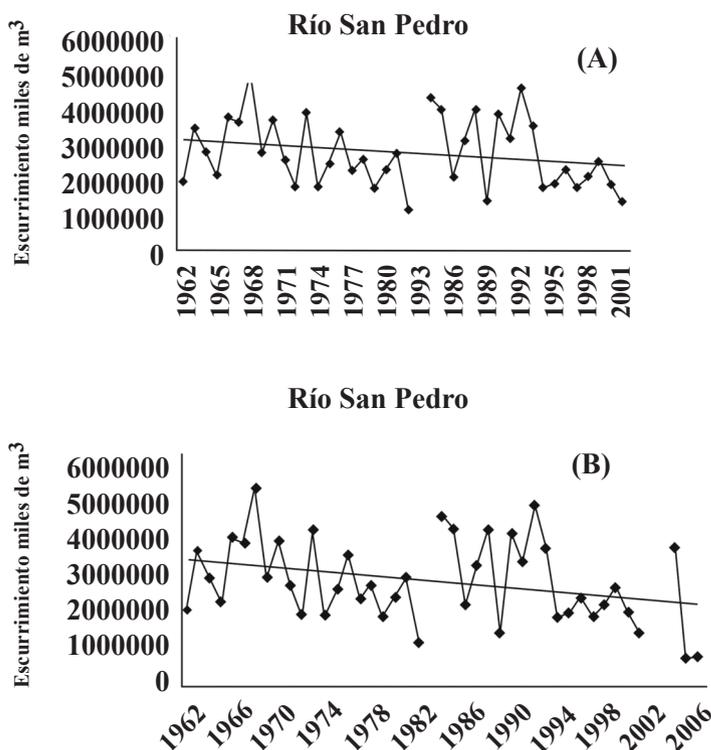
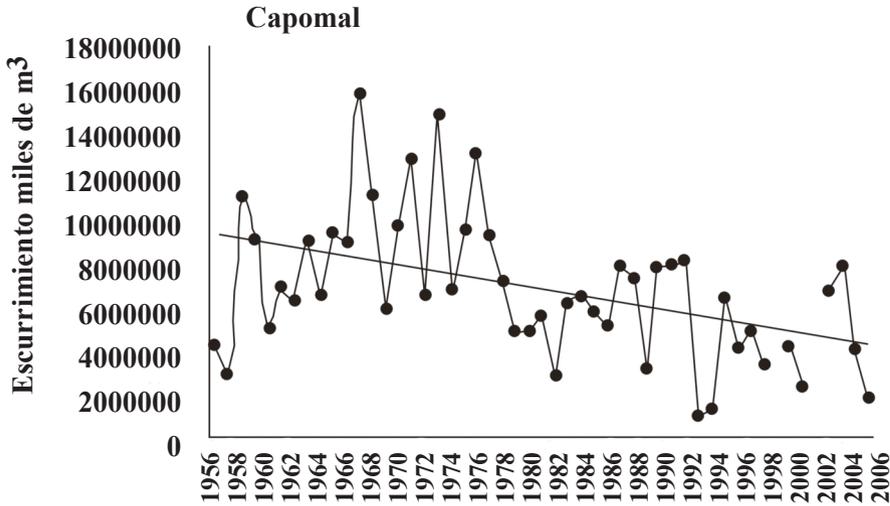


Figura 3. (A) Hidrograma del río San Pedro en su parte baja en 1962-2001 y (B) de 1962 a 2006 en la estación San Pedro. Base de datos de Conagua (2006).



**Figura 4.** Ecurrimiento del río Santiago, estación Capomal.  
Base de datos de Conagua (2006).

## METEOROLOGÍA

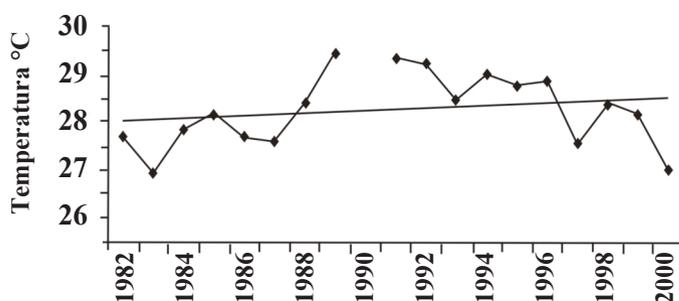
Este ambiente lagunar se encuentra influenciado por eventos como tormentas, huracanes y lluvias monzónicas de verano. La mayoría de las perturbaciones pasan paralelas a las costas del Pacífico Tropical Mexicano y otras más entran tierra adentro (Nayarit y Sinaloa). Según la Conagua en un periodo de 36 años (1976 al 2006) aproximadamente, 12 huracanes afectaron al estado de Nayarit, (Gómez-Rojas, 2009; Gómez-Rojas, 2010). Entre las tormentas tropicales que han influenciado a Nayarit y que se pueden señalar están: Olaf en el 2003, Diana en 1990, Adolph en 1983, Otis en 1981 y Priscila en 1971; dentro de los principales huracanes: Rosa en 1994, Kenna en 2002, Juliette en 2001, Hernán en 1996, Boris en 1996, Roslyn en 1986 y Tico en 1983; sin contar los que han incidido en 2007, 2008 y 2009; sin embargo estos meteoros pueden sinergizar la erosión de la costa en conjunto con las actividades antropogénicas. Tanto estos eventos como las lluvias de verano condicionan amplias áreas de inundación que son necesarias para el establecimiento del manglar. Fenómenos eventuales como El Niño y La Niña, también inciden en la costa de Nayarit; por ejemplo, El Niño 1982-83, produjo en el primer año escasas lluvias y en el segundo se alcanzaron máximas precipitaciones; aunque, con base en los registros de la NOAA y la base de datos de Conagua se observa una mayor asociación entre la mayor frecuencia de tormentas tropicales y huracanes con El Niño, y en el caso de La Niña los mayores escurrimientos. Otro aspecto meteorológico es la variación interanual en los gastos y en las precipitaciones; en los cuatro ríos que descargan en Teacapán-Agua Brava se presentan dos años de lluvias y gastos por debajo del promedio seguidos por un año arriba del promedio.

## TEMPERATURA

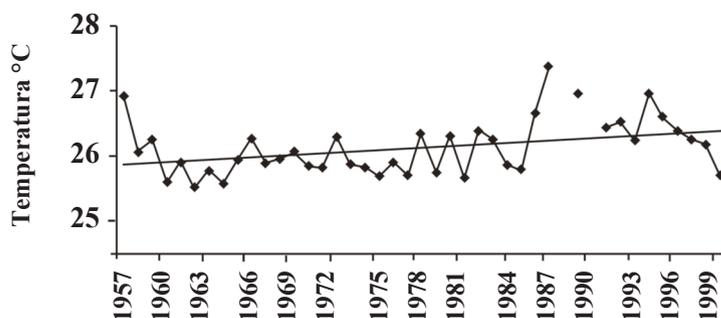
Considerando que la temperatura es un factor determinante en la precipitación y evaporación, los registros históricos térmicos (CNA, 2006) señalan una tendencia al incremento en un periodo de 20 a 30 años, aproximadamente, que manifiesta el cambio climático, como se observa en cuatro estaciones climatológicas localizadas en la cuenca del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-La Hacienda. En la estación El Naranjo (cuenca San Pedro) el incremento de temperatura ha sido de 0.1°C (figura 5), en Tuxpan (cuenca del San Pedro) 0.5° (figura 6), Rosamorada (cuenca Acaponeta) 0.9° (figura 7) y en la del Palmar de Cuautla de 0.7°C (figura 8).

## PRECIPITACIÓN

Cabe señalar que los registros de temperatura y precipitación en las estaciones climatológicas no son coincidentes por problemas técnicos; razón por la cual se representan para la precipitación localidades distintas a las de los registros de temperatura. Existe una amplia variación



**Figura 5.** Promedio anual de la temperatura en la estación climatología El Naranjo. Base de datos de Conagua (2006).



**Figura 6.** Promedio anual de la temperatura en la estación climatología Rosamorada. Base de datos de Conagua (2006).

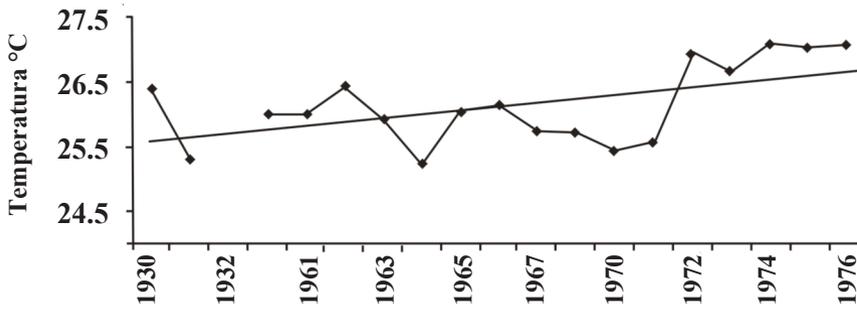


Figura 7. Promedio anual de la temperatura en la estación climatología de Tuxpan.

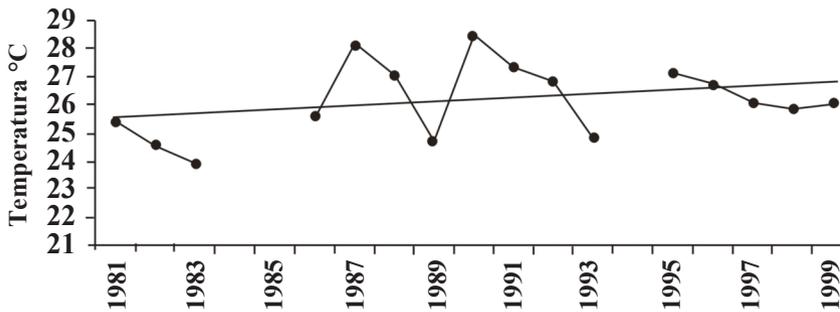


Figura 8. Promedio anual de la temperatura en la estación climatología El Palmar de Cautla (Las Haciendas). Base de datos de Conagua (2006).

interanual en la precipitación en el Pacífico y al respecto Xu *et al.* (2005) señalan que en el Pacífico Asiático se han encontrado que las variaciones en precipitación responden a los periodos de los eventos La Niña y El Niño, lo que puede ser aplicado al Pacífico Tropical Mexicano (Gallegos *et al.*, 1984).

Tanto la localidad de Acajoneta como de Rosamorada, muestran una tendencia a la disminución de la precipitación en aproximadamente 40 años (figuras 9 y 10). Al respecto Méndez-González *et al.* (2008) señalan una tendencia generalizada de la disminución de lluvias en el país; el mayor porcentaje al incremento de la precipitación ahora se está observando en regiones áridas y semiáridas, con disminución en las regiones lluviosas, como correspondería al estado de Nayarit, cuyo clima es cálido subhúmedo.

En cuanto a la tendencia a la precipitación en la estación climatológica de Mexcaltitán, se observa la misma variabilidad, pero sin ninguna tendencia (figura 11); esto puede ser resultado

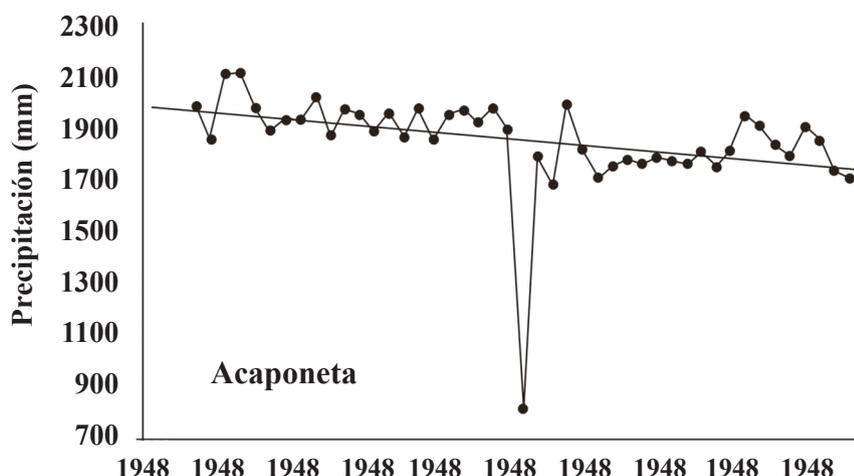


Figura 9. Precipitación promedio anual en la estación climatológica de Acaponeta. Base de datos de Conagua (2006).

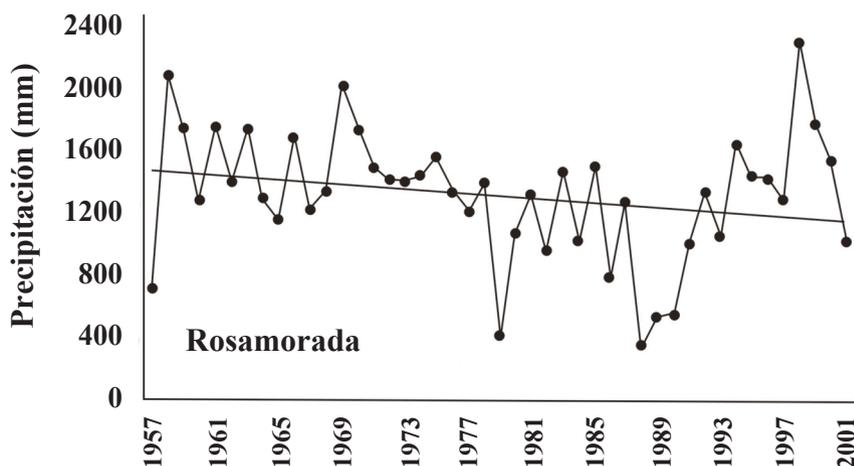
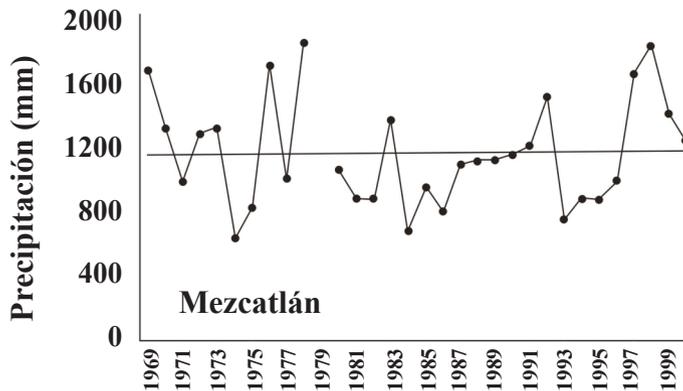


Figura 10. Precipitación promedio anual en la estación climatológica Rosamorada. Base de datos de Conagua (2006).

de las lluvias monzónicas formadas por los vientos cargados de humedad provenientes del mar; de las influencia de los huracanes tanto los que inciden en el Estado como aquellos que pasan paralelos al mismo. Pavia (2004) menciona que las lluvias pueden no estar asociadas directamente a la intensidad del ciclón, ni a la localización de su ojo, ni a su duración, sino más bien al campo de nubosidad que el ciclón genera pues puede llover antes o después del ciclón; además de los propios eventos El Niño y la Niña de diferentes intensidades. El que no se registre nin-



**Figura 11.** Precipitación promedio anual en la estación de Mexcaltitán. Base de datos de Conagua (2006).

guna tendencia, no significa que el río San Pedro que drena a Mexcaltitán, no vaya afectar las áreas de inundación si se represara, con los consecuentes cambios en la comunidad de manglar que se presentan en el sur de Marismas Nacionales.

## HIDROPERÍODO

El patrón hidráulico de Marismas Nacionales y sus condiciones de salinidad están fundamentalmente regidos por los aportes fluviales estacionales de los ríos y el por tipo de mareas, que aunado a la topografía del terreno determinan los niveles de inundación, que definen el hidropériodo natural en este sistema costero, lo cual es importante en la conservación salina óptima para el crecimiento de manglar.

## OCEANOGRAFÍA

### CORRIENTES COSTERAS Y MAREAS

Se ha observado la intensificación de una corriente marina costanera hacia el norte, favoreciendo procesos de erosión costera. A la altura de San Blas se registran mareas vivas de 97.5 cm y medias de 70 cm y con la apertura del canal de Cuautla se ha presentado una intromisión marina que ha incrementado no solamente penetrando la marea al interior de la laguna de Agua Brava, sino también salinizando áreas que eran oligomesohalinas hasta llegar a hiperhalinas inapropiadas para el manglar y su distribución específica (en particular de *Laguncularia racemosa*). Si a esta situación se le añade el represamiento de los ríos no solo modificaría el hidropériodo óptimo para el manglar sino condicionaría la formación de salitrales.

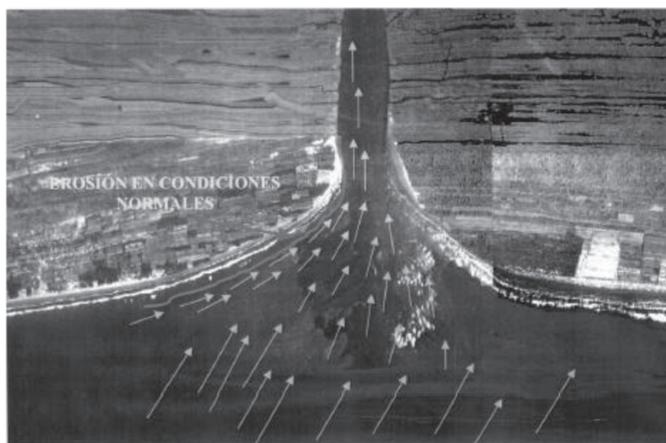
El incremento de energía de la corriente litoral por la disminución en los escurrimientos y su carga sedimentaria, ha generalizado un régimen erosivo que está sustituyendo el régimen progradante que existía anteriormente, mostrándose en forma actual un canal erosivo a lo largo del litoral (Gómez Gurrola, comentario personal).

Los principales aspectos causantes de la erosión playera son: las corrientes de pleamar y bajar en cada ciclo de 6 horas. Según Fuentes-Mariles y Jiménez-Espinosa, (2002) en la zona se tiene una rango de marea (diferencia entre su nivel más alto y más bajo), de 0.9 m los que multiplicados por el área de superficie libre del sistema lagunar, que es de 108 km<sup>2</sup>, y divididos entre el tiempo de entrada de 6 horas, da un gasto medio de ingreso de agua del mar al sistema lagunar de 4 500 m<sup>3</sup>/s, mismo volumen de agua lagunar que sale durante las siguientes 6 horas; ello se repite en las siguientes 12 horas del día. Por lo que cada día se presenta un gasto de entrada seguido de uno de salida, y así sucesivamente.

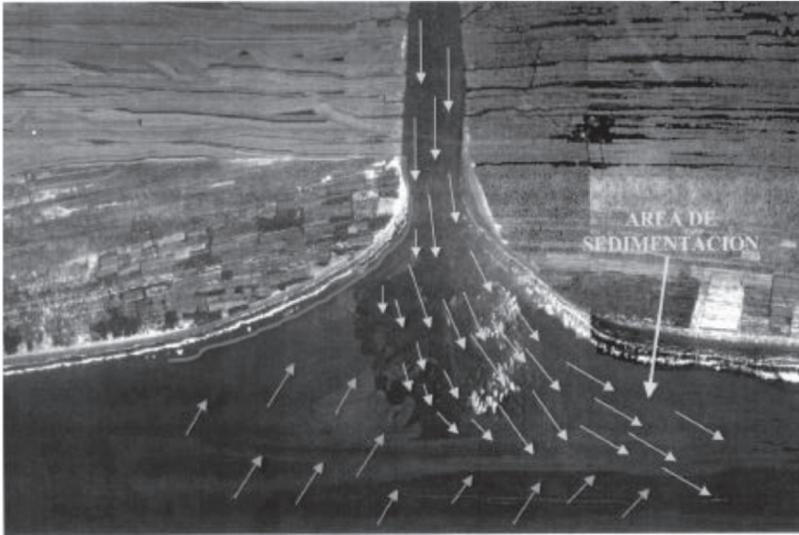
La apertura artificial de canales en los cordones de playa, y en particular el de Cuautla el cual hasta el año 2005 tenía 3.5 km aproximadamente de ancho (figura 12), continúan tanto su construcción como su crecimiento, favoreciendo la entrada de las mareas y corrientes, así como generando procesos graves de erosión, azolvamiento y salinización.

Las corrientes marinas inducidas por oleaje han provocado, a su vez, que las corrientes de entrada al sistema lagunar sean más grandes en las márgenes de la boca del canal de Cuautla, por lo que las velocidades de los flujos de agua han tenido la capacidad de arrastrar el material de la playa en la margen norte (figuras 12 y 13) (Fuentes-Mariles y Jiménez-Espinosa, 2002).

El material que ha sido removido se ha depositado en el fondo marino cerca de la margen sur de la boca del canal de Cuautla (figura 13), pero también la línea de costa tiene una forma curva que propicia que las velocidades mayores estén próximas a la playa favoreciendo su erosión (Fuentes-Mariles y Sánchez-Espinosa, 2002).



**Figura 12.** Canal de Cuautla y la intromisión de la marea laguna de Agua Brava (Tomado de Fuentes-Mariles y Jiménez-Espinosa, 2002).



**Figura. 13.** Canal de Cuautla y la bajamar en la Laguna de Agua Brava (Tomado de Fuentes-Mariles y Jiménez-Espinosa, 2002).

## FISICOQUÍMICA DEL AGUA

Antes de la apertura del canal de Cuautla (construido en 1976, según Álvarez-Rubio *et al*, 1986) existían condiciones desde oligohalinas hasta mesohalinas (0.5 ups a 10 ups en otoño) y marina-polihalinas (23-38 ups en el resto del año) entre Teacapán y Agua Brava. Después de la apertura Islas-García (2008) refiere niveles de 38 ups en lluvias en la laguna del Valle que se comunica con la de Agua Brava y en fechas recientes se han registrado en el interior de Agua Brava hasta 120 ups a finales de la época de sequía (junio) (Flores-Verdugo, com. personal). Se han registrado niveles amplios en el contenido de oxígeno disuelto (2 a 7 ml/L, aproximadamente) resultado de la dinámica de circulación, morfología, de características biológicas (fotosíntesis y respiración) e influencia antropogénica. La concentración de fosfatos también puede variar (< 1.0 a >10  $\mu\text{M}$ ) según la localidad (áreas de escasa circulación, descargas urbana e influencia de actividades agropecuarias). Los niveles de los compuestos nitrogenados inorgánicos también varían por los factores ya señalados del nutriente anterior ( $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$  de <1.0 a > 30.0  $\mu\text{M}$ ).

## MANGLAR

Existen cuatro tipos de manglar inventariados desde los años 70; *Rhizophora mangle* (rojo), *Avicennia germinans* (negro), *Laguncularia racemosa* (blanco) y *Conocarpus erectus* (chino). El estado de Nayarit tenía un área de manglar mayor a 153 409 ha, del cual el sistema lagunar

Teacapán Agua Brava ocupaba el 74% (113 52266), Flores-Verdugo *et al.*, (1990), mencionan que el mangle tenía una cobertura entre 111 387 y 113 238 ha, cuya extensión es la mayor área continua de manglar en la costa del Pacífico. Conabio actualmente realiza un proyecto denominado “Programa de Monitoreo de los Manglares de México a Largo Plazo”, en el cual se pretende estimar la distribución actual de los manglares de México, mediante el análisis digital de imágenes satelitales SPOT del año 2005, que al respecto para el sistema lagunar de Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas, estimó un área de manglar de 77 448.71 ha.

Actualmente no existe un dato exacto sobre la cobertura de manglar en el área. Berlanga (2006) evaluó una cobertura de alrededor de 65 000 hectáreas, con una tasa deforestación del 0.8% anual, lo que significa que en 33 años se han perdido alrededor de 24 000 hectáreas o alrededor del 30% de la cobertura existente en 1973. De igual manera este autor estimó que la tasa de deforestación más importante ocurrió en el periodo 2000-2006, con una pérdida del 2.3% anual (tabla 1). Acosta (2003), calculó una pérdida de 9 500 ha por deforestación que permitió caracterizarlo como un humedal con alto impacto antropogénico.

Dada la importancia de la gran área que cubre el manglar en Marismas Nacionales, cabe destacar que de reuniones realizadas por Conabio con especialistas se propuso que un área de manglar se encontrara como Área Natural Protegida (equivalente a 280 573 ha) reguladas bajo el régimen de protección especial de la LEGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente); asimismo que 30 sitios estuvieran inscritos en la Convención Internacional Ramsar con 420 244 ha que corresponde al 64% de la superficie total, lo cual implicaba el desarrollo de programas de conservación. Por la importancia que representa esta comunidad de manglar desde los puntos de vista de servicio ambientales, desde finales de la década de los años 80 se dieron los primeros pasos por la Dirección de Recursos Forestales para elaborar una norma que regulara el manejo y por lo tanto su conservación; no fue sino hasta 1999 que la Semarnap publicó en el Diario Oficial la NOM EM 001-REC/NAT que establecía las especificaciones para la preservación, conservación y restauración del manglar. El 7 de mayo de 2004 apareció en el Diario Oficial de la Federación la NOM 022 obviamente hubo propuestas de modificación haciéndola más flexible; como por ejemplo permitir la realización de obras y actividades antes prohibidas e incluyendo la mal interpretada compensación. En la Ley de Aguas Nacionales se incluyen algunos incisos de ciertos artículos relacionados con aspectos de concesión y administración del agua que pudieran aplicarse a los humedales como las Marismas Nacionales.

**Tabla 1.** Estimación de la cobertura de manglar en Marismas Nacionales, Nayarit: 1973-2006.

Año	1973	1986	1990	1995	2000	2006
Hectáreas	89 100	87 000	82 300	80 000	75 000	65 000
Porcentual	100	98	92	90	84	73

Fuente: Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2006).

El manglar es respuesta de la hidrología de Marismas Nacionales, pero por modificaciones en el hidroperíodo, por cambio en la magnitud de los escurrimientos y por lo tanto en las áreas de inundación, por cargas de sedimentos, por canalizaciones entre los cordones de playa y por la apertura del Canal de Cuautla, ha incrementado la salinidad inadecuada para esa vegetación y su zonación original. Los lugares que dejan de inundarse con agua dulce y dejan de recibir aportes de nuevo sedimento, cesan de compensar la compactación, ocasionando que el manglar sufra una sofocación al dejar al descubierto sus raíces por mucho tiempo. Se ha sugerido crear embalses para la adecuación halina requerida por el manglar en aquellas áreas con alta salinidad. Por los cambios en las avenidas, en la dinámica de circulación y en la salinidad, en las orillas del río Santiago se han desarrollado más los sauces.

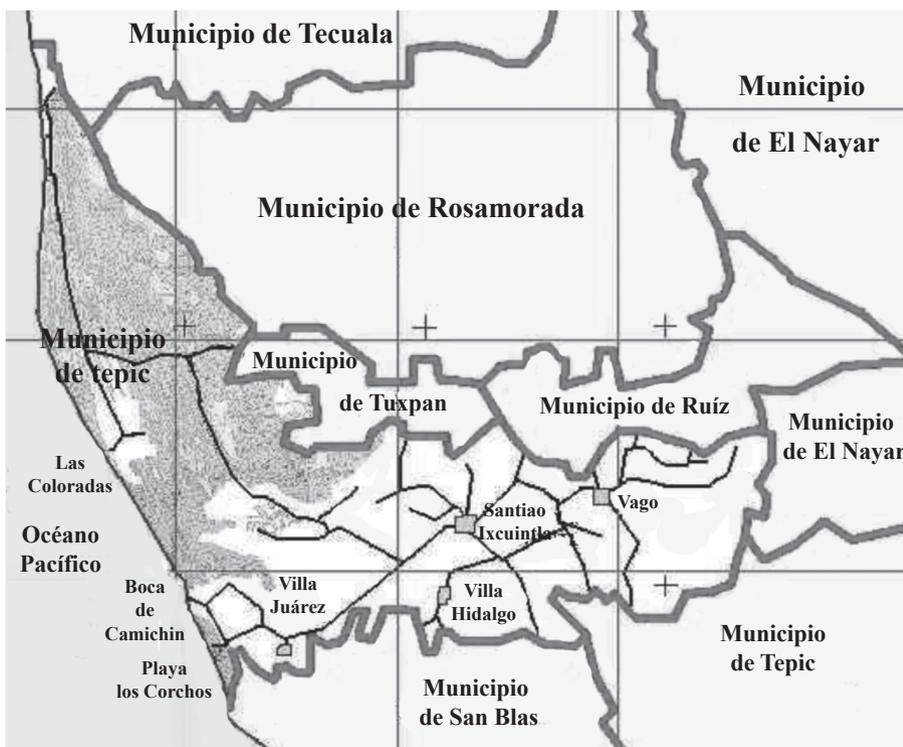
Sin que aún se disponga de un estudio exhaustivo de deterioro de manglar, se han podido identificar zonas de deterioro asociadas aparentemente a causas diversas, con alguna estimación muy subjetiva de su causa. Por ejemplo bloqueo hidrológico de flujo mareal al oriente de la carretera a El Roblito (300 ha de mangle negro muerto); colonización por mangle rojo de azolvamientos en el estero del Rey, el estero de Cuautla y las lagunas del Valle y la Palicenta; desaparición por erosión litoral de miles de hectáreas en playa del Rey, Las Haciendas y Novillero; muerte de alrededor de 10 000 ha de mangle por cambio de régimen hidrológico en las lagunas de El Chumbeño y Pescadero; cientos de hectáreas de manglar muerto por inundación dulceacuícola persistente alrededor de Mexcaltitán; unas 300 ha de manglar removido por desarrollo urbano y acuícola en San Blas, Aquanova, y granjas de Rosamorada; alrededor de 200 ha de manglar removido por erosión mareal en cañadas de Las Haciendas y Novillero.

## MARCO ECONÓMICO-SOCIAL

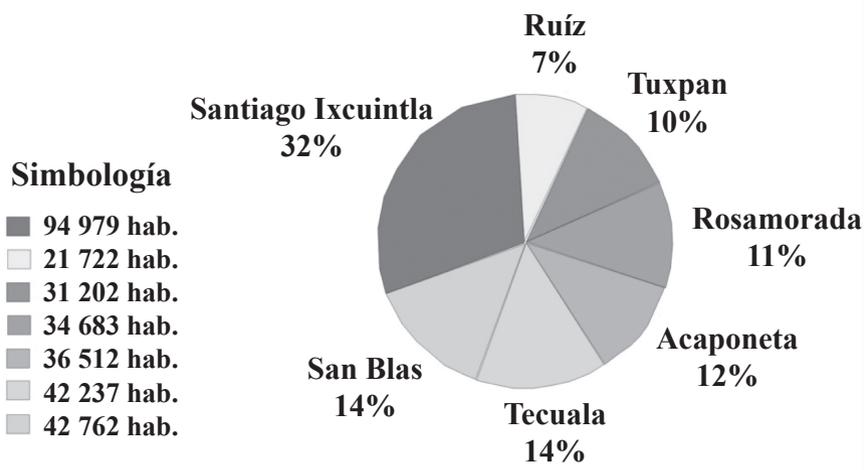
Con base en la información de la Enciclopedia de los Municipios de México, Nayarit Santiago Ixcuintla (<http://ww.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/nayarit/mpios/18015a.html>) se muestran en la figura 14 los municipios que rodean al sistema de humedales de Marismas Nacionales; correspondiéndole a la mayor superficie de contacto al municipio Santiago Ixcuintla y en segundo lugar al de Tecuala.

Según el Censo General de Población y Vivienda del 2000, la región norte de Nayarit tiene una población de 304 097 habitantes, que constituyen 33.05% de la población estatal. Con base en la figura 15, el municipio con mayor densidad poblacional es Santiago Ixcuintla, la cual por los asentamientos y las actividades antropogénicas que ahí se desarrollan, podrían estar impactando directamente al sistema lagunar.

Se estima 27 000 personas asociadas a las actividades pesqueras (Conanp, 2009); además existe una gran heterogeneidad en la capacidad de organizarse, así como la falta de proyectos productivos alternativos en la pesca; cabe destacar que de las 136 granjas camaronícolas el 40% tienen serios problemas de operación. Además, desde el punto de vista social, existe un deterioro de la calidad de vida, disminución de fuentes de trabajo y desarrollo, con falta de participación social, asentamientos desorganizados en las márgenes de los ríos con riesgos de los



**Figura 14.** Principales municipios que rodean al Marismas Nacionales (tomado <http://ww.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/nayarit/mpios/18015a.html>).



**Figura 15.** Distribución poblacional por municipios en Marismas Nacionales. Fuente: INEGI, XII Censo General de Población y Vivienda, Nayarit 2000.

pobladores por inundaciones normales y falta de educación ambiental. En la tabla 2 se observa que los municipios de Tuxpan, Santiago Ixcuintla y Rosamorada tienen las mayores actividades pesqueras y acuiculturales que requieren de un ambiente acuático con un flujo de agua dulce y marina adecuado.

Ocupan el segundo lugar las actividades comerciales y de servicios. La mayor superficie agrícola es de aproximadamente 3 000 km<sup>2</sup>, la mayor cobertura se presenta en el municipio de Santiago Ixcuintla con 54 037.27 ha, Tecuala con 574.5 ha, Rosamorada con 24 622 ha, Acaponeta con 18 888 ha y San Blas con 37 058 ha, que rodean al sistema lagunar. De estos Santiago Ixcuintla posee la mayor área de riego, mientras que en Acaponeta predomina la agricultura de humedad y en Tuxpan la de temporal.

El desarrollo de la agricultura ha sido amplio a tal grado que ha reducido áreas lagunares y de vegetación, especialmente en los municipios de Tecuala y Tuxpan.

Se desarrolla una actividad forestal que según la Conanp tiene una producción estatal de mangle blanco de 15 millones de pesos al año, la cual la realizan 1 500 personas en toda el área de Marismas Nacionales. Sin embargo, dado que no se trata de un aprovechamiento maderable (que extrae ramas y no el tronco principal) esta actividad no afecta la pesca (se estima que por cada hectárea de manglar se produce anualmente 800 kg entre pescado y camarón. Turner, 1991), como otras modificaciones naturales y antropogénicas en esta zona.

## PESCA Y ACUICULTURA

El gran potencial de Nayarit para el desarrollo de la acuicultura y la pesca se basa en los siguientes recursos naturales:

- 163 kilómetros de litoral
- Además de sus nueve ríos importantes: Santiago, San Pedro, Bejuco, Rosamorada, San Francisco, Acaponeta, Cañas, Escuinapa y Baluarte

**Tabla 2.** Superficies acuáticas y actividades que se desarrollan en los municipios adyacentes al humedal de Marismas Nacionales.

	Litorales Km	Cuerpos de agua ejidales (km <sup>2</sup> )	Personal ocupado acuicultura	Personal ocupado pesca
Rosamorada	0.0	128.2	586	1 920
Ruíz	0.0	0.0	0.0	21
San Blas	52.1	9.2	525	724
Santiago Ixcuintla	81.6	88.3	449	1 641
Tecuala	29.4	93.2	423	1 365
Tuxpan	0.0	2.0	0.0	2 581

Fuente: INEGI. Merco Geoestadístico Municipal 2000. INEGI, Resultados del VIII Censo Ejidal, 2001, Soltaprana, Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Nayarit, 2003. INEGI, Censos Económicos, 2004.

- 55,000 hectáreas con posibilidades para el desarrollo de la acuicultura
- Actualmente se aprovecha alrededor del 13.5% de las 55 mil has con vocación acuícola.

La pesca y la acuicultura son las grandes aportaciones de la región norte a la economía del estado. En este sector, el mayor potencial se ubica en la costa norte de Nayarit, tanto en lo que se refiere a la plataforma continental, representada por sus litorales, así como por los cuerpos de agua, que en el primer caso representa el 56% del total estatal y en cuerpos de agua el 72%.

La pesca de camarón es una actividad importante en el Estado, la cual se desarrolla desde el norte hasta el sur del litoral del Estado, coexistiendo la pesca litoral marina, la estuarina, principalmente en Marismas Nacionales y la acuicultura.

En cuanto a importancia de actividades, la acuicultura supera actualmente a la pesca en producción bruta, si bien la ocupación es tres veces mayor en la pesca.

Por otra parte, la acuicultura se realiza fundamentalmente en la región norte, representando el 95% del total de la producción bruta estatal. (Plan Estatal de Desarrollo 2005-2011 Gobierno del Estado de Nayarit, ([www.nayarit.gob.mx/ped/6norte.pdf](http://www.nayarit.gob.mx/ped/6norte.pdf))).

El camarón blanco es la especie más importante para las pesquerías estuarina, la cual representa más del 80% de las capturas totales en el Estado, seguido por el camarón azul con 13%; el porcentaje restante lo aportan el camarón café, cristal, botalón y rosado, estas especies son particularmente importantes al final de la temporada, ya que en los meses de enero a marzo, se agrupan en las bocas de ríos, arroyos y esteros de mucha afluencia al litoral; estos crustáceos se verían afectados, al modificar la hidrología fluvial del sistema lagunar, con consecuencias socioeconómicas negativas para los pescadores ribereños del área.

En el complejo lagunar Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas incluyendo Mexcaltitán, la captura de camarón y ostión, según algunas fuentes de información tenían una gran importancia, pero han disminuido considerablemente debido a la influencia de diversos factores, como azolvamiento de las bocas marinas, aumento en el uso del arte de pesca llamado “tapo” (Conanp, 2009), con un esfuerzo pesquero alto, incumplimiento de vedas, asentamientos humanos, contaminación por agricultura y mal manejo de agroquímicos, así como por aguas residuales domésticas arrojadas a la laguna generando diversos problemas como contaminación microbacteriológica y eutrofización, afectando, además la salud pública y el uso urbano del agua.

Con información de Sagarpa (2007) el recurso camarón denominado de estero alcanzó en 1988, 1 800 toneladas anuales; en 1992 se obtuvieron 3 710 ton, y en el año 2007 de 3 530 ton que experimentaron cierta disminución; sin embargo no se informa de disminuciones significativas. Por otra parte, la camaronicultura tuvo un rendimiento de 2 955 ton en el mismo año según la Secretaría; por su parte la FAO (1995) informó un cultivo del crustáceo en 1988 de 11.8 ton alcanzado 224 ton en 1993. Tales discrepancias se pueden deber a los cambios ambientales ya señalados y por técnicas inadecuadas tanto de captura como del dominio técnico del cultivo. Tales diferencias se observan también en los registros del rendimiento del cultivo, ya que en el año 2007 se informan de 2 955 ton y en 2005 fueron 721 ton en 35 de las 136

granjas referidas por el Comité Estatal de Sanidad Acuícola del Estado de Nayarit (CESANAY. <http://www.cesanay.com/censogranjas.htm>).

Las mismas discordancias se registran en la ostricultura, ya que en algunas fuentes de información no aclaran si son kilogramos o toneladas. En cuanto al ostión, la Sagarpa en 2007 describe una captura 383 kg y en cuanto al cultivo 736 kg anuales; FAO (1995) refiere 500 kg en 1992. Por su parte CESANAY señala un rendimiento por cultivo de 942 ton para cinco cooperativas en el 2007. En el caso del recurso ostrícola, se ha registrado una disminución al sur de Marismas Nacionales (Mexcaltitán), el cual puede ser resultado del mayor esfuerzo pesquero, intromisión salina a través de la apertura de la boca de Talegas, por la construcción de la Presa Aguamilpa o por contaminación.

Estas discordancias conllevarán a una imprecisión sobre la influencia del incremento del nivel del mar por el cambio climático en las actividades económicas costeras.

La adición de fertilizantes según el tipo de cultivo en la camaronicultura, llevará a incrementos de nutrientes en el agua de recambio aportados a las lagunas, considerando que el camarón asimila entre el 25 al 30 % de nitrógeno y fósforo, así como entre el 10 y 15% de carbono (De la Lanza-Espino y Martínez-Cordova, 1998; Saldías *et al.*, (2002); por su parte, Páez-Osuna (2001) menciona un egreso en la fertilización de nitrógeno y fósforo entre el 30 y 35% que llegan al sistema lagunar. Esto llevará a una eutrofización con el incremento del nivel del mar y el retroceso de agua dulce por posibles represamientos de los ríos como el San Pedro y Acajoneta.

Según CESANAY el ostión se cultiva fundamentalmente en el estero boca de Camichín y estero Pozo Chino (Municipio de San Blas), y en el caso del camarón el mayor número de granjas se ubican en la periferia de la laguna Agua Brava (Municipio de Rosamorada); y en el municipio de San Blas; En este último cerca de la costa y en la parte más interna de la planicie costera.

## AGRICULTURA

El municipio con mayor superficie agrícola de humedad es Tecuala 75%, seguido por Tuxpan y Santiago Ixcuintla con 75 y 80% con agricultura de riego; Rosamorada presenta 50% de humedad y 50% de riego. FAO (1995), refiere una aplicación de fertilizantes a cultivos cíclicos en el municipio de Tecuala en el año de 1991 para diferentes tipos de cultivo de 3 374.38 ton; a su vez señalan que 1 705 ton son aplicadas a los cultivos adyacentes al río Acajoneta, que finalmente es un afluente de la laguna de Agua Brava. Tomando en cuenta que los cultivos asimilen entre el 30-50 % de los fertilizantes aplicados, el resto es transportado al ambiente lagunar.

Los municipios de Santiago Ixcuintla, Rosamorada, Tuxpan y San Blas cuentan con un importante inventario de ganado bovino, particularmente para producción de carne, existiendo zonas que tradicionalmente han sido productoras pecuarias y que cuentan con importantes extensiones de agostaderos así como con vocación para impulsar esta actividad no sólo en producción de carne, sino de leche.

El municipio de Santiago Ixcuintla contaba con el mayor número de personas dedicadas a la agricultura, siguiéndole en importancia San Blas y Rosamorada. Santiago Ixcuintla posee la mayor superficie irrigable de todo el estado, con casi 600 km<sup>2</sup>.

## **TURISMO**

En el Plan Estatal de Desarrollo 2005-2011 el gobierno del estado de Nayarit considera que tiene un alto potencial en la región norte en materia turística, que se manifiesta principalmente en su franja de playas que inicia desde la costa de San Blas y continúa hacia el municipio de Santiago Ixcuintla, ahí es donde principia la playa de Novillero, hasta el municipio de Tecuala, considerándose una de las playas más extensas del país, incluyendo el área de Las Haciendas en donde se encuentran las playas de El Colorado, Santa Cruz, Puerta de Palapares y Palmar de Cuautla con grandes posibilidades de desarrollo para turismo ecológico y social por estar al igual que la isla de Mexcaltitán, en la zona estuarina, situación que favorece el desarrollo. Sin embargo, hay que considerar que para el desarrollo y crecimiento de esta actividad se requerirían mayores estudios, no sólo por el incremento del nivel del mar, sino también por ser un humedal de gran densidad de manglar y en consecuencia sitio Ramsar, sitio AICA y Área Natural Protegida.

## **PROBLEMAS SOCIOAMBIENTALES**

La Región Norte, eminentemente agropecuaria, acuícola y pesquera presenta altos riesgos de sobrecarga en los ecosistemas, que repercutirá negativamente en deterioro de los recursos naturales y en la caída de los rendimientos. Lo anterior se presenta en los municipios de mayor densidad poblacional como Tuxpan, Santiago Ixcuintla y una parte de San Blas.

El conjunto hidráulico de la región ofrece situaciones adversas y de perjuicio, ya que la región es susceptible a siniestros que ocasionan los grandes torrentes que inundan tanto los centros de población, como cultivos y campos ganaderos. Por otro lado, mantiene grandes áreas de inundación interanual que favorece el crecimiento del manglar que a su vez permite sostener recursos pesqueros y desde el punto de vista ecológico una gran biodiversidad

Se observa un avance importante de la superficie de selva y bosque perturbados, por el orden de casi 1 500 km<sup>2</sup> – alrededor de 5.4% del territorio- en tanto que la superficie de palmar ha venido desapareciendo y los pastizales aumentando.

Existe un proceso de ensaltramiento de las tierras, sobre todo en el municipio de Santiago Ixcuintla, así como un agotamiento de suelos y contaminación de éstos y del agua.

En algunas áreas de la zona estuarina se observa sobreexplotación del camarón, originado por la utilización de artes de pesca inadecuadas, sobreesfuerzo y pesca furtiva, así como azolvamiento del sistema estuarino; teniendo como común denominador la falta de regulación de la pesquería, problemas financieros y de organización de las cooperativas pesqueras, así como la falta de integración formal a la actividad de pescadores libres y comercializadores marginales.

La falta de participación corresponsable de los lugareños dentro de los diferentes planes existentes genera resistencia, conflictos o, al mínimo, desinterés, en cualquier acción que se quiere emprender, incluyendo la conservación y rescate del ambiente.

El canal de Cuautla está generando la introducción del mar en terrenos agrícolas y urbanos, situación que puede ser el origen de conflictos, y que hace necesaria la intervención de las autoridades y la participación de los afectados para arribar a soluciones duraderas.

## VULNERABILIDAD

El incremento del nivel del mar por el cambio climático, traerá en el área de Marismas Nacionales modificaciones substanciales de las superficies cubiertas por los humedales con manglares y vegetación asociada, que dependen del hidropериодо y que se encuentran en zonas bajas, con avance de la intrusión salina, consecuencia del incremento de las mareas por la apertura del canal de Cuautla, así como el menor aporte de aguas dulces por la tendencia a la disminución pluvial y fluvial de los ríos San Pedro y Acaponeta, así como el represado Santiago (aún no está cuantificado el impacto ambiental), bajando los niveles de inundación interanuales necesarios para la sobrevivencia de los manglares. Flores Verdugo (com. personal) estima una pérdida del 52% de los humedales a finales del siglo XXI por un incremento del nivel del mar de un metro. Es difícil que un humedal se recupere cuando se modifica el hidropериодо (Carpenter *et al.*, 1992). Los sedimentos aportados por los ríos son capturados por la vegetación y si no mantienen la tasa de acumulación, la vegetación se verá sumergida por el incremento del nivel del mar; este aporte ha sido reducido significativamente por la construcción de presas, como por ejemplo Aguamilpa; al respecto se calcula que cerca del 70% de las playas del mundo se están erosionando (Bird, 1996). Debido a la erosión, la definición de Zona Federal Marítimo Terrestre es obsoleta y perjudicial bajo el cambio climático (Flores Verdugo, com. personal) e incremento del nivel del mar. Sumado a lo anterior, a consecuencia de la apertura del canal de Cuautla y de otros de menor tamaño y del incremento de la corriente costera se ha acelerado la erosión y por lo tanto la intromisión de agua marina al interior de la laguna de Agua Brava, donde se ha visto la mayor afectación al manglar con la salinización correspondiente

Una función de esta comunidad vegetal es que reduce el riesgo de exposición a fenómenos meteorológicos en las comunidades humanas y bióticas. Aunado a esto, la pérdida de manglar ya sea por deforestación, cambio del uso del suelo, canalizaciones, desbalance entre la erosión y sedimentación, han conducido a la disminución de los recursos pesqueros.

Kovacs *et al.* (2004), señala que en Teacapán-Agua Brava mediante un Proceso de Jerarquía Analítica (AHP en inglés) basado en entrevistas con los pescadores muestran un alto grado de consistencia y sugieren que por efecto de los huracanes en los últimos 15 años, los manglares de mayor altura han desaparecido siendo sustituidos, según las circunstancias, por comunidades sucesionales de la misma especie y estructura (si el régimen hidrológico se mantiene) o por comunidades sucesionales de diferente especie y/o estructura (en los casos en que el régimen hidrológico ha sido alterado).

Según Millenium Ecosystems Assessment (2005), a nivel mundial se calcula que tres a seis veces más agua se encuentra en las presas que en los ríos y arroyos, y el confinamiento de agua en reservorios se ha cuadruplicado de 1960 a la fecha. Cabe señalar que debido a la tendencia a la disminución de los escurrimientos de los ríos Acaponeta y San Pedro, afluentes del humedal Marismas Nacionales, no sería recomendable su represamiento ya que la intromisión marina sería mayor.

En lo que se refiere al papel que juegan los humedales (como el de Marismas Nacionales por su extensión), como asimiladores del aumento de CO<sub>2</sub> asociado al calentamiento global, solo puede estimular e incrementar hasta cierto nivel la fotosíntesis y crecimiento de los manglares; ya que en largos periodos dicho incremento no se mantiene por largo tiempo, regresando la tasa fotosintética original. Hoghart (2007), señala que el efecto del incremento de CO<sub>2</sub> tiene un menor impacto en los manglares. El aumento de este gas puede favorecer a las especies invasoras y pueden alterar el funcionamiento de los ecosistemas (Dukes y Mooney, 1999).

Las grandes avenidas actúan como un factor esencial para el desarrollo de los procesos ecológicos (*e.g.* ciclos de nutrientes, sucesión ecológica), que en última instancia mantienen las características de biodiversidad y productividad de estos ecosistemas. La magnitud, duración, frecuencia, tasa de cambio y momento de ocurrencia de cada una de las grandes avenidas se traduce en una respuesta ecológica y geomorfológica diferente. Como resultado del cálculo efectuado y una supuesta obra de regulación del río San Pedro, la WWF (2009), propone igualar los caudales de entrada, con caudales de salida de una presa. En el caso de Marismas Nacionales los periodos interanuales de inundación por grandes avenidas han sido las que han adecuado el establecimiento de una flora y fauna diversas, que difícilmente puede asegurar el flujo de salida.

Con base en WWF (2009) “los primeros estudios de caudales ecológicos se abordaban desde planteamientos deterministas, donde se definía una frontera que separaba ecológico y no ecológico, conservación y no conservación (normalmente el límite era un número resultado de un método de cálculo también determinista). Actualmente los caudales ecológicos se abordan desde un planteamiento más abierto y complejo, que encuentra un apoyo fundamental en el principio del Gradiente de la Condición Biológica. Según este principio, la condición biológica de un ecosistema se va deteriorando al incrementar un factor de estrés (*e.g.* la alteración hidrológica), cumpliéndose de forma general que a mayor alteración hidrológica menor condición biológica. Los caudales ecológicos entendidos en sentido amplio encajan bien en este esquema de razonamiento. De hecho, la lógica de los caudales ambientales se articula a través de los objetivos de conservación (dime el río que quieres y te diré el agua que necesita), cumpliéndose también de forma general la norma de que a mayor interés de conservación mayores caudales ecológicos. Bajo este planteamiento, los objetivos ambientales traducidos en nivel de conservación para una especie, hábitat o ecosistema, se convierten entonces en un elemento clave en la aplicación de los caudales ecológicos”.

Para la determinación del caudal ecológico se debe partir de un punto de vista ecológico holístico, en el que se incluyen diversas disciplinas para ofrecer elementos de conservación, manejo ambiental y económico.

En el estudio realizado por WWF en el 2009 se formularon dos propuestas para el caudal ecológico, es decir para condiciones hidrológicas en años medios y años secos, para respetar el patrón natural y el régimen de crecidas. De lo anterior se propuso para años de menor precipitación (año seco) un caudal ecológico en época de lluvias de 3.9 a 145 m<sup>3</sup>/s y en la época seca de 5.3 a 1.0 m<sup>3</sup>/s. Para años de precipitación media (año húmedo) en la época de lluvias de 29.5 a 247.8 m<sup>3</sup>/s y en la época de secas de 7.9 a 1.8 m<sup>3</sup>/s

Cabe destacar que los fenómenos meteorológicos (tormentas tropicales, ciclones o huracanes) han sido los que han coadyuvado a las grandes avenidas, gracias a la tendencia creciente de estos fenómenos de alcanzar los niveles cuatro en los últimos 25 años quizá asociados al cambio climático; al respecto Méndez-González *et al.* (2008), señalan la tendencia actual a la disminución de la lluvia en regiones donde normalmente llovía y viceversa.

La alteración del régimen hidrológico por el posible represamiento de alguno de los dos ríos que fundamentalmente drenan a las lagunas de Marismas Nacionales pudiera ocasionar el colapso del sistema, esto ya se ha observado en forma incipiente pero no cuantificada en el río Santiago con la construcción de la presa de Aguamilpa.

Qué pasaría si el agua de la posible presa incrementara las áreas agrícolas sin determinar el caudal ecológico necesario para la biodiversidad, recursos pesqueros y acuícolas, así como su repercusión social y económica en la población de Marismas Nacionales ya impactada por fenómenos naturales y acelerada por las actividades antropogénicas. Bajo este panorama cabría preguntarse ¿para que se quiere la presa?.

El humedal Marismas Nacionales sufre de un deterioro muy evidente desencadenado físicamente por la interrupción de los flujos de agua, sedimentos y nutrientes del río Santiago (80% de la aportación de agua-sedimentos), y la apertura artificial del canal de Cuautla (inició con 200 m y actualmente mide >3 km de ancho, aproximadamente). Este deterioro se refleja en la hipersalinización del sistema que ha ocasionado grandes pérdidas de manglar (>20 000 ha), la baja de la productividad pesquera y del ecosistema en general. Se registran áreas y canales (entre los cordones de playa) con fuerte erosión y otras con un significativo azolvamiento. Algunos autores estiman que por la influencia del cambio climático en la zona costera la comunidad de manglar migrará tierra adentro, siempre y cuando haya suficiente ambiente sedimentario y sin obstáculos topográficos además de no competir con las áreas agrícolas colindantes, sin embargo el represamiento de los ríos disminuiría el aporte fluvial y de sedimentos. También señalan que el incremento del nivel medio del mar determinará el grado del restablecimiento de los manglares, dunas y humedales costeros; sin embargo dado el incremento de aperturas de canales y la erosión, la penetración marina será mayor.

Bajo el incremento del nivel del mar e invasión del mismo hacia humedales interiores, desaparecerían zonas de refugio, alimentación y crianza de organismos que encuentran en esta región de condiciones aptas para la reproducción y el crecimiento hasta la edad preadulto.

Desde el punto de vista económico social, se presentan procesos de deterioro asociados a la desregulación total de las actividades productivas: pesca, agricultura, ganadería. Destaca la sobreexplotación de los recursos pesqueros, asociados principalmente al crecimiento de las

granjas camarónicas y ostrícolas, que incluso requieren aportes de agua dulce para el recambio, pero que bajo un manejo de aguas arriba de las lagunas disminuiría sus rendimientos.

En el caso de otros crustáceos como el langostino y el camarón de río (cauque y moya, respectivamente) si se represaran los ríos afluentes al humedal Marismas Nacionales particularmente San Pedro, no habría migración aguas arriba para completar su ciclo de vida; asimismo se desconocen otras especies por lo que se requieren más estudios.

Con base en la información del ordenamiento ecológico realizado por la Universidad Autónoma de Nayarit (Gobierno del Estado de Nayarit, [www.semanay.nayarit.gob.mx/Bitacora\\_Ambiental/Llanura\\_costera/INFORME/CARACTERIZACION/4%20Ambiental.pdf](http://www.semanay.nayarit.gob.mx/Bitacora_Ambiental/Llanura_costera/INFORME/CARACTERIZACION/4%20Ambiental.pdf)) con imágenes del 2007, el área agrícola que rodea a Marismas Nacionales alcanza 1 930 km<sup>2</sup> la cual utiliza fertilizantes y biocidas que por escurrimientos directos o periféricos que llegan a los cuerpos de agua cambian su calidad (eutrofización) e incluso alcanzan al sedimento donde pueden ser almacenados por mayor tiempo y redifundidos por resuspensión de los sedimentos por corrientes de vientos o por la misma marea.

Según el Plan de Desarrollo del Estado, Nayarit 2005-2011, el agotamiento de los suelos la contaminación de éstos y del agua, se acentúa la crisis agrícola en la región norte que es la zona agrícola más importante de Nayarit.

Dado que no existe una regulación bien definida en acuicultura, pesca, ganadería, recursos forestales y agricultura que preceda a la construcción de las presas, se generarían serios problemas económicos-sociales sin control. La zona necesita ordenarse, la única forma es estableciendo estrategias estatales, municipales y comunitarias.

## LITERATURA CITADA

- Acosta V. J., 2003. Análisis de la estructura de la condición del bosque de manglar en el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales y sus relaciones al nivel de paisaje. Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., México. 89 p.
- Álvarez-Rubio M., F. Amezcua-Linares, y A. Yáñez-Arancibia, 1986. Ecología y estructura de las comunidades de peces en el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, Nayarit, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 13(1):185-242.
- Berlanga Robles C. A., 2006. Caracterización de los paisajes costeros de Sinaloa y norte de Nayarit, México a través del análisis de los patrones de cobertura del terreno. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.
- Berlanga-Robles C. A., y A. R. Luna, 2006. Análisis de las tendencias de cambio del bosque de manglar del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite LANDSAT. *Universidad y Ciencia*, 23 (1):29-46.
- Bird E.C., 1996. Beach Management. John Wiley y Sons. Nueva York, 281 p.
- Carpenter S.R., S.G. Fisher, N.B. Grimm, y J.F. Kitchell, 1992. Global change and freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23: 119-139.
- CNA, 2006. Estaciones climatológicas del Estado de Nayarit.

- Conagua, 2006 Ciclonés tropicales que impactaron directamente a México durante el periodo de 1970 a 2006.
- Conanp, 2009. Manifestación de Impacto Regulatorio Proyecto de Decreto de la Reserva de la Biosfera Marismas.
- De la Lanza Espino G., y L. Martínez Córdova, 1998. Fertilización de los sistemas acuícolas, p. 67-76. En: L. Martínez Córdova(ed.) Ecología de los Sistemas Acuícolas, AGT Editor, México.
- Diario Oficial de la Federación, 2007. Tomo DCXLI No. 1 México, D.F., jueves 1 de febrero de 2007.
- Dukes J. S., y H. A. Mooney, 1999. Does global change increase the success of biological invaders?. *TREE*, 14(4): 135-139.
- FAO, 1995. Estudio para un plan de desarrollo acuícola en el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava.
- Flores-Verdugo F., F. González-Farías, O. Ramírez-Flores, F. Amezcua-Linares, A. Yáñez-Arancibia, M. Álvarez-Rubio, y J. W. Day, 1990. Mangrove ecology, aquatic primary productivity and fish community dynamic in the Teacapán-Agua Brava lagoon-estuarine system (Mexico Pacific). *Estuaries*, 13(2):219-230.
- Fuentes-Mariles O. A., y M. Sánchez-Espinosa, 2002. Observaciones sobre la erosión playera cerca del poblado Palmar de Cuautla, Nayarit. Informe preparado para la Dirección General de Protección Civil y la Unidad Estatal de Protección Civil de Nayarit.
- Gallegos García A., G. de la Lanza Espino, F. Ramos Durán, y M. Guzmán Arroyo. 1984. The 1982-83 warm episode in the off shore waters of Guerrero, Mexico (Northeastern Tropical Pacific Ocean) *Revista Geofísica*, 21: 43-55.
- Gómez-Rojas, J.C., 2010. Valoración de los cambios espacio temporales de las variables ambientales: precipitación, hidrología, manglar y producción de camarón, del Sistema Lagunar Teacapán-Agua Brava, Nayarit, México. Tesis de Maestría Instituto de Geografía, UNAM.
- Hogarth P. J., 2007. The biology of mangroves and seagrasses. Oxford University Press. 273 p.
- Islas García A., 2008. Distribución de plaguicidas organoclorados en agua y sedimento durante la época de secas y lluvias en la Laguna de Agua Brava, Nayarit. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. 90 p.
- Kovacs J., J. Malczewski, y F. Flores-Verdugo, 2004. Examining local ecological knowledge of hurricane impacts in a mangrove forest using an analytical hierarchy process (AHP) approach. *Journal of Coastal Research*, 20,(3): 792-800.
- Méndez González, J. C. J.J Navar, y O.V. Gonzales, 2008. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. Investigaciones Geográficas. *Boletín del Instituto de Geografía*, 65: 38-35.
- Millenium Ecosystems Assessment, 2005. Island Press, Washington.
- Páez-Osuna F., 2001. Flujo y balance de masas de nutrientes en estanques camaronícolas. En: F. Páez Osuna (ed.) Camaronicultura y Medio Ambiente. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Programa de Alimentos, El Colegio de Sinaloa.
- Pavia E. G., 2004. La influencia de los ciclones tropicales en la lluvia del noroeste de Baja California y Suroeste de California. *GEOS*, 20(1): 69-72.
- Plan Estatal de Desarrollo 2005-2011 · Gobierno del Estado de Nayarit
- Sagarpa, 2007. Anuario estadístico. <http://www.sagarpa.gob.mx>.
- Saldías C., S. Sonnenholzner, y L. Massaut, 2002. Balance de nitrógeno y fósforo en estanques de producción de camarón en Ecuador. Contribuciones CENAIM 6 Congreso Ecuatoriano de Acuicultura. (<http://www.cenaimec.edu.ec/publicaciones/boletin81/5.pdf>)

- Turner, E., 1991. Factors affecting the relative abundance of shrimp in Ecuador. *In*: S. Olsen and L. Arriaga (eds.) A sustainable shrimp mariculture industry for Ecuador.
- WWF, 2009. Propuesta de régimen de caudales ecológicos para el río San Pedro en Marismas Nacionales.
- Xu, Z. X., K. Takeuchi, H. Ishidaira, y J. Y. Li, 2005. Long-term trend analysis for precipitation in Asian Pacific Friend river basins. *Hydrological Processes*, 18: 3517-3532.
- Yáñez-Arancibia A., R. Twilley, y A. L. Lara-Domínguez, 1998. Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y Bosques*, 4(2): 3-19 3.

Yáñez-Arancibia, A., John W. Day, Robert R. Twilley y Richard H Day, 2010. Manglares frente al cambio climático: ¿tropicalización global del Golfo de México?, p. 231-262. 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Manglares frente al cambio climático: ¿tropicalización global del Golfo de México?

*Alejandro Yáñez-Arancibia, John W. Day, Robert R. Twilley y Richard H Day*

---

## RESUMEN

Los manglares constituyen un importante recurso forestal en la zona costera de toda la banda intertropical del planeta. El cambio climático acrecienta el impacto provocado por el hombre en las costas, e induce nuevas incertidumbres en la estabilidad ambiental aumentando la vulnerabilidad de los hábitats críticos. Frente al desafío que enfrentan los sistemas económicos, sociales y ecológicos se presentan evidencias de estructura funcional del sistema ecológico de manglar, revisitando la hipótesis planteada por Yáñez-Arancibia *et al.* (1998): *los manglares como hábitat forestado crítico de la zona costera presentan respuestas de acomodación frente a la variabilidad ambiental que induce el cambio global, desarrollando un papel estructural y funcional clave en la estabilidad de la línea de costa, la persistencia de hábitats y biodiversidad, el metabolismo del ecosistema, reduciendo riesgos e incertidumbre para el desarrollo sustentable del uso de sus recursos.* Evidencias recientes indican que los manglares en el Golfo de México responden a esta hipótesis y -como respuesta al cambio climático y sus efectos en la zona costera- muestran un patrón ampliado y consistente de distribución colonizando todo el Golfo hacia el norte, incluyendo la costa

---

(\*) Versión reimpresa del capítulo con el mismo nombre en el libro *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*, A. Yáñez-Arancibia (ed.) 2009. INECOL. A.C., Texas Sea Grant Program, INE-Semarnat, Xalapa, Ver., México, 180 p. Con autorización.

atlántica de la península de Florida, ante la oportunidad de la “*tropicalización global del Golfo de México*”. Más aún, en estos momentos las cuatro especies de manglar del Golfo de México ya se encuentran distribuidas en el estado de Texas.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques de manglar –de manera natural– están entre los ecosistemas más estresados y vulnerables del planeta (Duke *et al.*, 2007; Valiela *et al.*, 2001), lo cual plantea gran preocupación a futuro. Por ello la zona costera del Golfo de México está siendo el foco de atención como laboratorio natural que está resintiendo significativamente el severo impacto que induce el cambio climático, y eso se refleja en contribuciones recientes, como por ejemplo sobre las respuestas de los manglares a la variabilidad climática (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1998; Jiménez, 1999; Milbrandt *et al.*, 2006; Proffitt *et al.*, 2006), la ecogeomorfología de los humedales (Day *et al.*, 2008), las respuestas de los peces y las pesquerías (Pauly y Yáñez-Arancibia, 1994; Greenwood *et al.*, 2006; Steven *et al.*, 2006; Paperno *et al.*, 2006; Switzer *et al.*, 2006; Heileman y Rabalais, 2008; Heileman y Mahon, 2008), la respuesta en abundancia y distribución de poblaciones de aves y mamíferos (Post *et al.*, 2009), la vulnerabilidad del endemismo de los vertebrados terrestres (Luther y Greenberg, 2009), la erosión *versus* la acreción de humedales (Cahoon, 2006), o la dinámica ecosistémica y vulnerabilidad geomorfológica costera (Woodroffe, 1990; Yáñez-Arancibia, 2005; Ortiz Pérez *et al.*, 2009). El marco de referencia para todo el Golfo está bien documentado y eso facilita integrar información y analizar la posibilidad de plantear algunas hipótesis para investigaciones futuras, las cuales ya se tornan urgentes (Twilley *et al.*, 2001; Poff *et al.*, 2002; Scavia *et al.*, 2002; Ning *et al.*, 2003; Greening *et al.*, 2006; Hoyos *et al.*, 2006; Day *et al.*, 2005, 2007, 2008, 2009a; Yáñez-Arancibia y Day, 2005; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007a, 2008).

El objetivo de este trabajo es describir el funcionamiento general de ecosistemas costeros en el Golfo de México y su vínculo con las predicciones del cambio climático, analizando cómo el cambio climático impactará a los humedales costeros, y las implicaciones que esto conlleva hacia el manejo-ecosistémico de la zona costera. El referente es el trabajo de Yáñez-Arancibia *et al.* (1998) sobre los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global, actualizando las respuestas que los manglares empiezan a manifestar para reacomodar su distribución ante la oportunidad de nuevas magnitudes de parámetros ambientales que condicionan su actividad biológica.

## ¿TROPICALIZACIÓN GLOBAL DEL GOLFO DE MÉXICO?

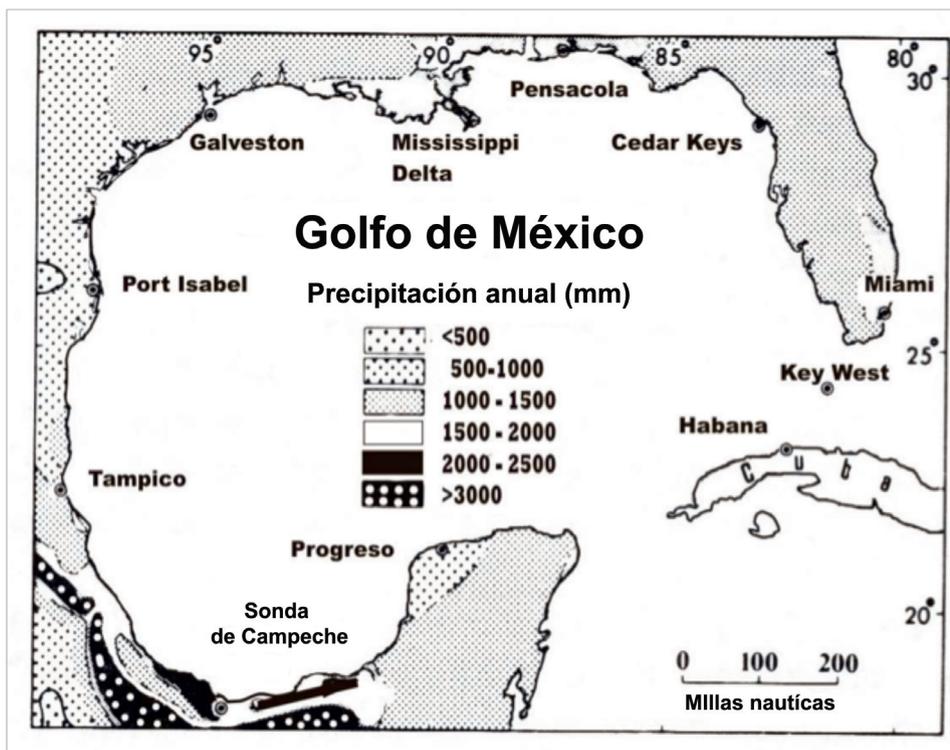
El cambio climático global está provocando diferentes impactos en el Golfo de México, incluyendo incremento de la temperatura superficial del océano, ascenso acelerado del nivel del mar, cambios en el régimen de lluvias y el patrón de descarga de agua dulce, cambios en la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales, e incremento de la temperatura ambiente

tierra adentro (Day *et al.*, 2009a). El ascenso acelerado del nivel del mar está haciendo presión significativa sobre los humedales costeros y otros ambientes de las tierras bajas. Dos importantes razones fisiológicas que inducen pérdida de humedales impactando manglares son: las inundaciones y los cambios de salinidad (Medina, 1999); el cambio climático magnificará ambos. La precipitación alrededor del Golfo varía desde árido hasta hiperhúmeda. La descarga de agua dulce está incrementándose en algunos estuarios del Golfo y disminuyendo en otros, con el impacto potencial de inundaciones severas, erosión de cuencas y los efectos hacia los humedales, la productividad costera, y el potencial para florecimiento de algas nocivas.

En general, el ascenso acelerado del nivel del mar, combinado con un patrón atípico de lluvias, e incremento de la temperatura, está provocando múltiples presiones ambientales sobre los humedales, debido al incremento de la salinidad en contraste con inundaciones excesivas (Day *et al.*, 2008). En términos generales, los cambios de largo-plazo en la frecuencia, intensidad, ritmo, y distribución de fuertes tormentas, está alterando la composición de especies y la biodiversidad de los humedales costeros en el Golfo de México, así como importantes niveles físico químicos, por ejemplo ciclos de nutrientes y productividad primaria y secundaria (Twilley, 1988; Greening *et al.*, 2006), aun cuando también se aprecia la subsiguiente recuperación del ecosistema (Paperno *et al.*, 2006). En el corto-plazo, las aguas cálidas y mayores tasas de crecimiento propiciarán expansión de los humedales salobres, favoreciendo la productividad de especies marinas estuarino-dependientes. Sin embargo, este incremento de productividad puede ser temporal debido al efecto negativo de largo-plazo del ascenso del nivel del mar y pérdida de humedales impactando los hábitats preferentes de peces y macro invertebrados (Heileman y Rabalais, 2008; Heileman y Mahon, 2008; Day *et al.*, 2009b).

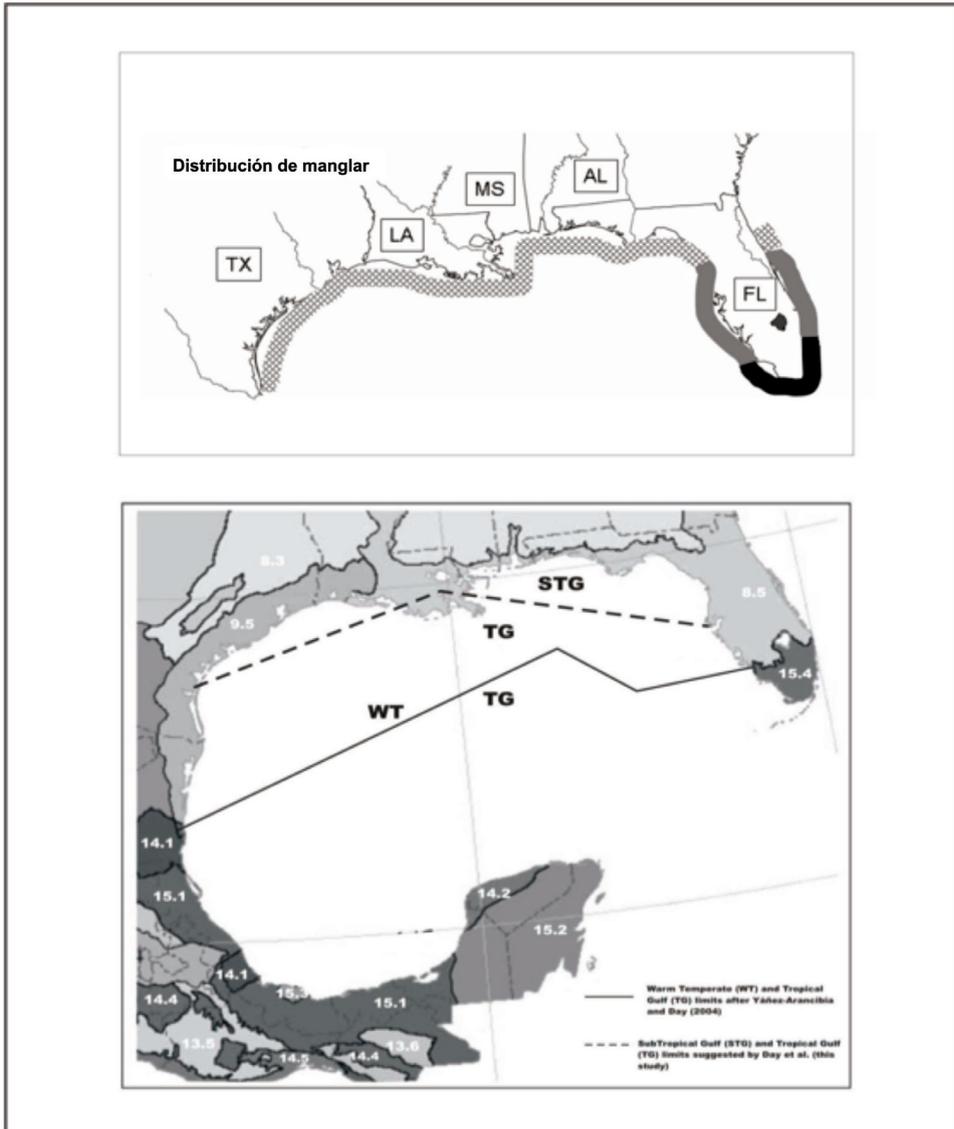
Dentro de este gradiente térmico general, las lluvias juegan un papel importante y manifiestan un claro gradiente de descarga (Day *et al.*, 1989; figura 1), desde árido a muy húmedo. En regiones del sur del Golfo, especialmente en la cuenca de drenaje de los ríos Grijalva y Usumacinta hacia la Sonda de Campeche, las lluvias pueden ser mayores a 3 000 mm/año. El promedio de las lluvias varía entre 1 500 y 2 000 mm/año en la porción centro-norte del Golfo desde Pensacola (Florida, EUA), hasta la llanura deltaica de Louisiana, además del sur del estado de Veracruz. En la mayor parte de las penínsulas de Florida y Yucatán y noroeste del Golfo, las lluvias varían entre 1 000 y 1 500 mm/año. Zonas áridas con menos de 1 000 mm/año se presentan en el noroeste de la península de Yucatán cerca de Progreso, y en el occidente de la costa del Golfo entre Tampico, Tamaulipas, y Corpus Christi (Texas, EUA). En esta amplia escala geográfica, las temperaturas y las lluvias son dos de los parámetros determinantes en la distribución de los humedales costeros (Day *et al.*, 1989, 2008; Yáñez-Arancibia y Day, 2004).

El cambio climático global está condicionando una nueva visión, no sólo ecológica en la apreciación del funcionamiento de los ecosistemas costeros, sino también socio económica replanteando consideraciones para el manejo costero integrado en el Golfo de México. Esto es así por diferentes razones. El clima en el Golfo está expandiendo su geografía tropical, comprimiendo la zona templada hacia el norte y noreste (figura 2). Actualmente, esta interfase se localiza principalmente en el sur de la Florida y en la frontera México-EUA en la región



**Figura 1.** La región del Golfo de México se extiende desde el trópico en la costa de la península de Yucatán (Estados de Yucatán y Campeche) ca. 18 grados Latitud Sur, hasta la zona templada en el norte (Estados de Alabama, Mississippi, Louisiana) ca. 30 grados Latitud Norte, incluyendo gran variación en temperatura media anual y lluvias, las cuales son la principal determinante de la distribución de humedales costeros. Modificado de Day *et al.* (1989).

Tamaulipas-Texas basado en los datos de la Comisión de Cooperación Ambiental para América del Norte CCA-TLCAN (Yáñez-Arancibia y Day, 2004); pero Day *et al.* (2009a) plantea una modificación basado en los datos de United States Geological Survey. El norte del Golfo es actualmente templado pero, como el clima se calienta, la interfase templado-tropical se está moviendo hacia el norte y planteamos que toda la zona costera del Golfo será tropical en el siglo XXI. Conjuntamente con esto, se aprecia una mayor descarga de aguas fluviales en la vertiente global del Golfo (*e.g.* En el norte del Golfo por efecto de lluvias torrenciales y deshielos en las cuencas altas de Missouri, Ohio, y Mississippi), y en el sur por efecto de mayor intensidad de lluvias en las altas montañas (*e.g.* Chiapas, Oaxaca, Hidalgo). El promedio de descarga de agua dulce de la vertiente del Golfo en las costas mexicanas, es regularmente de 10 000 m<sup>3</sup>/seg (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007b); sin embargo, en octubre de 2007 la descarga fue cercana a los 30 000 m<sup>3</sup>/seg con severas inundaciones en Campeche, Tabasco, Veracruz y Tamaulipas, en gran medida condicionado por el impacto de los huracanes Dean y Felix. A su vez, la descarga del Mississippi es regularmente de 18 000 m<sup>3</sup>/seg; sin embargo, en abril de 2008 la descarga rebasó los 25 000 m<sup>3</sup>/seg (Day *et al.*, 2008).



**Figura 2.** Cuadro Superior: *Avicennia germinans* y *Rhizophora mangle* distribuidos en el norte del Golfo de México. Área Negra: *Avicennia* no dañada por escarcha invernal; *Rhizophora* escasamente dañada. Área Gris: *Avicennia* escasamente dañada; *Rhizophora* frecuentemente dañada por escarcha. Área Punteada: *Avicennia* con distribución espaciada, poblaciones locales abundantes con daño frecuente por escarcha; *Rhizophora* con distribución espaciada de plantas individuales afectadas por escarcha. Basado en Steven *et al.* (2006), Zomlefer *et al.* (2006), R. H. Day (2007). Cuadro Inferior: Ubicación de las zonas y fronteras templado calida (WT) y tropical (TG) en el Golfo de México; los números blancos indican las regiones ecológicas costeras en el Golfo de México según la Comisión de Cooperación Ambiental del TLC de América del Norte (Yáñez-Arancibia y Day, 2004). La línea punteada indica la nueva posición de la interfase tropical-templado propuesta por Day *et al.* (2009a).

El resultado global hacia la costa se está manifestando con mayores temperaturas, mayor aporte de agua dulce, insumos adicionales de sedimentos terrígenos y nutrientes, impactando la fisiografía plana de las llanuras de inundación deltáica y ofreciendo un escenario diferente para los humedales costeros. ¿Benéfico para los manglares?

## RESPUESTAS DE HUMEDALES COSTEROS AL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR Y OTROS TENSORES AMBIENTALES

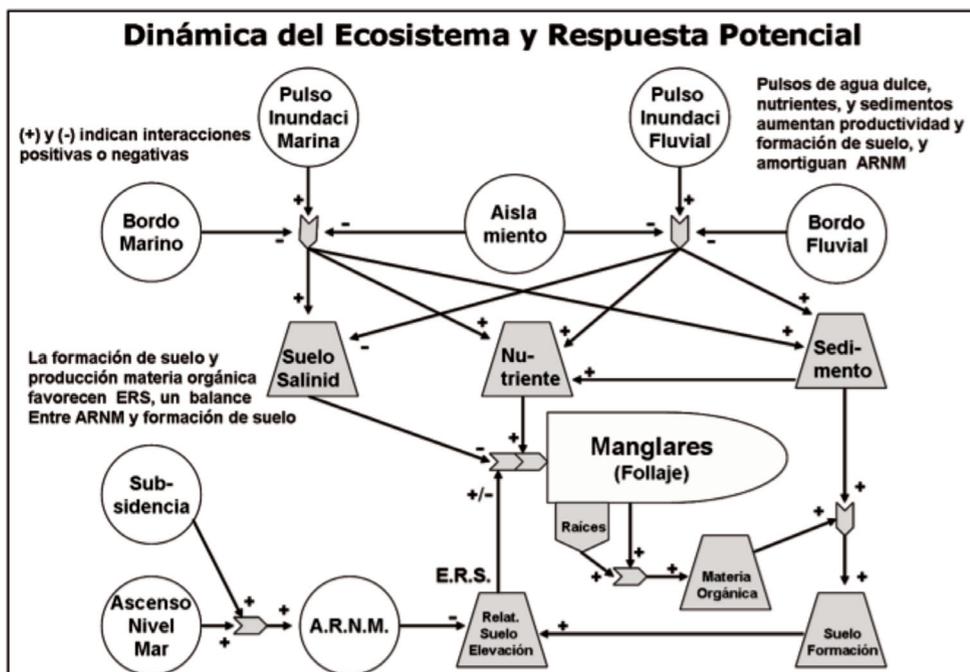
Los humedales costeros en el Golfo de México se enfrentarán a un acelerado ascenso del nivel medio del mar durante el siglo-21 (Woodroffe, 1991; Yáñez-Arancibia y Day, 2005; Greening *et al.*, 2006; Day *et al.*, 2008). El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007) predice que el nivel del mar se incrementará entre 20 y 80 centímetros para fines del siglo XXI, con una mejor estimación entre 40 y 45 centímetros. Esto es mucho más elevado que el ascenso del siglo-xx que fue de 10 a 20 centímetros (Gornitz *et al.*, 1982). Este incremento en el nivel del mar afectará extensas áreas de tierras bajas, particularmente humedales alrededor del Golfo de México. En zonas donde la subsidencia es muy significativa (*e.g.* 3 a 10 mm/año), como en los deltas del Mississippi y del Grijalva-Usumacinta, el incremento acelerado del nivel del mar provocará evidentes impactos sobre los ecosistemas de humedales costeros. En estos casos, el ascenso eustático del nivel del mar debe ser sumado a la subsidencia sedimentaria, para obtener el ascenso relativo del nivel del mar (ARNM), a que se enfrentarán los humedales en el siglo XXI. En el delta del Mississippi, el ARNM se incrementará de 1 a 1.7 cm/año en el siglo XXI, lo cual significa de 30 a 70% de incremento desde el siglo XX. Evidencias recientes del deshielo Antártico y de Groenlandia y la disminución del albedo por pérdida de nieve y hielos, permite sugerir que el ARNM será significativamente superior para el año 2100, tal vez de un metro o más (Rahmstorf, 2007), contrastando con la magnitud conservadora de IPCC (2007).

El ARNM desde las últimas décadas, ha reportado intrusión salina y pérdida de humedales en diferentes costas del Golfo de México, tanto en EUA (Salinas *et al.*, 1986; Conner y Day, 1991; Day *et al.*, 2000), como en México (Ortiz-Pérez y Méndez 1999; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007a, 2007b, 2008), pero también en muchos otros deltas alrededor del mundo (Day *et al.*, 2008, 2009a). Debido a que el ARNM en el siglo XX es 2 a 9 veces más bajo que el proyectado para fines del siglo XXI (Neumann *et al.*, 2000), existe una gran preocupación mundial sobre las pérdidas de los humedales costeros que se vislumbra. El ascenso proyectado en el nivel del mar inducido por el cambio climático, colocará a los humedales bajo un estrés adicional, con la potencialidad para mortalidades masivas de plantas intermareales y declinación en áreas naturales de crianza para peces y macro invertebrados. Para el caso del Golfo de México, esto será crítico en el sur de los Everglades, en el delta del Mississippi (EUA), el sistema lagunar-estuarino de Alvarado (Veracruz), el gran sistema laguna de Términos delta Grijalva-Usumacinta en Campeche y Tabasco, el sistema Chetumal (Quintana Roo) y los Petenes en la península de Yucatán.

Durante los periodos de ARNM, los humedales costeros sólo podrán persistir cuando su acreción vertical sea a una tasa igual o mayor que el ARNM. Para ello el suministro de sedimentos es crucial (Day *et al.*, 2008, 2009a). Diversos estudios han mostrado que los humedales costeros pueden tener acreción a una tasa igual al valor histórico de 1 a 2 mm/año (Gornitz *et al.*, 1982; Cahoon, 2006) y persistir por cientos de años (Orson *et al.*, 1987). Sin embargo, dado las predicciones del ascenso acelerado del nivel del mar para las próximas décadas, la acreción del suelo en la mayoría de los humedales deberá ser de 2 a 9 veces más alta que en el siglo xx, para poder sobrevivir. Excepcionalmente, algunos humedales en el norte del Golfo de México, como en el delta del Mississippi, están mostrando una acreción mayor a 10 mm/año (Day *et al.*, 2000, 2008, 2009a). Aunque los humedales puedan mostrar importante acreción, el estrés persistente terminará por provocar la muerte del humedal. El ascenso del mar combinado con disminución del aporte de agua dulce, incrementará la intrusión salina en el subsuelo, estresando significativamente a los humedales dulceacuícolas asociados a la planicie costera. Este conjunto de anomalías conforman el principal impacto del cambio climático a los humedales de la zona costera en el Golfo de México (Thieler y Hammar-Klose, 2001; Greening *et al.*, 2006; Day *et al.*, 2008, 2009a).

La vegetación de los humedales costeros vive en la zona intermareal caracterizada por la alternancia entre inundaciones y drenaje, suelos saturados de agua, abatimiento del oxígeno, estrés de temperatura y salinidad, y la producción de toxinas naturales como “sulfitos” que inhiben el crecimiento de las plantas (Mendelsohn y Morris, 2000). Para resolver estas condiciones severas, la vegetación costera tiene diferentes adaptaciones incluyendo la producción de raíces “aéreas” y tejido arénquimático para capturar y retener el oxígeno requerido. Pero estas adaptaciones permiten sobrevivir solamente si el promedio del nivel del agua permanece constante, puesto que las plantas permanecen estresadas progresivamente y finalmente mueren, si las inundaciones persisten por largo tiempo (McKee y Patrick, 1988). Adicionalmente el incremento del ARNM resulta ahora en un severo estrés para la integridad ecosistémica de los humedales costeros. Esto es particularmente cierto en el Golfo de México, donde el cambio climático puede resultar en una dramática alternancia de reducción del agua dulce o el exceso de ella, provocando una combinación de tensores entre salinización de suelos, sobresaturación hídrica, abatimiento del oxígeno y contrastes del potencial hidrógeno (Day *et al.*, 2009a; Yáñez-Arancibia *et al.*, 1998, 2007a, 2008).

La tasa a la cual ocurre la acreción sedimentaria (Elevación Relativa del Suelo ERS) está en función de la combinación de aportes tanto orgánicos como inorgánicos y el éxito en la formación de suelo (Day *et al.*, 1997, 2009a, 2009b; figura 3). Pero ambos dependen fuertemente de la ERNM. La materia orgánica se deriva principalmente por el crecimiento de las raíces de las plantas, mientras que el material inorgánico es principalmente aportado en la forma de sedimentos provenientes tanto del continente como del océano en intensas interacciones estuario-mar (Twilley, 1988; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007b). Los sedimentos fluviales son generalmente más importantes porque su aporte es más frecuente. El agua de los ríos amortigua la intrusión salina y el fierro que provoca precipitación tóxica de “sulfitos” (DeLaune y Pezes-



**Figura 3.** Modelo conceptual del funcionamiento deltáico como ocurre en el Golfo de México.

El modelo muestra como los pulsos naturales de agua dulce, nutrientes y sedimentos, favorecen la productividad y la formación de suelo, y amortiguan el Ascenso Relativo del Nivel del Mar (ARNM). La formación de suelo alterna fracciones orgánicas e inorgánicas, y la producción de materia orgánica depende de la acreción y la Elevación Relativa del Suelo (ERS), un balance entre ARNM y la formación de suelo. Los símbolos (+) y (-) indican donde las interacciones ecológicas son positivas o negativas.

Este funcionamiento es un proceso clave para comprender como el cambio climático impacta y donde vulnera los ecosistemas costeros en el Golfo de México. Modificado de Day *et al.* (1997) in Day *et al.* (2009a) y Yáñez-Arancibia *et al.* (2009a).

hki, 2003; DeLaune *et al.*, 2003). Muchos ríos en el Golfo de México aportan cada vez menos sedimentos inorgánicos en comparación con su aporte histórico. Por ejemplo, la contribución sedimentaria inorgánica hacia el delta del Mississippi ha decrecido al menos 50% desde 1860, debido a la construcción de presas en el río Missouri, con lo cual se ha magnificado la pérdida de humedales (Kesel, 1989; Meade, 1995). Algunas proyecciones de la disminución casuística de la descarga de agua dulce en el norte del Golfo ha sido mencionadas por Day *et al.* (2005), pero otras proyecciones para el sur del Golfo indican mayores descargas por lluvias intensas en las altas montañas (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007a, 2008).

## EL ECOSISTEMA DE MANGLAR EN ESTE PLANTEAMIENTO

Los manglares constituyen un importante recurso forestal en toda la banda intertropical del planeta (aproximadamente  $240 \times 10^3 \text{ km}^2$ . Yáñez-Arancibia y Lara-Domínguez, 1999). Re-

cientemente FAO (2007) estima 3 242 754 ha para África, 6 047 798 ha para Asia, 2 018 537 ha para Oceanía, 2 358 105 ha para América del Norte/Central/y Caribe, y 2 037 764 ha para Sudamérica. Son los árboles que sostienen la biodiversidad de los ecosistemas costeros tropicales, en los humedales forestados intermareales y áreas de influencia tierra adentro. En México, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos indicó en el Inventario Forestal Nacional de los años 70s una superficie de  $1.5 \times 10^6$  ha; pero el Inventario Forestal de Gran Visión de 1992 señaló que sólo quedan en existencia poco más de  $500 \times 10^3$  ha, reflejando una tasa de deforestación de 60% en esos 20 años. En el año 2002 las cifras para México señalan la existencia de 882 032 hectáreas (FAO, 2007), lo cual implica dos cosas, o una estimación equivocada para 1992, o un incremento de áreas de manglar para el 2002. Las acciones antrópicas, por contaminación y cambio de uso del suelo, acrecientan las amenazas y riesgos naturales y esto ha sido más catastrófico que el propio cambio climático global.

La ubicación de estos humedales forestados en la interfase tierra-mar (formando conjuntos interdependientes) liga el ambiente marino-costero con el paisaje terrestre-costero (Twilley, 1988; Yáñez-Arancibia *et al.*, 1993, 2007b). Aún cuando los manglares predominan en zonas de mayor influencia de sedimentos terrígenos (*e.g.* deltas fluviales, lagunas costeras y estuarios), también pueden ser encontrados en la línea de costa de plataformas carbonatadas, con limitada o nula influencia de drenaje dulce-acuícola superficial (Lara-Domínguez *et al.*, 2005). Esta heterogeneidad de hábitats y contrastes hidrológicos, fisiográficos y geomorfológicos, da como resultado diversos ecosistemas de manglar, cada uno con características específicas de estructura y función (Twilley *et al.* 2006, *e.g.* ribereño, de borde, de cuenca, de hamacas, o enanos). Aunque existen relativamente pocas especies de árboles costeros en ecosistemas de manglar (*e.g.* 54 especies), los componentes de biodiversidad de estos ecosistemas son únicos debido a que incluyen nichos estructurales, son fronteras a nivel de eco-regiones, y actúan como refugio para numerosa fauna y especies microbianas (Yáñez-Arancibia y Lara-Domínguez, 1999). Estas especies halofíticas se reúnen en 8 familias que contienen mangles verdaderos y 12 géneros: Avicenniaceae (*Avicennia*), Chenopodiaceae (*Suaeda*), Combretaceae (*Laguncularia*, *Lumnitzera*), Meliaceae (*Conocarpus*, *Xylocarpus*), Myrsinaceae (*Aegiceras*), Plumbaginaceae (*Aegialitis*), Rhizophoraceae (*Rhizophora*, *Bruguiera*), Sonneratiaceae (*Sonneratia*); incluyendo un total de 11 especies en el nuevo mundo y 36 en el Indo Pacífico y África, estando representadas en México 4 especies: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (FAO, 2007).

El paisaje costero donde se desarrollan los manglares, es vulnerable por fuerzas naturales episódicas de alto impacto (*e.g.* huracanes, deslizamientos de tierras, subsidencia, diapirosmo de lodo, aumento acelerado del nivel medio del mar, y cambio climático global. Kjerfve *et al.*, 1991; Snedaker, 1993). En el siglo XXI, los sistemas económicos, sociales y ecológicos del Golfo de México y Caribe, tienen un gran desafío en intensificar esfuerzos dirigidos al conocimiento y a la mitigación del cambio climático global, donde una gran limitante es la poca comprensión de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas costeros de la región (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007b, 2009; Heileman y Rabalais, 2008; Heileman y Mahon, 2008).

El fenómeno de “El Niño” combinado con los efectos que induce la ruptura de la capa de ozono atmosférica, y el efecto invernadero sobre el planeta, están afectando los patrones de temperatura, precipitación pluvial, depresiones tropicales, huracanes, descarga de ríos, y variación del nivel medio del mar, induciendo nuevas incertidumbres en la estabilidad ambiental de los hábitats críticos (Tarazona *et al.*, 2001). Los manglares no son la excepción, pero muestran sutiles evidencias para contender, con mejor éxito que otros humedales costeros, frente a esta nueva variabilidad física ambiental de ritmo acelerado (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1998; Twilley *et al.*, 1999). México es uno de los países comprometidos con este desafío, lo cual ha sido claramente expresado en el documento publicado por la Semarnap (1997), denominado “México Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”. Aquí se destaca de manera puntual a la zona costera como el escenario base para la comprensión de la problemática del cambio global y la vulnerabilidad de los ecosistemas. Humedales costeros, cuencas bajas de los ríos, sistemas deltaicos, lagunas costeras, y la línea de costa, muestran pérdida de hábitats críticos por subsidencia, variación del nivel medio del mar, y erosión litoral, como efecto al cambio climático global particularmente evidente en el Golfo de México. Esto induce inestabilidad ecológica y agrega un elemento de riesgo en los proyectos de desarrollo económico y social en las costas.

## **ESTRUCTURA, BIODIVERSIDAD FUNCIONAL Y VALORACIÓN DEL ECOSISTEMA**

Los efectos producidos por el cambio climático global, están siendo evidentes a mayor celeridad que lo estimado hace treinta años. Es decir, en periodos cortos o, más aún, en tiempo real, el hombre está observando colapsos ecológicos y su efecto en los sistemas sociales y económicos como consecuencia que se atribuye al cambio climático global. La intensidad específica del fenómeno “El Niño” en los periodos 1982-1983 y 1997-1998 son las principales alarmas con que finalizó el siglo XX (Tarazona *et al.*, 2001). Si se intenta analizar la capacidad de los ecosistemas de manglar para responder a los efectos del cambio global y visualizar medidas de mitigación, es preciso comprender la dinámica del ecosistema (es decir, su estructura funcional), su biodiversidad funcional (o sea, el papel ecológico de sus componentes estructurales conspicuos), así como también estimar económicamente los servicios del ecosistema (la valoración de las funciones ecológicas). Así fue planteado originalmente por Yáñez-Arancibia *et al.* (1998), enfatizando en una hipótesis principal indicando que estos ecosistemas de humedales forestados tienen, paradójicamente, una gran capacidad de acomodación al mismo tiempo de su alta fragilidad como hábitat crítico, lo cual les permite contender con mejor expectativa que otros humedales costeros, frente a la variabilidad ambiental que está induciendo el cambio climático global.

### **Estructura funcional**

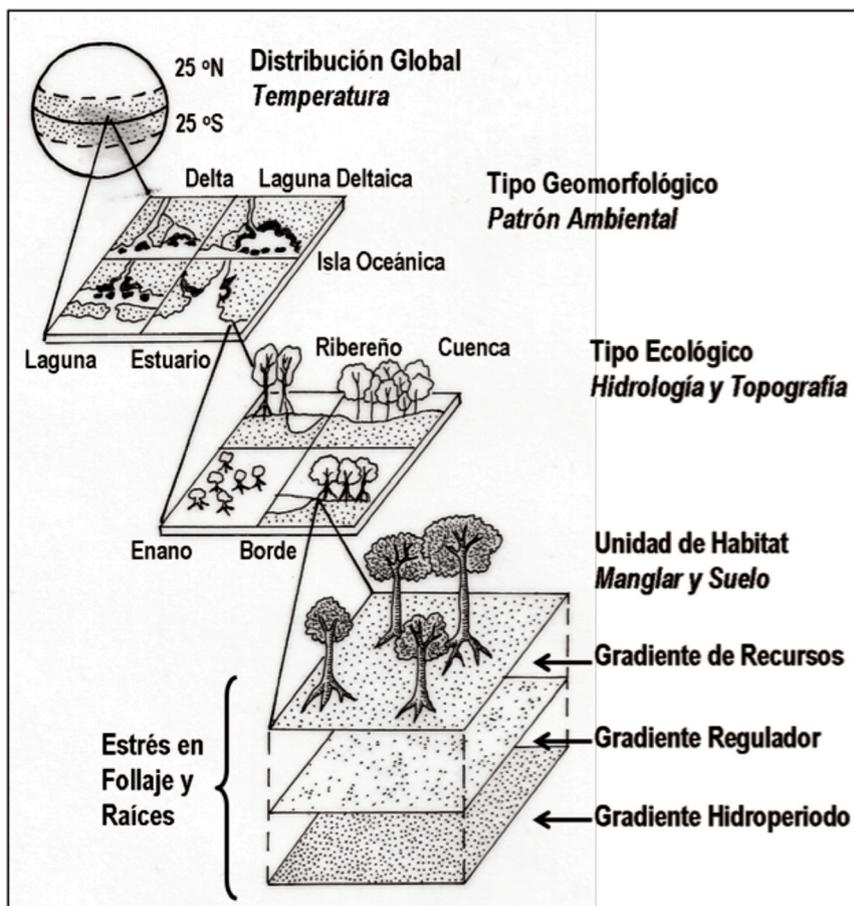
El mosaico de hábitats de manglares provee gran variedad de componentes de biodiversidad que son importantes para la función y calidad ambiental de los ecosistemas estuarinos tropica-

les. La función ecológica dominante de los manglares es el mantenimiento de hábitats costero-marinos y la provisión adicional de alimento y refugio para una gran variedad de organismos a diferentes niveles tróficos. Además los manglares juegan un papel principal en mantener la calidad del agua y la estabilidad de la línea de costa, controlando la concentración y distribución de nutrientes y sedimentos en aguas estuarinas. Estos pantanos forestados son únicos donde las mareas modulan el intercambio de agua, nutrientes, sedimentos y organismos entre ecosistemas costeros intermareales tropicales. También los ríos y sus cuencas bajas vinculan la descarga de sedimentos y nutrientes desde el continente, modulando la productividad y biogeoquímica de estuarios tropicales, acoplándose esta dinámica con ecosistemas vecinos. Las múltiples funciones de los manglares inducen una productividad primaria y producción secundaria muy alta en costas tropicales.

Los manglares se presentan dentro de cinco grupos básicos de ambientes costeros, dependiendo de una combinación de energías geológicas, incluyendo la influencia relativa de la precipitación pluvial, descarga de ríos, amplitud de mareas, turbidez y fuerza del oleaje (Twilley *et al.*, 1996. *e.g.* Manglar de cuenca, manglar ribereño, manglar de borde, manglar de islotes o hamacas, manglar enano), esencialmente en litorales con influencia de sedimentos terrígenos (deltas fluviales, lagunas deltaicas, lagunas costeras, estuarios). La distribución espacial de estos tipos ecológicos dentro de la zona costera puede ser ilustrada en el gradiente de la figura 4 de Twilley *et al.* (1996).

Los dos tipos de clasificación de los ecosistemas de manglar, el geológico y el ecológico, representan diferentes niveles de organización del paisaje costero y en conjunto pueden ser usados para integrar diferentes escalas de factores ambientales que controlan los atributos de la estructura forestal de los manglares (figura 5). Las hojas producidas en el follaje del manglar, influyen en el ciclo de nutrientes inorgánicos en el piso del bosque, y la exportación de materia orgánica hacia las aguas costeras oceánicas (figura 6).

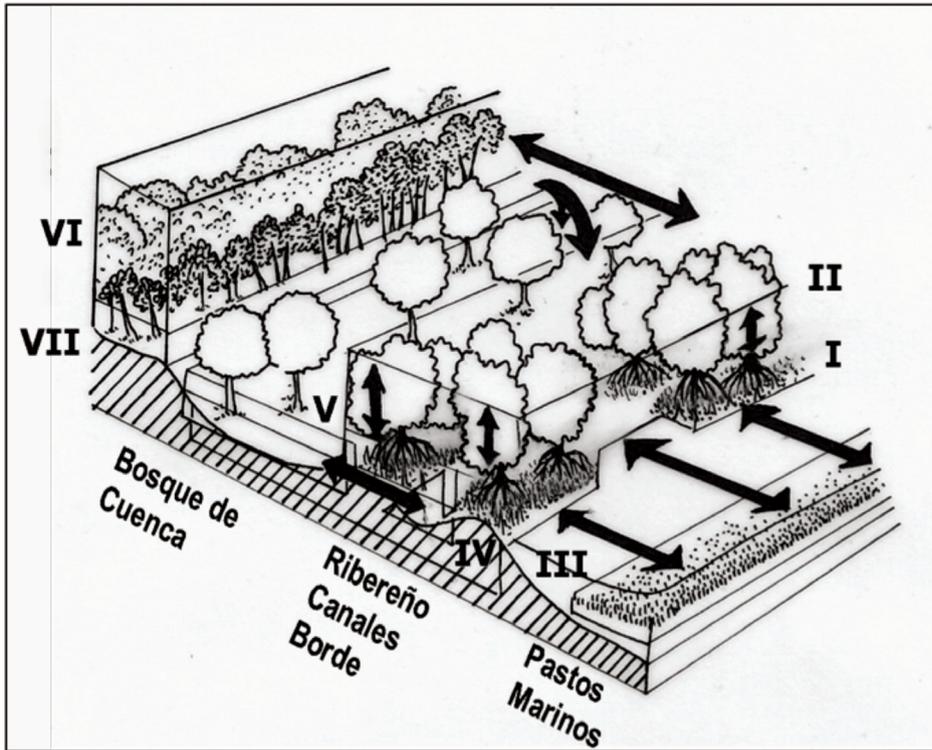
Está bien documentado por Twilley (1988), Twilley *et al.* (2006), Twilley y Day (1999), Lugo (1999) y Medina (1999), que la dinámica de la foliación del manglar, incluyendo productividad, descomposición y exportación, ejerce influencia en los presupuestos de nutrientes y materia orgánica en el ecosistema. Los manglares son ecosistemas forestados y muchas de las funciones ecológicas de ciclos de nutrientes descritas para bosques terrestres, pueden ocurrir también en estos bosques de humedales intermareales. Así, el ciclo del nitrógeno en el follaje del bosque está acoplado con la dinámica de los nutrientes en los suelos del mismo, y estos están influidos por la ecología nutricional que es especie-específico en estos árboles. La acumulación de hojarasca sobre el piso del manglar puede ser un importante factor para la inmovilización de nutrientes durante la descomposición (figura 6). La concentración del nitrógeno en la hojarasca, generalmente se incrementa durante la descomposición sobre el piso del bosque, siendo una función de la demanda de este sustrato por la micro biota que coloniza el detritus. En bosques de *Rhizophora* la tasa de descomposición de hojarasca es más baja y la inmovilización de nitrógeno es más alta, que en bosques de *Avicennia*, como resultado de una alta tasa C: N. Sin embargo, hay evidencias que la retranslocación de nutrientes previo a que ocurra la



**Figura 4.** Sistema de clasificación jerárquica para describir diversos patrones de estructura y funcionamiento de los manglares, basado sobre factores que controlan la fisiografía, la concentración de recursos de nutrientes y tensores en el suelo. Por ejemplo, global (temperatura), regional (geomorfológico), local (ecológico) y los tensores en el follaje y raíces. Adaptado de Twilley, Snedaker, Yáñez-Arancibia y Medina (1996).

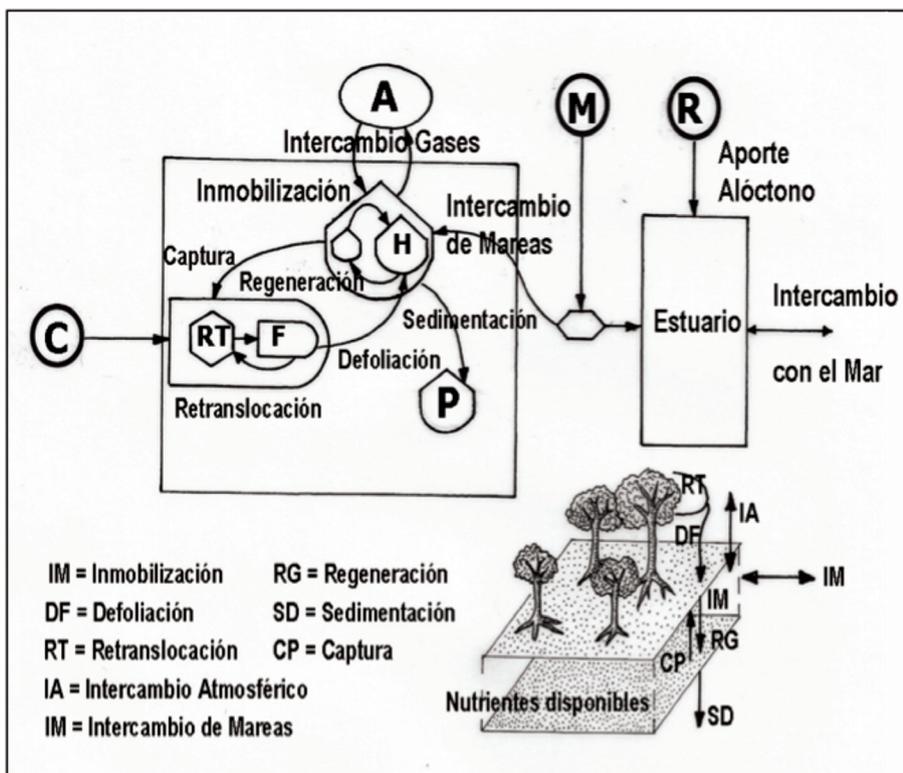
defoliación, es mayor en *Rhizophora* que en *Avicennia*, contribuyendo esto a la alta tasa C: N en hojarasca de *Rhizophora*. Esto sugiere que más nitrógeno puede ser reciclado en el follaje de los bosques dominados por *Rhizophora* que en *Avicennia*. Complementariamente, la mayor remineralización de nitrógeno en la hojarasca de *Avicennia* puede suplir la alta demanda de nitrógeno en el follaje.

La productividad de los manglares, tanto primaria como secundaria, generalmente se asocia con el concepto de “exportación” en el ecosistema lagunar-estuarino (Twilley, 1988; Twilley *et al.*, 1996; Yáñez-Arancibia y Lara-Domínguez, 1999; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007b) (figura 6). Esto se explica por la característica de los manglares de ubicarse en un ambiente modulado por la amplitud de las mareas y el flujo de los ríos. Por otra parte, la productividad de estos bos-



**Figura 5.** Tipos ecológicos de manglares y su distribución espacial dentro de la zona intermareal. Las flechas y los números romanos definen la ubicación y el movimiento de siete unidades específicas (ver Figura 4) por asociación de hábitats principales en los tipos de manglares. (I) Litoral/sub litoral, (II) Follaje arbóreo, (III) Comunidad bentónica e infauna, (IV) Comunidad de canales de mareas, (V) Comunidad de la cuenca, (VI) Comunidad arbórea tierra adentro, (VII) Comunidad terrestre tierra adentro. Adaptado de Twilley *et al.* (2006).

ques se relaciona con la fisiografía y el origen geológico del paisaje donde se sitúan, así como de sus respectivas características hidrológicas. Esta conclusión se basa principalmente sobre el intercambio de materia orgánica en los manglares, aunque hay evidencias que el reciclamiento de nutrientes puede también variar a lo largo de un continuo en hidrología. El tiempo de residencia de la hojarasca en el piso del bosque está fuertemente modulado por la frecuencia del flujo de la marea y el volumen de descarga de agua dulce. A nivel global, el promedio de exportación de carbón desde los manglares es aproximadamente  $210 \text{ gCm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , con rango que varía entre  $1.86$  a  $420 \text{ gCm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  y, aproximadamente, 75% de este material es carbón orgánico disuelto. Desde luego, la variación del nivel medio del mar, la amplitud de la marea, y los eventos de pluviosidad, pueden también incrementar la exportación de carbón orgánico desde los manglares. El patrón de exportación de hojarasca y detritus orgánico particulado desde los manglares no está exclusivamente restringido a fuerzas geofísicas. En algunos casos se presentan importantes factores biológicos que influyen en la dinámica del detritus foliar,



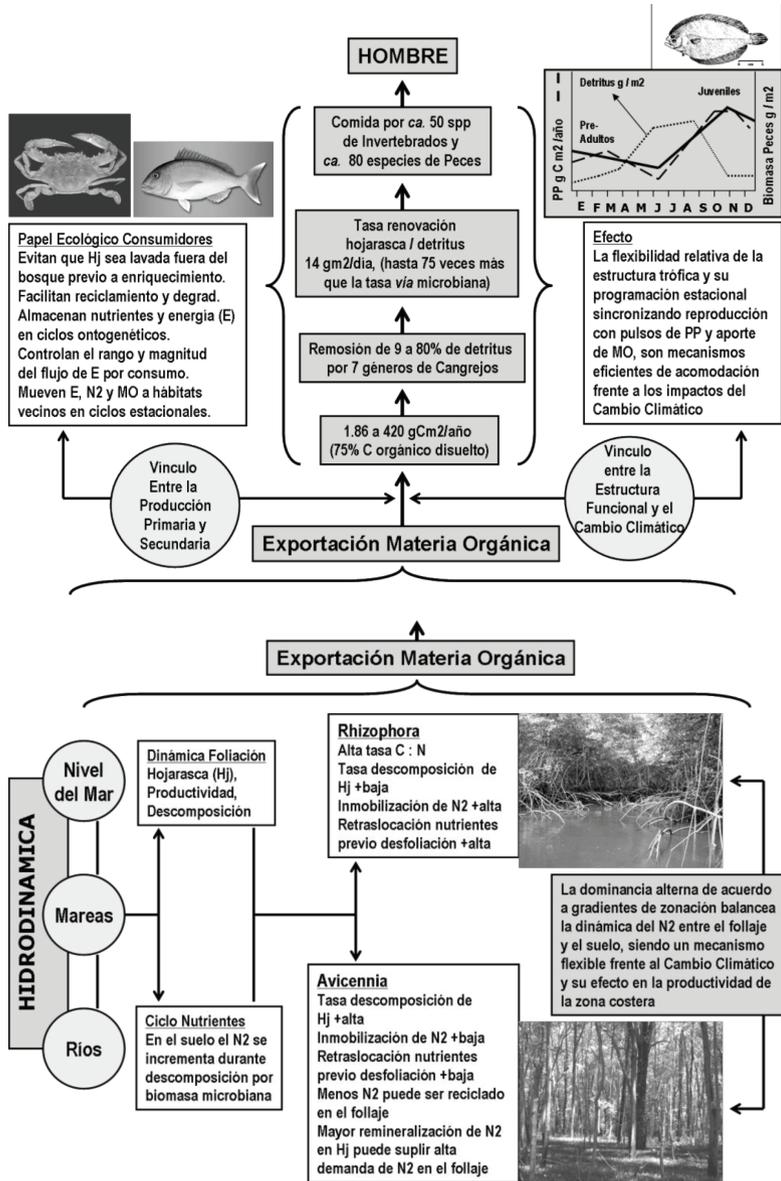
**Figura 6.** Flujos de materia orgánica y nutriente en el ecosistema de manglar, incluyendo intercambio con el estuario. Se presenta un diagrama del bosque de manglar con los recursos de nutrientes del suelo, describiéndose el acoplamiento espacial en estos procesos ecológicos. A) Atmósfera,  $N_2$  y  $CH_4$ , M) Mareas, R) Ríos, C) Anhídrido carbónico  $CO_2$ , P) Peat, H) Hojarasca con regeneración e inmovilización de nutrientes inorgánicos, RT) Raíces y tallos, F) Follaje. Adaptado de Twilley *et al.* (2006).

lo cual demuestra la importancia relativa de conocer los procesos geofísicos acoplados con la biodiversidad y su influencia sobre las funciones ecológicas del ecosistema manglar.

Estas ideas sugieren que: *la dominancia alterna de ambos géneros de acuerdo a gradientes de zonación, balancea la dinámica del nitrógeno entre el follaje y el suelo del ecosistema de manglar, con la ventaja de ser un mecanismo flexible frente al cambio climático global y su efecto en los litorales tropicales.* (figura 7).

## Biodiversidad funcional

Muchos organismos como los cangrejos desempeñan un papel importante en la estructura y flujo de energía de estos bosques a través de la dinámica del detritus de origen foliar. Aunque la alta diversidad de cangrejos y su efecto potencial en la productividad del bosque de manglar ha sido bien reconocida (*e.g. Uca, Sesarma, Chiromanthes, Cardisoma, Goniopsis, Ucides, Aratus*), existe poca información cuantitativa sobre estructura de la comunidad, dinámica de las pobla-



**Figura 7.** Flexibilidad de la estructura trófica de los macro consumidores (peces y crustáceos) y su programación estacional para sincronizar la reproducción y la incorporación con los pulsos secuenciales de productividad primaria y aporte de materia orgánica desde los manglares. Esto es un mecanismo eficiente de acomodación frente a la dinámica físico-ambiental y variabilidad que induce el cambio climático. Explicación en el texto.

ciones, e interacciones ecológicas entre los cangrejos y la producción de detritus via hojarasca (Twilley, 1988; Twilley *et al.*, 2006).

Existen evidencias que los cangrejos pueden remover por consumo entre 9% y 79% del detritus producido por hojarasca, dependiendo de la época del año, y del nivel de inundación, siendo esto uno de los principales vínculos entre productividad primaria y producción secundaria en ecosistemas de manglar (figura 7). Más aún, se ha estimado que la tasa de renovación de hojarasca/detritus *via* cangrejos (aproximadamente  $14 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), puede ser hasta 75 veces mayor que la tasa generada via micro biota. Además, el detritus particulado por los cangrejos puede luego ser comido por aproximadamente 50 especies de otros invertebrados y al menos 60 especies de peces (figura 7). Por lo tanto, el papel ecológico de estos macro-invertebrados es amplio ya que ellos: 1) Evitan que el material foliar de los manglares sea lavado fuera del bosque previo a su enriquecimiento, 2) Proveen de materia orgánica particulada a los detritívoros que requieren de partículas finas como alimento, 3) Regulan el tamaño de la materia orgánica particulada en el ecosistema, 4) Estimulan la colonización de la materia orgánica particulada por la micro fauna y micro organismos, permitiendo nutrientes disponibles para los árboles, 5) Simplifican la estructura y la composición química del detritus particulado, lo cual facilita la degradación por la micro biota, 6) Pueden afectar la estructura, composición de especies y expansión de los propágulos de los manglares, los cuales son comidos por los cangrejos entre 75 y 100% de la producción total de epicotilos germinados.

Por otra parte, los peces estuarinos -como consumidores secundarios- en los ecosistemas de manglar, pueden ser muy importantes en el flujo de energía y materiales en diferentes maneras (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1993; Yáñez-Arancibia y Lara Domínguez, 1999). Los peces pueden: 1) Almacenar nutrientes y energía, 2) Controlar el rango y magnitud del flujo de energía a través del consumo de fuentes alimentarias via pastoreo o detritus y, 3) Mover energía y nutrientes a través de las fronteras del ecosistema. En términos generales, el nécton -organismos libre nadadores- utiliza los manglares como hábitat crítico para protegerse y alimentarse en las diferentes etapas de su ciclo de vida. La mayoría de los peces en estos ecosistemas son migratorios de pequeña escala, pero algunas especies pueden ser residentes permanentes, fuertemente vinculados a la vegetación de humedales costeros (Deegan *et al.*, 1986; Pauly y Yáñez-Arancibia, 1994; Yáñez-Arancibia *et al.*, 1994). Principalmente se presentan 3 tipos de migración: 1) En ciclos diarios, 2) En ciclos estacionales y, 3) Ontogenéticos. Las migraciones diarias están en función de los hábitos alimentarios, mientras que las migraciones estacionales pueden estar relacionadas con parámetros ambientales como salinidad, temperatura, turbidez, o funciones biológicas como reproducción y reclutamiento; y todo esto en función de los pulsos de productividad primaria. Los pulsos secuenciales de producción primaria por plancton y macrófitas como los manglares, acoplados con la exportación estacional de detritus, sugieren que la liberación de materia orgánica sostiene una alta producción secundaria y diversidad de especies consumidoras dependientes estuarinas (figura 7). Las especies dominantes de peces actúan como controladoras de la estructura y función de los macro consumidores, mientras que la variabilidad físico-ambiental y productividad de los manglares modula su diversidad de

especies. A través de la banda intertropical del planeta el número de especies de peces varía en un amplio rango que depende de las condiciones locales del manglar, la latitud, y la variabilidad ambiental, oscilando entre 20 y 200 especies, o más (Yáñez-Arancibia y Lara-Domínguez, 1999; FAO, 2007).

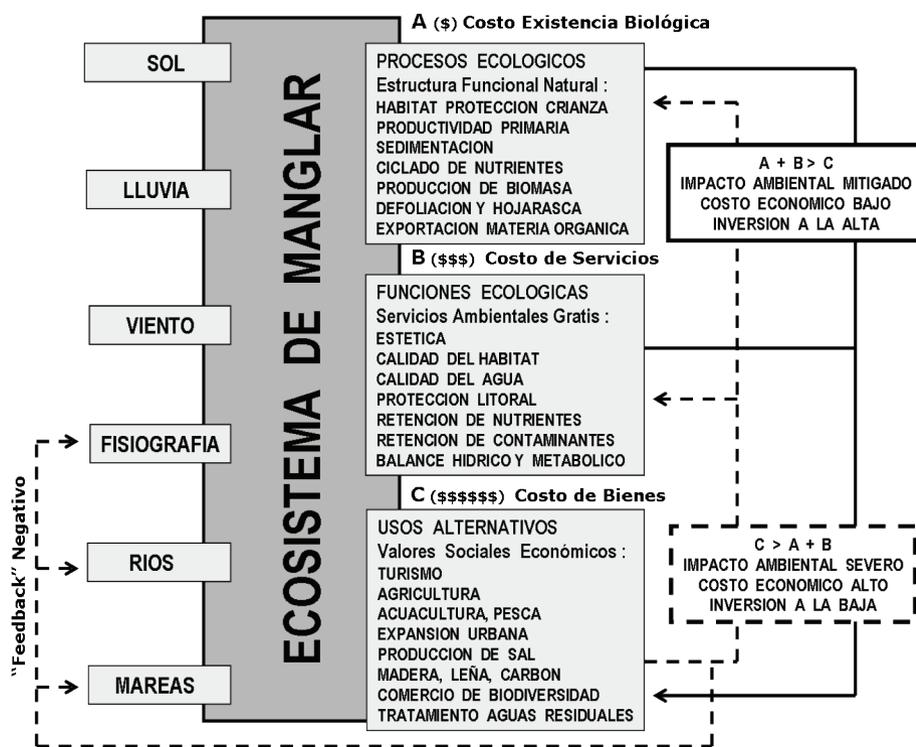
La estructura funcional de los manglares y la diversidad de hábitats que sostiene, provee alimento y refugio a esta gran diversidad de peces a diferentes niveles tróficos. Esto se refleja claramente en la estructura trófica global del nécton y en los cambios en la dieta de las especies, de acuerdo con la época del año, la edad de los peces y la disponibilidad de alimento. Los peces relacionados a los manglares muestran lo siguiente (Deegan *et al.*, 1986; Pauly y Yáñez-Arancibia, 1994; Yáñez-Arancibia *et al.*, 1994): 1) flexibilidad de alimentación en tiempo y espacio, 2) compartición de una fuente alimentaria común por un conjunto muy diverso de especies de peces, 3) cada especie captura alimento desde diferentes niveles en la trama trófica, 4) la dieta cambia con el crecimiento, diversidad de alimento, y localidad dentro del estuario, 5) diversas especies utilizan tanto el patrón pelágico (pastoreo) como el bentónico (detritus) para la obtención de alimento.

Estos elementos sugieren que: *la flexibilidad relativa de la estructura trófica de los macro consumidores (peces y crustáceos) y su programación estacional para sincronizar la reproducción y la incorporación con los pulsos secuenciales de productividad primaria y aporte de materia orgánica, son mecanismos eficientes de acomodación frente a la dinámica físico-ambiental (e.g. los efectos en el litoral por el cambio climático global).* (figura 7).

Por otra parte, la fragmentación de los paisajes del manglar crea el mismo problema -para los organismos acuáticos migratorios- que el que se asocia con la fragmentación de bosques continentales. A su vez, la fragmentación del escenario manglar-pastos marinos o manglar-corales post evento de huracán, reduce la complejidad del ecosistema y la diversidad de crustáceos y peces, afectándose la estructura de la comunidad y las pesquerías locales, debido a la desintegración de la biodiversidad funcional. Este impacto de desintegración de la comunidad ictiofaunística puede ser severo en el corto plazo, pero se presenta en seguida una recuperación notable a medio- y largo-plazo (Greenwood *et al.*, 2006; Stevens *et al.*, 2006; Paterno *et al.*, 2006; Switzer *et al.*, 2006); en gran medida por el nivel de amortiguamiento, flexibilidad ecológica, y eficiente recuperación que muestra el bosque de manglar.

### Valoración de las funciones ecológicas

Los manglares se han degradado y manifiestan una evidente pérdida de su calidad ambiental. Esto se debe a diversas razones (Yáñez-Arancibia y Agüero, 2000; figura 8): 1) Cambios en la organización social de las comunidades humanas costeras, rotando la actividad económica entre pescador, campesino y artesano, 2) Incremento en el consumo de energía *per cápita* para desarrollar la economía costera, 3) Manejo fragmentado en el sector oficial, o ausencia total de un plan de manejo, ante la presión urbana, industrial, turística, agrícola y de acuicultura, 4) Depreciación del valor ecológico y uso irracional no sostenible, 5) Poco impacto de los resultados científicos y baja disponibilidad de los mismos en términos prácticos para los usuarios del



**Figura 8.** El concepto de “Ecosistema de Manglar” integrando los procesos ecológicos que definen su estructura funcional, las funciones ecológicas que definen sus servicios ambientales, y los usos alternativos que determinan su valor social y económico. Tradicionalmente el costo de existencia biológica (A) es subvalorado frente al costo de servicios ambientales (B) y al costo de bienes (C). El diagrama muestra las consecuencias negativas de sobrevalorar (C) induciendo insustentabilidad en el manejo de estos recursos. Adaptado de Yáñez-Arancibia y Agüero (2000).

sector oficial, 6). Carencia de términos de referencia de vocación y aptitudes de la región y de evaluación ecológica y de recursos, para desarrollos productivos y, 7). Reconversión de áreas de manglar para agricultura y acuicultura insustentable que colapsa en pocos años.

El valorar económicamente los ecosistemas de manglar ha avanzado con lentitud en México, puesto que estimar el valor económico de los servicios y funciones ecológicas implica cuantificar en términos monetarios la calidad del ambiente (Barbier y Strand, 1997; Lara-Domínguez *et al.*, 1998; Agüero, 1999; Sanjurjo Rivera, 2001), y en cierta medida esto sigue siendo controvertido metodológicamente y en cierta medida muy subjetivo. Esencialmente, se deben incluir en esta valoración los usos y funciones ambientales clave que afectan actividades productivas locales y regionales, tales como el mantener la productividad de las pesquerías, contribuir a la estabilidad de la línea de costa, sostener la biodiversidad, establecer la relación con el turismo costero y determinar el uso potencial de los manglares como planta natural de tratamiento de

aguas residuales (Costanza *et al.*, 1997; Day *et al.*, 2009b). Los manglares tienen valores que pueden caracterizarse por las siguientes funciones ecológicas: 1) descarga y recarga de aguas subterráneas, 2) control de flujo y reflujo en el encuentro de las aguas dulces con las marinas, 3) control de erosión y estabilización costera, 4) retención de sedimentos, 5) retención de nutrientes, 6) mantenimiento de la calidad del agua incluyendo transformación de nutrientes, 7) estabilización micro climática, 8) amortiguamiento de los contaminantes de ecosistemas vecinos, 9) recreación y esparcimiento, 10) integración biológica y, 11) hábitats de una alta biodiversidad.

Se han estimado valores de servicios ambientales para la zona costera y humedales asociados, que son mucho más altos que para ecosistemas oceánicos o continentales (Costanza *et al.*, 1997). Por ejemplo, esos autores han estimado en dólares por hectárea/año los siguientes valores: estuarios (22 832), pastos marinos y lechos de algas (19 004), arrecifes de coral (6 075), plataforma continental (1 610), humedales globales (14 785), pantanos de mareas y manglar (9 900), pantanos y planicie costera (19 500); todo esto considerando 17 parámetros de bienes y servicios que fueron valorados. Estudios específicos han señalado que la valoración económica total de los manglares puede variar entre 38 dólares y 77 mil dólares por hectárea, dependiendo del método de valoración, el número de servicios ecológicos valorados, la latitud, el entorno social, la percepción económica, y la presión por el uso del suelo para reconvertir los hábitats (Agüero, 1999). Asimismo, el establecimiento de actividades humanas en zonas costeras generalmente no incluye en sus estimaciones los valores de uso indirecto y de no-uso que pudieran ser impactadas por dicha actividad.

La valoración económica de los manglares se justifica (urgentemente) en términos de que la asignación actual de inversión o gasto público para estos recursos, ya sea para su conservación, o para su reconversión en hábitats alternativos, generalmente no refleja el valor que la sociedad y la tendencia internacional les otorga, particularmente al decidir su importancia en la integridad ecológica de la zona costera. Este planteamiento sugiere que: *sin duda, es una necesidad para la gestión ambiental valorar económicamente los ecosistemas de manglar, y obtener indicadores cuantitativos del daño económico por su degradación, ya sea por eventos naturales, acciones antrópicas, o el cambio climático global* (figura 8).

## **RESPUESTAS ESPERADAS DEL ECOSISTEMA AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL**

Como los manglares son uno de los más emblemáticos hábitats críticos costeros en latitudes tropicales y subtropicales alrededor del mundo, el impacto costero ante el cambio climático tendrá significado ecológico, económico y social sobre este tipo de ecosistemas. Por sus características reproductivas, los manglares pueden acusar importantes respuestas sensitivas, estructural y funcionalmente, a los cambios climáticos. Otros humedales costeros salobres o dulceacuícolas y los pastos marinos, muestran una variabilidad más pronunciada en periodos cortos debido a fluctuaciones estacionales e interanuales y su tasa de renovación es muy rápida, por lo cual se dificulta su rápida adaptabilidad frente al cambio climático global.

UNEP (1994) presenta resumidamente los cambios esperados en la concentración de gases atmosféricos, en el promedio de temperatura global, y en el promedio del nivel del mar, según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Se conoce que el calentamiento global puede estar causado por los gases del efecto-invernadero. Estos son gases que pueden absorber la radiación infrarroja. La absorción de radiación térmica de onda larga en la atmósfera evita el escape de la energía térmica, provocando el incremento marcado de la temperatura de la atmósfera. La tabla 1 resume las principales respuestas esperadas de los ecosistemas costeros tropicales (manglares), frente a las predicciones sobre el cambio climático (IPCC, 2007). Los ecosistemas tropicales estuarinos son también vulnerables a los cambios en el medio ambiente costero debido a las perturbaciones que resultan del incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera. El  $\text{CO}_2$  y otros gases de efecto invernadero pueden llegar en el 2050 al doble de la concentración presente al comienzo de la revolución industrial a fines del siglo XIX, aumentando la temperatura superficial del planeta de 2 a 5 °C. Si la temperatura promedio se incrementa 3 °C para el 2050 y permanece constante, el nivel del mar se incrementará aproximadamente 1 m, ó más, para el 2100. Un calentamiento global de 6 °C para el 2100 podría resultar en un incremento del nivel del mar de 2.3 m (> 100 cm por cada 100 años según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Estos números son mayores que la tasa de incremento actual del nivel del mar, y son significativos en relación al ARNM observado durante la última fase del Holoceno.

Existe controversia sobre la tolerancia de los manglares al incremento del nivel del mar. Los manglares son un componente fundamental en los estuarios tropicales y se presentan en la interfase entre la tierra y el mar; por lo tanto, son muy sensitivos a los cambios en el nivel del mar. Algunos sostienen que incrementos entre 12 y 27 cm por cada 100 años harán colapsar estos ecosistemas; por el contrario, descensos del nivel del mar producirían una mayor expansión de estos bosques. Esto último no ha sido pronosticado en ninguna hipótesis alterna. Pero, sobre el ARNM, hay evidencias que los manglares no se verían afectados significativamente con ascensos entre 50 y 80 cm por cada 100 años (*e.g.* como se ha observado en Belice, Jamaica y Florida). Incluso durante los últimos 56 años, los manglares de Key West Florida se han expandido hacia el mar y hacia el continente, a pesar de los huracanes y aún con un incremento del nivel del mar equivalente a 23 cm por cada 100 años. Los cambios en la riqueza de especies de los manglares durante la migración horizontal hacia el continente, en respuesta a los cambios del nivel del mar, dependen de las respuestas específicas de cada especie del manglar al incremento en la inundación y erosión, y a los efectos del tamaño del propágulo y ritmo de la marea a lo largo de la zona intermareal, aunado a las anomalías inducidas por el paso de huracanes (Proffitt *et al.*, 2006; Milbrandt *et al.*, 2006). Estos dos factores indican que la profundidad de la inundación mareal puede ser el principal factor en regular la zonación de especies con el ascenso del nivel del mar. La mayoría de los estudios señalan que *Rhizophora* es más tolerante a la baja disponibilidad de oxígeno causada por la inundación mareal y la acumulación de agua que *Avicennia*. Si no hay barreras geográficas continentales, los manglares pueden migrar tierra adentro manteniendo a prudente distancia el incremento del nivel del mar. Asumiendo como constantes

**Tabla 1.** Principales respuestas esperadas de los ecosistemas costeros tropicales frente a las predicciones sobre los cambios climáticos. Basado en Snedaker (1993), UNEP (1994), Yáñez-Arancibia *et al.* (1998), Day *et al.* (2008).

**Incremento del nivel medio del mar:**

- La comunidad de manglar progradará tierra adentro si hay suficiente ambiente sedimentario y sin obstáculos topográficos.
- La erosión sobre el margen litoral se incrementará.
- El rango del nivel medio del mar determinará el nivel de restablecimiento de los manglares, dunas y humedales costeros.
- La productividad secundaria (y primaria acuática) se incrementará por la mayor disponibilidad de nutrientes y debido a la erosión y resuspensión.

**Incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico:**

- La fotosíntesis del follaje de los manglares no se incrementará significativamente.
- La eficiencia de los manglares en el uso del agua se mejorará. Esto puede o no verse reflejado en el crecimiento.
- No todas las especies de manglares responderán de igual manera.

**Incremento en la temperatura atmosférica:**

- Algunas poblaciones de manglares extenderán su distribución hacia latitudes mayores.
- En muchas especies de manglares habrá cambios en los patrones fenológicos, reproductivos y de crecimiento.
- Se incrementará la productividad neta global del ecosistema de manglar.
- La biodiversidad de plantas y animales en los manglares se incrementará (beneficios de microclima) y cambiará la composición florística y faunística.
- Se acelerarán los procesos microbianos en los manglares, en la interfase agua-sedimento.

**Cambios en el patrón de lluvias:**

- Los cambios en el contenido de agua del suelo y salinidad del sustrato, tendrán significativo impacto sobre el crecimiento de los manglares.
- Un incremento de la precipitación sobre la tasa de evapotranspiración incrementará la tasa de producción primaria de los manglares.
- Un incremento en la salinidad del suelo reducirá la productividad primaria y crecimiento de los manglares.
- La fauna eurihalina no se verá afectada por el incremento en salinidad, pero la distribución de especies estenohalinas se alterará significativamente.

**Impacto esperado de los cambios climáticos sobre el uso del suelo, utilización y deforestación de los manglares:**

- Se incrementará el riesgo de inundación de tierras bajas en la planicie costera.
- Se incrementará la erosión de los litorales blandos vulnerables en lagunas costeras, estuarios y deltas fluviales.
- Se incrementará el riesgo de intrusión salina.
- Se incrementará la frecuencia del daño causado por tormentas y huracanes.

otros factores ecológicos, *Rhizophora* con propágulos de gran tamaño y mayor tolerancia a las inundaciones invadiría y dominaría las zonas altas previamente ocupadas por *Avicennia* y *Laguncularia*, las cuales se retraerían hacia la nueva zona salina somera intermareal formada hacia el interior. Los manglares de borde compuestos básicamente por *Rhizophora* irían desapareciendo paulatinamente de la línea frontal en correspondencia con su nueva distribución hacia el interior.

La temperatura es el factor climático básico que modula los límites de distribución de los manglares hacia el norte y hacia el sur del planeta (*e.g.*, como está ocurriendo con el avance de los manglares hacia el norte en el Perú, hacia el sur en Santa Catarina, Brasil, y hacia el norte en el Golfo de México, observación personal de los autores). Se ha señalado que los bosques de manglares responderían a la disminución de la temperatura reduciendo la riqueza de especies, simplificando la estructura del bosque (altura y biomasa). Aunque el promedio de temperatura del aire y del agua muestra alguna correlación con la distribución de los manglares en el mundo (FAO, 2007), las temperaturas extremas pueden ser el principal factor de control. *Avicennia* y *Laguncularia* parecen ser más tolerantes a las temperaturas frías en el neotrópico que *Rhizophora*. Las diversas tolerancias a las bajas temperaturas entre diferentes especies de manglar, generalmente se infiere a su distribución natural y adaptaciones morfo-fisiológicas, metabólicas y reproductivas. Sin embargo, se ha demostrado que la diversidad genética influye en la tolerancia de los manglares al cambio climático global (R. Twilley, comunicación personal). La figura 2 muestra la nueva distribución de los manglares en el Golfo de México y aún la costa Atlántica de la Península de Florida y estos resultados fueron ya presentados en *Coastal & Estuarine Research Federation 19th Biennial Conference, Providence Rhode Island* (Day, 2007). En esa porción del Golfo normalmente los manglares son achaparrados y mueren periódicamente, o son severamente fragmentados por los fríos y escarcha. Sin embargo, después de 20 años sin escarcha (la última fue en diciembre de 1989, según *United States Geological Survey* in Day (2007), en las costas de Texas, Louisiana y el noreste de la Florida, el manglar negro (*Avicennia germinans*) se está expandiendo rápidamente en Texas y Louisiana, a la vez que el manglar rojo (*Rhizophora mangle*) está siendo reportado al norte de su registro histórico en Florida. Actualmente, *Avicennia* en Port Fourchon (Louisiana, EUA), y Harbord Island (Texas, EUA), está desplazando rápidamente a otra vegetación en humedales salobres, y esto puede ser fácilmente detectado con imágenes Landsat. Algunos árboles de *Avicennia* en Louisiana alcanzan ahora más de 8 centímetros de diámetro y más de 4 metros de altura. *Rhizophora* es más susceptible al daño causado por la escarcha, y aunque los propágulos son llevados por las corrientes tanto desde México como desde la Florida, los pequeños retoños no son persistentes todavía, pero se observan plántulas de presencia anual. El manglar blanco (*Laguncularia racemosa*) y el manglar botoncillo (*Conocarpus erectus*) están restringidos por la intolerancia a la escarcha y no se han encontrado al norte de Cedar Key (Florida, EUA). Richard H. Day (comunicación personal) ha reportado en 2009 las cuatro especies de manglar del Golfo como habitantes regulares de los humedales costeros en el estado de Texas (CERF Abstract Proceedings 2009, [www.erf.org](http://www.erf.org)). La consecuencia del reemplazo de los humedales salobres por manglares en el norte del Golfo

de México, incluye cambios en la estructura trófica del detritus orgánico, nuevos hábitats para juveniles de peces, y alternativa adicional de anidación de aves costeras (Day, 2007).

Estudios recientes (Day *et al.*, 2008, 2009a) indican que la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes se están incrementando bajo condiciones de calentamiento climático incidiendo directamente sobre estos humedales costeros. Puesto que los manglares están distribuidos en latitudes donde la frecuencia de huracanes es alta, es importante comprender cómo estos eventos afectan el desarrollo de los bosques (*e.g.* estructura del bosque, composición de especies) y la dinámica de la comunidad del ecosistema de manglar, incluyendo biodiversidad. Aún cuando el efecto es evidente en la defoliación, producción de hojarasca y la mortalidad de los árboles, también hay evidencias de una rápida recuperación por este daño (A. Lugo, R. Twilley, comunicación personal), aunado al papel que juega la dinámica del suelo controlando el crecimiento y desarrollo de los árboles.

## CONCLUSIONES

### REVISITANDO LA HIPÓTESIS

El cambio climático global está afectando la dinámica natural de la biosfera. La zona costera es una eco-región sensible donde los cambios inducidos y sus efectos, se están apreciando en tiempo real, con mayor celeridad que lo previsto. Los manglares, ubicados en la interfase tierra-mar controlan interacciones entre hábitats críticos de los humedales costeros con el océano adyacente. No obstante, son ecosistemas frágiles que están acusando el impacto frente al cambio climático, pero existen evidencias que estos humedales forestados tienen gran capacidad de acomodación para contender con mejor éxito que otros sistemas naturales, frente a esta variabilidad físico ambiental de ritmo acelerado que muestra el cambio global.

La respuesta final de los ecosistemas de manglar estará determinada por el balance dinámico entre la tasa de incremento del nivel del mar, la descarga de agua dulce, la acreción sedimentaria, la migración lateral potencial, y la temperatura. Cuando el incremento del nivel del mar es mucho mayor que la acreción sedimentaria, y la erosión y migración de la línea de costa sobrepasa la tasa a la cual pueden migrar los manglares, el ecosistema se sumergirá y será reemplazado por un ambiente costero marino. Si la tasa del incremento del nivel del mar es mayor que la acreción sedimentaria, pero la tasa de traslado de la línea de costa no sobrepasa la capacidad del ecosistema de migrar tierra adentro, el bosque de manglar podrá retraerse tierra adentro. Finalmente si el incremento del nivel del mar es relativamente pequeño, los manglares pueden permanecer en la línea de costa actual acumulando sedimentos en la vertical del sustrato. El ensayo predictivo de esta aproximación conceptual puede variar significativamente cuando otros factores, como el  $\text{CO}_2$  y la temperatura, son incorporados en los modelos matemáticos que actualmente se diseñan para estimar respuestas al cambio climático global (Twilley *et al.*, 1999).

Estudios existentes sugieren que la dominancia alterna entre *Avicennia* y *Rhizophora* de acuerdo con gradientes de zonación, balancean la dinámica del nitrógeno entre el follaje y el suelo del ecosistema de manglar, con la ventaja de ser un mecanismo flexible frente al cambio climático global y su efecto en los litorales tropicales. Asimismo, otros estudios sugieren que la flexibilidad relativa de la estructura trófica de los macro-consumidores (peces y crustáceos) y su programación estacional para sincronizar la reproducción y la incorporación con los pulsos secuenciales de productividad primaria y aporte de materia orgánica, son mecanismos eficientes de acomodación frente a los efectos físico ambientales del litoral por el cambio climático global (figura 7). De manera que la macro fauna asociada (peces y macro invertebrados), normalmente recursos pesqueros, también tienen respuestas de acomodación y, aparentemente, podrán ir siguiendo la huella de los manglares en sus nuevos rangos de distribución. Dado que, de manera general, los manglares son ecosistemas sub-valorados económicamente, es una necesidad para la gestión ambiental el valorarlos con precisión y el obtener indicadores cuantitativos del daño económico ocasionado por su degradación, ya sea por acciones antrópicas, o el cambio climático global (figura 8).

Existe controversia sobre la tolerancia de los manglares al incremento de gases de efecto invernadero, de temperatura, de ascenso del nivel del mar y de frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes, más aún cuando esta variabilidad se está presentando a un ritmo mayor que el inicialmente predicho por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007). Sin embargo, la estructura funcional de este sistema ecológico, así como las evidencias revisadas permiten sostener la hipótesis inicialmente planteada por Yáñez-Arancibia *et al.* (1998) que: “*los manglares como hábitat forestado crítico de la zona costera presentan respuestas de acomodación frente a la variabilidad ambiental que induce el cambio global, desarrollando un papel estructural y funcional clave en la estabilidad de la línea de costa, la persistencia de hábitats y biodiversidad, el metabolismo del ecosistema, reduciendo riesgos e incertidumbre para el desarrollo sustentable del uso de sus recursos*”.

## IMPLICACIONES EN MANEJO COSTERO

Los cambios climáticos globales son condición importante a considerar en el manejo costero integrado en el Golfo de México. Esto es así por diversas razones. El clima en el Golfo se dispersa en un rango tropical a templado que parecía estable en sus límites. Como clima cálido, la interfase tropical-templada, generalmente más oceánica que costera, se está ahora moviendo marcadamente hacia la zona costera en la porción norte y nororiental del Golfo. Inicialmente, esta interfase localizada en el sur de Florida y en la región fronteriza México-EUA en los estados de Texas y Tamaulipas (Yáñez-Arancibia y Day, 2004; figura 2); muestra actualmente otro patrón, abarcando las tierras bajas de Louisiana y Mississippi, incluso la costa Atlántica de Florida, teniendo como buen testigo la expansión de la distribución de los manglares. Esta “*tropicalización global del Golfo de México*”, plantea un nuevo desafío para reajustar los términos de referencia hacia una planificación ambiental estratégica para la zona costera de la región.

Una estrategia de manejo de adaptación al cambio climático por el ARNM buscando sostener la productividad de los humedales costeros, es utilizar los recursos fluviales y los sedimentos terrígenos, teniendo en cuenta que la zona costera y el mar adyacente son otro “usuario” más de agua dulce, sedimentos y nutrientes, en estacionalidad y cantidades razonables con la capacidad de carga del ecosistema (figura 3). Un ejemplo de esto es el delta del Mississippi donde los bordos han propiciado el transporte de esos insumos, directamente hacia el mar, limitando las inundaciones naturales, atenuando el fortalecimiento de los humedales y su pérdida, e induciendo el establecimiento de la “zona muerta” en el piso oceánico de Louisiana y Texas (Mitsch *et al.*, 2001; Rabalais *et al.*, 2002; Day *et al.*, 2000, 2007, 2008). En un esfuerzo por resolver este problema, se está planteado la recuperación del aporte de agua dulce y sedimentos del río Mississippi a los humedales laterales de la planicie costera (via compuertas), como un manejo apropiado del cauce fluvial y asegurar la estructura funcional de los humedales costeros (Lane *et al.*, 1999, 2004; DeLaune y Pezeshki, 2003; DeLaune *et al.*, 2003; Costanza *et al.*, 2006; Day *et al.*, 2007). Será de vital importancia acoplar estas estrategias con la variabilidad que está induciendo el cambio climático en el sistema natural; es decir, además de incorporar el manejo del agua y sedimentos, acoplar las variables que induce el cambio de uso del suelo y la expansión de la frontera agropecuaria, entre otros impactos sociales y económicos sobre el ecosistema e manglar que se indican en la figura 8.

Finalmente, hay un consenso global en la comunidad científica que las actividades humanas están afectando el cambio climático, y el cambio climático alterará significativamente muchos de los ecosistemas de humedales costeros en escala mundial. Por lo tanto, el patrón climático general aquí presentado para el Golfo, cambiará sustancialmente para fines del siglo XXI induciendo una “*tropicalización global del Golfo de México*”. Más aún, el cambio climático interactuará y magnificará, otros factores que induce el desarrollo social y económico sobre la zona costera del Golfo, afectando la estructura funcional de sus humedales, y los bienes y servicios que proporcionan. Twilley *et al.* (2001) plantea tres cuestiones para que la sociedad y los tomadores de decisión, comprendan las consecuencias ecológicas más evidentes del cambio climático en el Golfo para los próximos 50 a 100 años, y qué se debería hacer para proteger la ecología, asegurar la economía, preservar la cultura, y asegurar la herencia natural de las costas del Golfo: ¿Cual será el futuro climático de la región costera del Golfo?, ¿Qué significarán esos cambios para los ecosistemas costeros del Golfo y su relación con los bienes y servicios que proveen?, ¿Cómo podrán los habitantes de las costas del Golfo enfrentar el desafío del cambio climático?

## LITERATURA CITADA

- Agüero, M., 1999. Como estimar el valor económico de los manglares: un método y un ejemplo, Capítulo 22: 319-368. *In*: A. Yáñez-Arancibia y A. L. Lara-Domínguez (eds.), Ecosistemas de Manglar en América Tropical. Instituto de Ecología A. C., Xalapa México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA, 380 pp.

- Barbier, E. B., y I. Strand, 1997. Valuing mangrove-fishery linkages: A case study of Campeche, Mexico. Annual Conference of European Association of Environmental and Resource Economics. Tilburg University, The Netherlands.
- Cahoon, D. R., 2006. A review of major storm impacts on coastal wetland elevation. *Estuaries and Coasts*, 29: 939-942.
- Conner, W. H., y J. W. Day, 1991. Variations in vertical accretion in a Louisiana swamp. *J. Coastal Res.*, 7: 617-622.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, y M. van der Belt, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 (15 Mayo): 253-260.
- Costanza, R., W. J. Mitsch, y J. W. Day, 2006. A new vision for New Orleans and the Mississippi delta: Applying ecological economics and ecological engineering. *Frontiers in Ecology*, 4 (9): 465-472.
- Day, J. W., y P.H. Templet, 1989. Consequences of sea-level rise: Implications from the Mississippi Delta. *Coastal Management*, 17: 241-257.
- Day, J. W., C. Hall, W. M. Kemp, y A. Yáñez-Arancibia, 1989. Estuarine Ecology. Wiley Interscience, New York, 576 p.
- Day, J.W., J. Martin, L. Cardoch, y P. Templet, 1997. System functioning as a basis for sustainable management of deltaic ecosystems. *Coastal Management*, 25:115-154.
- Day, J. W., G. P. Shaffer, L. D. Britsch, D. J. Reed, S. R. Hawes, y D. Cahoon, 2000. Pattern and process of land loss in the Mississippi delta: A spatial and temporal analysis of wetland habitat change. *Estuaries*, 23: 425-438.
- Day, J. W., J. Barras, E. Clairains, J. Johnston, D. Justic, G. P. Kemp, J. Y. Ko, R. Lane, W. J. Mitsch, G. Steyer, P. Templet, y A. Yáñez-Arancibia, 2005. Implications of global climatic change and energy cost and availability for the restoration of the Mississippi Delta. *Ecological Engineering*, 24: 253-265.
- Day, J. W., D. Boesch, E. Clairain, P. Kemp, S. Laska, W. Mitsch, K. Orth, H. Mashriqui, D. Reed, L. Shabman, C. Simenstad, B. Streever, R. R. Twilley, C. Watson, J. Wells, y D. Whigham, 2007. Restoration of the Mississippi delta: Lessons from Hurricanes Katrina and Rita. *Science*, 315: 1679-1684.
- Day, J. W., R. Christian, D. Boesch, A. Yáñez-Arancibia, J. Morris, R. R. Twilley, L. Naylor, L. Schaffner, y C. Stevenson, 2008. Consequences of climate change on the ecogeomorphology of coastal wetlands. *Estuaries and Coasts*, 37: 477-491.
- Day, J. W., A. Yáñez-Arancibia, J. H. Cowan, R. H. Day, R. R. Twilley, y J. R. Rybczyk, 2009a. Global climate change impacts on coastal ecosystems in the Gulf of Mexico: Considerations for integrated coastal management, Chapter 14. In: J. W. Day y A. Yáñez Arancibia (eds.), *The Gulf of Mexico Ecosystem-based Management*. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas A & M University Press, College Station, TX.
- Day, J. W., A. Yáñez-Arancibia, y W. J. Mitsch, 2009b. Management approaches to address water quality and habitat loss problems in coastal ecosystems and their watersheds: Ecotechnology and ecological engineering. *Ocean Yearbook*, 23: 393-406.
- Deegan, L.A., J. W. Day, J. Gosselink, A. Yáñez-Arancibia, G. Soberón y P. Sánchez-Gil, 1986. Relationships among physical characteristics, vegetation distribution and fisheries yield in Gulf of Mexico estuaries, p. 83-100. In: D. Wolfe (Ed.), *Estuarine Variability*. Academic Press, New York. 510 p.

- DeLaune, R. D. y S. Pezeshki, 2003. The role of soil organic carbon in maintaining surface elevation in rapidly subsiding U.S. Gulf of Mexico coastal marshes. *Water, Air, Soil Pollution*, 3: 167-179.
- DeLaune, R. D., A. Jugsujinda, G. Peterson, y W. Patrick, 2003. Impact of Mississippi River freshwater reintroduction on enhancing marsh accretion processes in Louisiana estuary. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 58: 653-662.
- Duke, N. C., J. O. Meynecke, S. Dittman, A. M. Ellison, K. Anger, U. Berger, y S. Cannicci, 2007. A world without mangroves? *Science*, 317: 41-42.
- FAO, 2007. The World's Mangroves 1980-2005. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Vol 153, 82 p.
- Gornitz, V., S. Lebedeff, y J. Hansen, 1982. Global sea level trend in the past century. *Science*, 215:1611-1614.
- Greening, H., P. Doering, y C. Corbett, 2006. Hurricane impacts on coastal ecosystems. *Estuaries and Coasts*, 29 (6A): 877-879.
- Greenwood, M. F. D., P. W. Stevens, y R. E. Matheson Jr, 2006. Effects on the 2004 hurricanes on the fish assemblages in two proximate Southwest Florida estuaries: Changes in context of interannual variability. *Estuaries and Coasts*, 29 (6A): 985-996.
- Heileman, S., y N. Rabalais, 2008. Gulf of Mexico LME, xv-50, p. 673-698. In: K. Sherman y G. Hempel (eds.), The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A Perspective on Changing Conditions in LME's of the World Regional Seas. UNEP Regional Seas Report and Studies No. 182. UNEP, Nairobi, Kenya, 852 p.
- Heileman, S. y R. Mahon, 2008. Caribbean Sea LME, xv-49, p. 657-672. In: K. Sherman y G. Hempel (eds.), The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A Perspective on Changing Conditions in LME's of the World Regional Seas. UNEP Regional Seas Report and Studies No. 182. UNEP, Nairobi, Kenya, 852 p.
- Hoyos, C., P. Agudelo, P. Webster, y J. Curry, 2006. Deconvolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity. *Science*, 312: 94-97.
- IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The Scientific Basis, Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jiménez, J. A., 1999. Ambiente, distribución y características estructurales en los manglares del Pacífico de Centro América: Contrastes climáticos, Chapter 6: 51-70. In: A. Yáñez-Arancibia y A. L. Lara-Domínguez (eds.), Ecosistemas de Manglar en América Tropical. Instituto de Ecología A. C., Xalapa México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA, 380 p.
- Kesel, R., 1989. The role of the Mississippi River in wetland loss in southeastern Louisiana, USA. *Environmental Geological Water Sciences*, 13:183-193.
- Kjerfve, B., W. K. Michener, y L. R. Gardner, 1991. Impacts of climate change in estuary and delta environments. IUCN Symposium on Impacts of Climate Change on Ecosystems and Species. The Netherlands, 2-6 Dec 1991, 18 p.
- Lane, R. R., J. W. Day, y B. Thibodeaux, 1999. Water quality analysis of a freshwater diversion at Caernarvon, Louisiana. *Estuaries*, 22: 327-336.
- Lane, R. R., J. W. Day, D. Justic, E. Reyes, B. Marx, J. N. Day, y E. Hayfield, 2004. Changes in stoichiometric Si, N, and P ratios of Mississippi River water diverted through coastal wetlands to the Gulf of Mexico. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 60: 1-10.

- Lara-Domínguez, A. L., A. Yáñez-Arancibia, y J. C. Seijo, 1998. Valuación económica de los servicios de los ecosistemas: Estudio de caso de los manglares en Campeche, p. 23-44. En: H. Benítez Díaz, E. Vega López, A. Peña Jiménez y S. Ávila Foucat (eds.), Aspectos Económicos sobre la Biodiversidad de México. Conabio, INE, Semarnat, México DF, 204 p.
- Lara-Domínguez, A. L., J. W. Day, G. J. Villalobos Zapata, R. R. Twilley, H. Álvarez Guillén, y A. Yáñez-Arancibia, 2005. Structure of a unique inland mangrove forest assemblage in fossil lagoons on the Caribbean Coast of Mexico. *Wetland Ecology and Management*, 13: 111-122.
- Lugo, A., 1999. Mangrove ecosystem research with emphasis on nutrient cycling, p. 17-38. En: A. Yáñez-Arancibia y A. L. Lara-Domínguez (eds.), Ecosistemas de Manglar en América Tropical. Instituto de Ecología A. C., Xalapa México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD, 380 pp.
- Luther, D. A. y R. Greenberg, 2009. Mangroves: A global perspective on the evolution and conservation of their terrestrial vertebrates. *BioScience*, 59 (7): 602-612.
- McKee, K. y W. Patrick. 1988. The relationship of smooth Cord grass (*Spartina alterniflora*) to tidal datum's: A review. *Estuaries*, 11: 143-151.
- Medina, E., 1999. Mangrove physiology: The challenge of salt, heat, and light stress under recurrent flooding, Chapter 9: 109-126. En: A. Yáñez-Arancibia y A. L. Lara-Domínguez (Eds.), Ecosistemas de Manglar en América Tropical. Instituto de Ecología A. C., Xalapa México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA, 380 p.
- Meade, 1995. United States Geological Survey, Circular 1133.
- Mendelssohn, I. A., y J. T. Morris, 2000. Eco-physiological controls on the productivity of *Spartina alterniflora* Loisel, p. 59-80. In: M. P. Weinstein and D. A. Kreeger (eds.), Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 876 p.
- Milbrandt, E. C., J. M. Greenawalt-Boswell, P. D. Sokolof, y S. A. Bortone, 2006. Impact and response of Southwest Florida mangroves to the 2004 hurricane season. *Estuaries and Coasts*, 29 (6A): 979-984.
- Mitsch, W., J. W. Day, J. Gilliam, P. Groffman, D. Hey, G. Randall, y N. Wang, 2001. Reducing nitrogen loading to the Gulf of Mexico from the Mississippi River basin: Strategies to counter a persistent problem. *BioScience*, 51(5):373-388.
- Neumann, J. E., G. Yohe, R. Nicholls, y M. Manion, 2000. Sea-Level Rise and Global Climate Change. Pew Center on Global Climate Change, Arlington, VA, 48 p.
- Ning, Z. H., R. E. Turner, T. Doyle, y K. Abdollahi (eds.), 2003. Integrated Assessment of the Climate Change Impacts on the Gulf Coast Region. United States Environmental Protection Agency, and United States Geological Services, Baton Rouge, Louisiana, 236 p.
- Orson, R., R. Warren, y W. A. Niering, 1987. Development of a tidal marsh in a New England River Valley. *Estuaries*, 10: 20-27.
- Ortiz-Pérez, M. A., y M. 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*, 39: 68-81.
- Ortiz-Pérez, M. A., A. P. Méndez Linares, y J. R. Hernández Santana, 2009. Sea-level rise and vulnerability of coastal low-land in the Mexican area of the Gulf of Mexico and the Caribbean sea. In: J. W. Day, A. Yáñez-Arancibia (eds.), The Gulf of Mexico: Ecosystem-based Management. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas A & M University Press, (in press).

- Pauly, D., y A. Yáñez-Arancibia, 1994. Fisheries in coastal lagoons, Chapter 13, p. 377-399. *In*: B. Kjerfve (Ed.), Coastal Lagoons Processes. Elsevier Oceanography Series 60, 577 p.
- Paperno, R., D. M. Tremain, D. H. Adams, A. P. Sebastian, J. T. Sauer, y J. Dutka-Gianelli, 2006. The disruption and recovery of fish communities in the Indian River Lagoon, FL, following two hurricanes in 2004. *Estuaries and Coasts*, 29 (6A): 1004-1010.
- Poff, N. L., M. M. Brinson, y J. W. Day, 2002. Aquatic Ecosystems & Global Climate Change: Potential Impacts on Inland Freshwater and Coastal Wetlands Ecosystems in the United States. Pew Center on Global Climate Change, Arlington, Virginia, 44 p.
- Post, E., J. Brodie, M. Hebblewhite, A. D. Anders, J. A. K. Maier, y C. C. Wilmers, 2009. Global population dynamics and hot spots of response to climate change. *BioScience*, 59 (6): 489-497.
- Proffitt, C. D., E. C. Milbrandt, y S. E. Travis, 2006. Red mangrove (*Rhizophora mangle*) reproduction and seedling colonization after Hurricane Charley: Comparisons of Charlotte Harbor and Tampa Bay. *Estuaries and Coasts*, 29 (6A): 972-978.
- Rabalais, N. N., R.E. Turner, y D. Scavia, 2002. Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River. *BioScience*, 52: 129-142.
- Rahmstorf, S., 2007. A semi-empirical approach to predicting sea-level rise. *Science*, 315: 368-370.
- Salinas, L., R. DeLaune, y W. Patrick, 1986. Changes occurring along a rapidly submerging coastal area: Louisiana, USA. *Journal of Coastal Research*, 2: 269-284.
- Sanjurjo Rivera, E., 2001. Valoración Económica de Servicios Ambientales Prestados por Ecosistemas: Humedales de México. Semarnat, INE, México DF, 46 p.
- Scavia, D., J. C. Field, D. F. Boesch, R.W. Buddemeier, V. Burkett, D. R. Cayan, M. Fogarty, M. A. Harwell, R. W. Howarth, C. Mason, D. J. Reed, R.C. Royer, A. H. Sallenger, y J. G. Titus, 2002. Climate change impacts on US coastal and marine ecosystems. *Estuaries*, 25:149-164.
- Semarnat, 1997. México: Primera Comunicación Nacional para la Convención Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático. Semarnat, México DF, 149 p.
- Snedaker, S. C., 1993. Impact on mangrove, p. 282-305. *In*: G. A. Maul (ed.), Climate Change in the Intra-Americas Sea. Edward Arnold, Kent, UK.
- Stevens, P. W., D. A. Blewett, y J. P. Casey, 2006. Short-term effects of a low dissolved oxygen event of estuarine fish assemblages following the passage of Hurricane Charley. *Estuaries and Coasts*, 29 (6A): 997-1003.
- Switzer, T. S., B. L. Winner, N. M. Duham, J. A. Whittington, y M. Thomas, 2006. Influence of sequential hurricanes on nekton communities in a Southeast Florida estuary: Short-term effects in the context of historical variations in freshwater inflow. *Estuaries and Coasts*, 29 (6A): 1011-1018.
- Tarasona, J., W. E. Arntz, y E. C. Maruenda (Eds.), 2001. El Niño en América Latina: Impactos Biológicos y Sociales. El Niño in Latin América: Biologic and Social Impacts. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Lima, Perú. 423 p.
- Thieler, R.R., y E.S. Hammar-Klose, 2001. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the US Gulf of Mexico Coast. US Geological Survey Open-File Report 00-179 (<http://pubs.usgs.gov/of/of00-179>).
- Twilley, R. R., 1988. Coupling of mangroves to productivity of estuarine and coastal waters, p. 155-180. *In*: B. O. Jansson (Ed.), Coastal-Offshore Ecosystem Interactions. Springer Verlag, Berlin.

- Twilley, R. R. y J. W. Day, 1999. The productivity and nutrient cycling of mangrove ecosystems, Chapter 10: 127-152. En: A. Yáñez-Arancibia y A. L. Lara-Domínguez (eds.), *Ecosistemas de Manglar en América Tropical*. Instituto de Ecología A. C., Xalapa México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA, 380 p.
- Twilley, R. R., R. Chen, y V. Rivera-Monroy, 1999. Formulating a succession model of mangrove wetlands in the Caribbean and Gulf of Mexico with emphasis on factors associated with global climate change. *Current Topics in Wetland Biogeochemistry*, 3: 118-141.
- Twilley, R. R., E. J. Barron, H. L. Gholz, M. A. Harwell, R. L. Miller, D. J. Reed, J. B. Rose, E. H. Siemann, R. G. Wetzel, y R. J. Zimmerman, 2001. *Confronting Climate Change in the Gulf Coast Region: Prospects for Sustaining Our Ecological Heritage*. Union of Concerned Scientist, Cambridge, Massachusetts, and Ecological Society of America, Washington DC, 82 p.
- Twilley, R. R., S. C. Snedaker, A. Yáñez-Arancibia, y E. Medina, 2006. Biodiversity and ecosystem processes in tropical estuaries: Perspectives on mangrove ecosystems, Chapter 13: 327-370. In: H. A. Mooney, S. H. Cushman, E. Medina, O. E. Sala y E. D. Schultze (eds.), *Functional Roles of Biodiversity: A Global Perspective*. John Wiley & Sons Ltd.
- UNEP, 1994. *Assessment and Monitoring of Climate Impacts on Mangrove Ecosystems*. United Nations Environment Programme, Regional Seas Report and Studies, No. 154, 62 p.
- Valiela, I., J. L. Bowen, y J. K. York, 2001. Mangrove forests: One of the world's threatened major tropical environments. *BioScience*, 51: 807-815.
- Woodroffe, C. D., 1991. The impact of sea-level rise on mangrove shoreline. *Progress in Physical Geography*, 14: 483-520.
- Yáñez-Arancibia, A., 2005. Middle America, coastal ecology and geomorphology, p. 639-645. In: M. L. Schwartz, (ed.), *The Encyclopedia of Coastal Sciences*, Springer, Dordrecht, The Netherlands. 1211 p.
- Yáñez-Arancibia, A. y A. L. Lara-Domínguez (eds.), 1999. *Ecosistemas de Manglar en América Tropical*. Instituto de Ecología A. C., Xalapa México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA, 380 p.
- Yáñez-Arancibia, A., y M. Agüero, 2000. Integridad de ecosistemas y valor económico. En: Seminario de Valoración Económica del Medio Ambiente. INE-Semarnap. México DF, p. 1-23. [www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/consultaPublicacion.html?id-pub=340&id\\_tema=5&dir=Consultas](http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/consultaPublicacion.html?id-pub=340&id_tema=5&dir=Consultas).
- Yáñez-Arancibia, A., y J. W. Day, 2004. Environmental sub-regions in the Gulf of Mexico coastal zone: the ecosystem approach as an integrated management tool. *Ocean & Coastal Management*, 47 (11-12): 727-757.
- Yáñez-Arancibia, A., y J. W. Day, 2005. *Ecosistemas vulnerables, riesgo ecológico y el record 2005 de huracanes en el Golfo de México y Mar Caribe*. [www.ine.gob.mx/download/huracanes2005.pdf](http://www.ine.gob.mx/download/huracanes2005.pdf)
- Yáñez-Arancibia, A., A. L. Lara Domínguez, y J. W. Day, 1993. Interactions between mangrove and seagrass habitat mediated by estuarine nekton assemblages: Coupling primary and secondary production. *Hidrobiologia*, 264: 1-12.
- Yáñez-Arancibia, A., A. L. Lara Domínguez, y D. Pauly, 1994. Coastal lagoons as fish habitats, Chapter 12: 363-376. In: B. Kjerfve (Ed.), *Coastal Lagoons Processes*. Elsevier Oceanography Series 60, 577 p.
- Yáñez-Arancibia, A., R. R. Twilley y A. L. Lara-Domínguez, 1998. Los Ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y Bosques*, 4 (2): 3-19.

- Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day, J. S. Jacob, C. Ibáñez Martí, A. Tejada Martínez, y C. M. Welsh 2007a. Conclusiones 1er Panel Internacional sobre Cambio Climático: La Zona Costera en Crisis en el Golfo de México, el Caribe y el Mediterráneo. Instituto de Ecología A. C., Texas Sea Grant Program. Xalapa México 30 Ago, 5 p.
- Yáñez-Arancibia, A., A. L. Lara-Domínguez, P. Sánchez-Gil, y J. W. Day, 2007b. Estuary-sea ecological interactions: A theoretical framework for the management of coastal environment, p. 271-301. *In*: K. Withers and M. Nipper (eds.), Environmental Analysis of the Gulf of Mexico. The Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Special Publication No. 1, Texas A&M University - Corpus Christi, 700 p.
- Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day, J. S. Jacob, A. Martínez Arroyo, S. Miranda Alonso, A. Tejada Martínez, C. M. Welsh y A. Carranza Edwards, 2008. Conclusiones 2do Panel Internacional sobre Cambio Climático: La Zona Costera y su Impacto Ecológico, Económico y Social. Instituto de Ecología A. C., Texas Sea Grant Program, INE-Semarnat . Xalapa México 16 Oct, 8 p.
- Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day, W. J. Mitsch y D. F. Boesch, 2006. Following the ecosystem approach for developing projects on coastal habitat restoration in the Gulf of Mexico. Commission on Ecosystem Management Newsletter 5, Highlights News, IUCN Gland Switzerland. [www.iucn.org/themes/cem/documents/cem/members\\_2006/restoration\\_esa\\_a.yanez\\_arancibia\\_nov2006.pdf](http://www.iucn.org/themes/cem/documents/cem/members_2006/restoration_esa_a.yanez_arancibia_nov2006.pdf)
- Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day, y B. Currie-Alder 2009a. The Grijalva-Usumacinta river delta functioning: challenge for coastal management. *Ocean Yearbook*, Vol 23: 473-501.
- Yáñez-Arancibia, A., J. J. Ramírez-Gordillo, J. W. Day, y D. Yoskowitz, 2009b. Environmental sustainability of economic trends in the Gulf of Mexico: What is the limit for Mexican coastal development?. *In*: J. Cato (ed.) *Ocean and Coastal Economy of the Gulf of Mexico*, The Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A & M University Press, College Station, TX. Chapter 5: 82-104.
- Zomlefer, W. B., W.S. Judd, y D.E. Giannasi, 2006. Northernmost limit of *Rhizophora mangle* (red mangrove; Rhizophoraceae) in St. Johns County, Florida. *Castanea*, 71: 239-244.



Pech, D., 2010. Cambio climático global, eventos extremos y biodiversidad costera de la península de Yucatán, p. 263-276. En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeth, 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.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO UN ENFOQUE COSTERO Y MARINO

### Elementos ambientales para tomadores de decisiones

---

# Cambio climático global, eventos extremos y biodiversidad costera de la península de Yucatán

*Daniel Pech*

---

## RESUMEN

El calentamiento climático global (CCG) y sus efectos potenciales sobre la biodiversidad y por ende sobre el bienestar humano es uno de los fenómenos que ha recibido la mayor atención en todos los medios de comunicación y por lo tanto ha llegado a tener un impacto mediático considerable sobre todos los estratos sociales. Esto ha causado que muchas de las variaciones que actualmente están experimentando los ecosistemas estén siendo asociadas e interpretadas como una consecuencia directa del CCG. Sin embargo, los efectos directos e indirectos de la intensa actividad humana están siendo probablemente los que mayormente estén causando modificaciones puntuales, locales y posiblemente regionales en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Independiente de su condición ecológica actual los ecosistemas costeros marinos están considerados como ecosistemas críticos y de alta vulnerabilidad a los efectos, principalmente del aumento del nivel del mar y del probable aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos (*e.g.* huracanes, tormentas, el Niño) como consecuencia del CCG. El presente capítulo hace una breve revisión de las evidencias, tendencias y predicciones de los potenciales efectos del CCG sobre la estructura, funcionamiento y diversidad de los ecosistemas costero-marinos con énfasis en los de la región del Golfo de México.

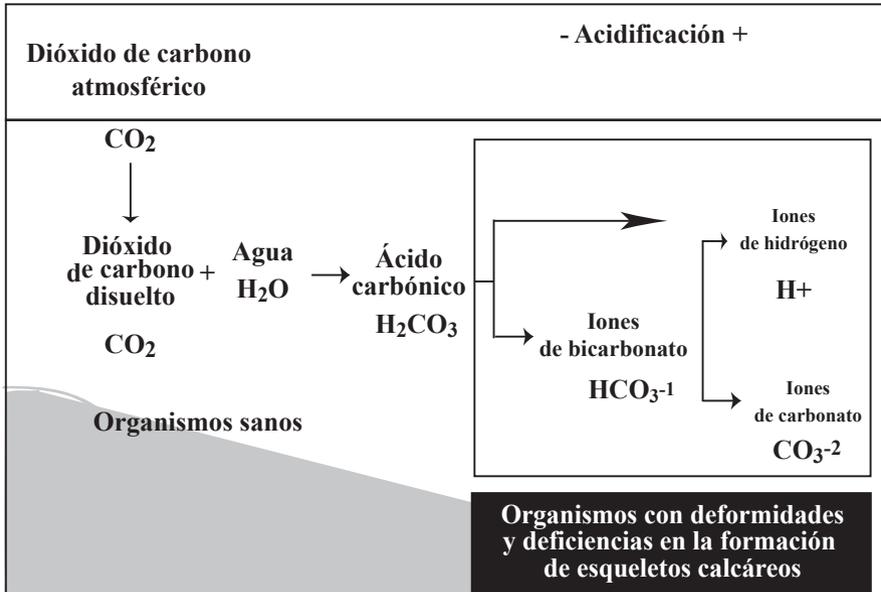
## INTRODUCCIÓN

La acumulación, en la atmósfera, de gases de efecto invernadero está ocurriendo a un ritmo acelerado sin precedente alguno en la historia del planeta. La tasa anual de acumulación del dióxido de carbono en los últimos 10 años ha sido superior a las tasas observadas desde 1850 cuando se generaron las primeras mediciones de gases atmosféricos (IPCC, 2007). La concentración de los 3 gases principales que generan el efecto invernadero,  $\text{CO}_2$ , metano y óxido nítrico, se encuentran actualmente en los niveles más altos jamás observados y esto está ocasionando cambios actualmente perceptibles en los patrones climáticos globales. El aumento en la temperatura media de los océanos es desde luego, uno de los fenómenos que actualmente se está registrando y que tiene consecuencias potenciales sobre el aumento del nivel medio del mar, la frecuencia de aparición de enfermedades en organismos acuáticos y la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos como lo son las tormentas, tifones y huracanes.

Esto último es de particular importancia para las regiones tropicales. A pesar de que no se conoce con exactitud si la frecuencia en la aparición de estos eventos es causada por el Cambio Climático Global (CCG), las predicciones indican que la intensidad de los mismos se incrementará en función de los cambios ambientales futuros (Beldomenico *et al.*, 2008; Curtis, 2008). Adicionalmente el calentamiento de la atmósfera tiene un efecto potencial significativo en: los patrones de circulación marina, los patrones de precipitación y vientos, los patrones de estratificación de los océanos y la modificación de patrones de control de los ecosistemas marinos (Manabe y Stoufer, 1993). Estos cambios futuros indudablemente pondrán en riesgo la estabilidad actual de los ecosistemas costeros y marinos y los servicios ecosistémicos que estos proveen (Schimittner, 2005).

El secuestro de carbono por los ecosistemas marinos, tiene el potencial de disminuir el efecto invernadero en la atmósfera (Keeling, 2005). Sin embargo este fenómeno puede a su vez ocasionar una disminución en los niveles de pH generando un efecto de acidificación en los océanos (figura 1), cuyos efectos sobre la biodiversidad marina es aun incierto. Se han generado hipótesis que predicen que en los próximos 50 años la concentración del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera se duplicará y esto podría causar un cambio total en la química marina de los océanos. La predicción más optimista considera que los niveles de  $\text{CO}_2$  no se duplicaran en el futuro, sin embargo se ha demostrado que un aumento a 445 ppm del  $\text{CO}_2$ , es suficiente para modificar el ambiente marino convirtiéndolo en un ambiente corrosivo aun para las especies más resistentes (McNeil y Matear, 2008)

Los efectos de las actividades antrópicas (*e.g.* contaminación de los cuerpos de agua, sobrepesca, modificación y destrucción de hábitats) potencializan los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas. Uno de los mayores retos en los ambientes marinos lo constituye el hecho de que los efectos actuales de las actividades antrópicas sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas no son del todo conocidos y esto aumenta el grado de incertidumbre en los modelos predictivos. Sin embargo y a pesar de la falta de conocimiento hay un consenso general de la comunidad científica en que la biodiversidad marina tal y como la conocemos actualmente no será la misma en un periodo relativamente corto de tiempo. Las predicciones



**Figura 1.** Esquema del fenómeno de la acidificación de las aguas oceánicas, por absorción de niveles excesivos de  $\text{CO}_2$  y su posible influencia sobre el estado de salud de los organismos. La acidificación lleva a una generación de niveles altos de iones de hidrógeno y carbonato que podrían impedir la correcta formación de esqueletos calcáreos de los invertebrados marinos (modificado de <http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/7933589.stm>).

más fatalistas expresan que de continuar la tendencia en el aumento de los gases tipo invernadero, los ecosistemas marinos tenderán a modificarse de manera acelerada de tal forma que en los próximos 50-100 años la estructura será completamente diferente a la que conocemos hoy en día (Ehrlich y Pringle, 2008). Todo esto como consecuencia de la actividad de una sola especie: el *homo sapiens*.

Los ecosistemas tropicales enfrentan riesgos diferentes a los ecosistemas polares debido a que estos últimos se encuentran en el extremo del espectro de temperatura y que tienen al hielo como principal componente físico de su ecosistema. Actualmente existen evidencias de fuertes cambios, por ejemplo, la productividad primaria (Gradinger, 1999) en los océanos polares debido al aumento de la temperatura promedio del mar. Por el contrario el efecto del CCG en los ecosistemas tropicales no es del todo conocido. Existen evidencias que muestran que el riesgo de la pérdida de la biodiversidad es mayor debido a que la diversidad es mayor en estas latitudes.

## CCG VS EFECTOS ANTRÓPICOS

El calentamiento climático global (CCG) y sus efectos potenciales sobre la biodiversidad y por ende sobre el bienestar humano es uno de los fenómenos que ha recibido la mayor atención en todos los medios de comunicación y por lo tanto ha llegado a tener un impacto mediático

considerable sobre todos los estratos sociales. Esto ha causado que mucha de las variaciones que actualmente están experimentando los ecosistemas estén siendo asociados e interpretado como una consecuencia directa del CCG. Sin embargo los efectos directos e indirectos de la intensa actividad humana están siendo probablemente los que mayormente estén causando modificaciones puntuales, locales y posiblemente regionales en la estructura de los ecosistemas. La discriminación entre los efectos causados por la variabilidad natural y los de origen antrópico es crítica para comprender y predecir los potenciales efectos del CCG sobre la estructura de los ecosistemas. Independiente de su condición ecológica actual los ecosistemas costeros están considerados como ecosistemas críticos de alta vulnerabilidad en el contexto del CCG principalmente por el efecto del aumento del nivel del mar, la modificación de la salinidad y acidificación de estos ambientes.

En la actualidad y desde hace un par de décadas los ecosistemas costeros de todo el mundo han estado sujetos a diversos grados de estrés constante debido al desarrollo de actividades turísticas, pesqueras, industriales y de vivienda. Hasta el 2000 se había calculado que 39% de la población mundial (2.2 billones) habitaban o hacían uso directo de los recursos en las zonas costero-marinas (UNESCO, 2000). Este desde luego ejerce una gran presión sobre los recursos bióticos de estos ecosistemas.

Los ecosistemas marino-costeros del Golfo de México no escapan a esta realidad. Posiblemente el ejemplo más palpable de los efectos de la presión humana sobre los recursos costeros lo represente el estado actual de las especies objetivo de las pesquerías. Por ejemplo la captura del recurso camarón ha sufrido un decremento pasando de aproximadamente 20 000 ton/año a mediados de la década de los 70s hasta capturas inferiores a las 2 000 ton/año a partir de 1997 (Gracia, 1998) y con un panorama desalentador de agotamiento de recurso. Esto ha motivado la implementación de vedas temporales a partir de 1994 (Diario Oficial de la Federación, septiembre 2004). Un caso más dramático lo representa la pesquería del recurso caracol. A principios de los años noventa la presión de pesca hacia el recurso caracol ocasiono el colapso del mismo (Pérez-Pérez *et al.*, 2009) y como consecuencia una veda indefinida para las especies *Strombus costatus* (caracol blanco) *S. gigas* (caracol lanceta), *Xancus angulatus* (tomburro), *Melongena melongena* (chivita sp., *Pleuroploca gigantea* (chacpel) y *Busycum contrarium* (trompillo) (Diario Oficial de la Federación, del 16 de marzo de 1994). Estos dos ejemplo son los más conocidos pero no los únicos, en la actualidad las pesquerías del Golfo están en crisis y la razón de esto es objeto de muchas discusiones. Entre las posibles razones de esta crisis se menciona la reducción de áreas de pesca debido a la expansión de la infraestructura petrolera (de 39 674 km<sup>2</sup> paso a 17 674 km<sup>2</sup>), la existencia de zonas protegidas, la disminución de la calidad del hábitat debido a los residuos y descargas provenientes de las industrias petroleras y de servicios. En una situación similar de deterioro se encuentran los humedales los cuales se calcula que existe una pérdida de 2% de la cobertura anualmente ([www.agua.org.mx](http://www.agua.org.mx)). Los ecosistemas de manglares mantienen más de 26 pesquerías de alto valor económico, cerca de 30% de las pesquerías de las región costeras (Aburto-Oropeza *et al.*, 2008). La perdida de cobertura de manglar implica una perdida de hábitats de crianza de estas especies y otras mas que no

son de interés comercial pero si de interés ecosistémico. Aunado a esto existe un crecimiento desordenado, carente de políticas ambientales, de infraestructura turística y portuaria. Es claro que el estado actual de los recursos mencionado en estos ejemplos es una consecuencia directa de la presión antropogénica y no del CCG.

## **CAMBIOS EN LA BIODIVERSIDAD COSTERA-MARINA**

Biodiversidad es el término que se utiliza para referirse a cualquier aspecto de la diversidad de la vida en el planeta, interacciones entre organismos y quizá lo mas importante, el curso del desarrollo o presencia de los mismos en los ecosistemas. Científicos de todo el mundo han enviado mensajes de alerta sobre las amenazas que actualmente están poniendo en peligro tanto a las especies de organismos como a su hábitat. Evidencias de las amenazas ocasionadas por el crecimiento de la población humana, conversión y destrucción del hábitat, aparición de nuevos patógenos e invasión de especies exóticas, sugieren que una onda de extinción está actualmente ocurriendo o tiene la posibilidad de ocurrir (Wake y Vredenburg, 2008 ). Esta predicción se vuelve fatalista cuando se agregan los efectos potenciales del CCG.

La relación entre la biodiversidad y el CCG es más compleja y no únicamente en una sola dirección. Si bien la biodiversidad se ha puesto en riesgo por el CCG, el uso y manejo adecuado y ordenado de la biodiversidad puede reducir los impactos del mismo. Es evidente que actualmente el cambio en los patrones del clima están afectando la biodiversidad del planeta y se prevee que esta tendencia continúe. Las consecuencias del CCG en la biodiversidad de especies incluyen los cambios en los patrones de distribución de las especies, incremento en las tasa de extinción, cambios en los ciclos reproductivos y cambios en la estacionalidad de los procesos biológicos (CBD, 2007).

Las predicciones futuras sobre los efectos del CCG sobre la biodiversidad estan relacionados con los cambios futuros predichos de los patrones de precipitación y de elevación del nivel del mar. Se espera que los ecosistemas costeros, como por ejemplo las lagunas costeras experimenten cambios fisicoquímicos en la columna de agua y cambios en los regimenes de marea que a su vez afecte la biodiversidad de los mismos.

Los arrecifes de coral, representan un ejemplo de ecosistemas marinos con una alta fragilidad ante los efectos adversos de las actividades antrópicas y los potenciales efectos del CCG. Uno de los problemas primarios es la ruptura de la relación simbiótica entre el alga y el pólipo como consecuencia de la elevación de la temperatura. La acidificación del agua marina también representa un peligro potencial debido a que el incremento en los niveles de dióxido de carbono podrían repercutir en la formación de esqueletos calcáreos mas débiles. Este fenómeno, también tendría un efecto sobre todos los organismos marinos que forman un exoesqueleto calcáreo. Actualmente existen evidencias de que los sistemas arrecifales están sufriendo impactos que inducen el fenómeno bien conocido del blanqueamiento de coral (figura 2). Esto se ha relacionado con el calentamiento de la columna del agua, daño físico directo sobre los



**Figura 2.** Efecto del blanqueamiento de corales en las costas de Quintan Roo.

organismos, efectos colaterales de la sobrepesca en las zonas de los arrecifes y enfermedades causadas por hongos y bacterias. En este punto hay que acotar que en regiones costeras con grandes crecimientos poblacionales y en donde la presión turística es muy alta, las modificaciones en la temperatura y características fisicoquímicas del agua ocurren de manera puntual. Las descargas de aguas residuales conteniendo una alta concentración de materia orgánica y que son depositados directamente al ambiente son responsables de los daños directos sobre los arrecifes y fauna circundante.

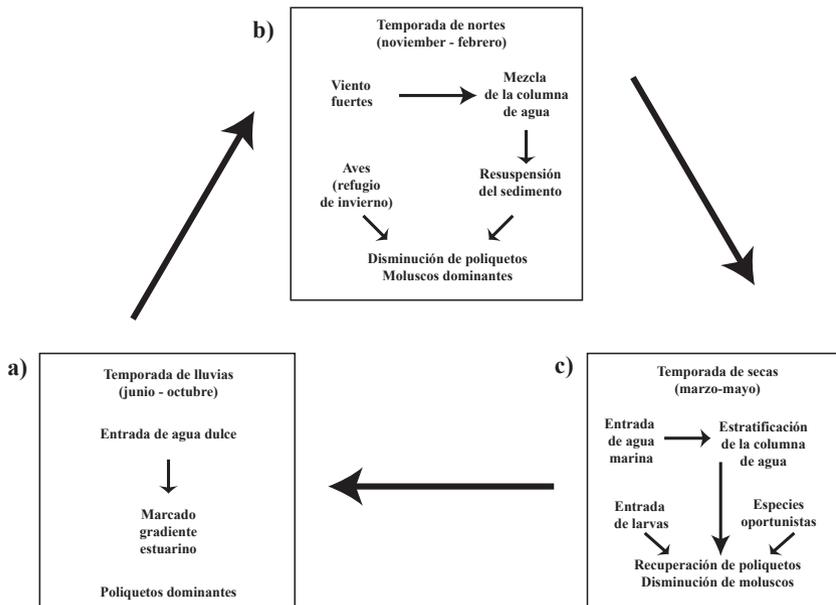
En la región del caribe son cuatro los periodos en los cuales los sistemas arrecifales, incluyendo el mexicano, han sufrido el fenómeno del blanqueamiento masivo. El último dato del 2005 el cual se reportó como el más severo en comparación con los ocurridos durante 1987, 1995 y 1997/1998. Este último evento coincidió con los récords de las más altas temperaturas registradas en el hemisferio norte y con el período de mayor actividad de huracanes en la región del caribe (Wilkinson y Sauter 2008)

La capacidad de resiliencia y adaptación de los ecosistemas marinos tropicales juega un papel muy importante para mantener la biodiversidad y contrarrestar los efectos potenciales del CCG. Observaciones por un periodo de 30 años mostraron una gran variabilidad natural en la distribución, abundancia y diversidad de los arrecifes coralinos de la Gran Barrera Australiana (Conell *et al.*, 1997). La variabilidad observada fue asociada a disturbios ambientales de diversa intensidad y origen a diversas escalas espaciales y temporal. Las comunidades de coral mostraron un potencial de recuperación después de disturbios ambientales extremos. Por el contrario las comunidades sometidas a presiones ambientales crónicas y/o de origen antrópico no se recuperaron. La resiliencia de los ecosistemas de coral ha jugado un papel fundamental para su supervivencia desde hace aproximadamente 10 millones de años superando oscilaciones climáticas de la era glacial e interglaciaria (Grimsditch y Salm, 2006). En la actualidad la

existencia de los arrecifes coralinos esta siendo puesta en peligro debido a que fuertes disturbios de diversos orígenes estan causando cambios en el estado de equilibrio de manera muy rápida, pero sobre todo porque los efectos están excediendo los umbrales de tolerancia de las comunidades coralinas (Nyström *et al.*, 2000).

Los umbrales de tolerancia están asociados a los niveles de variabilidad natural de los ecosistemas. Contrariamente a lo que generalmente se asume, los ecosistemas tropicales presentan una variabilidad natural marcada y por lo tanto un posible umbral de tolerancia elevado. La variabilidad, la resiliencia y los umbrales de tolerancia relativamente altos de los ecosistemas costero-marinos tropicales puede constituir una característica importante que puede ayudar a minimizar los impactos del CCG.

El ecosistema de la laguna de Celestún en el estado de Yucatán (México), constituye un ejemplo de un ecosistema altamente variable y resiliente. La materia orgánica de la laguna experimenta cambios significativos a escalas temporales de aproximadamente 10 años (Gonnnea *et al.*, 2004). La riqueza y diversidad de especies bentónicas asociadas a los fondos fangosos de la laguna es altamente variable a escalas temporales de un año. A pesar de esta variabilidad la abundancia total de organismos no presenta cambios significativos a lo largo de un ciclo anual. Después de completar un ciclo anual la composición y riqueza de especie vuelve a su punto de origen dando lugar al inicio de otro ciclo (figura 3) (Hernández *et al.*, 2008). Estos cambios han sido asociados a la variabilidad ambiental natural de la zona. Dentro de este contexto se ha sugerido que las actividades antrópicas que tengan el potencial de romper el balance entre el



**Figura 3.** Modelo conceptual propuesto para explicar la respuesta de la fauna bentónica en función de la variabilidad temporal del hábitat en la laguna de Celestun Yucatán (modificado de Hernandez *et al.*, 2008).

equilibrio hidrológico entre la entrada de agua dulce y la salada constituye la mayor amenaza para la estabilidad del ecosistema (Pech *et al.*, 2007). De la misma manera la prevalencia de parásitos en los peces de la laguna muestran patrones de variabilidad asociadas a las características ambientales de la zona y al hospedero y que su prevalencia se mantiene relativamente estable ante la presencia de disturbios ambientales de diverso grado (May-Tec, 2009). Esta variabilidad y resiliencia resultan importantes en el contexto de la evolución natural y la adaptabilidad de los ecosistemas ante los cambios ambientales. Ecosistemas naturales saludables y prístinos o cercanos a serlo, con altos grados de resiliencia pueden evolucionar para adaptarse a las condiciones ambientales cambiantes sin alterar la estabilidad general de los mismos.

## EVENTOS AMBIENTALES EXTREMOS Y BIODIVERSIDAD

El aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos climáticos en los ambientes tropicales, es uno de los temas ampliamente discutidos en referencia a los efectos del CCG. Se asume que la elevación de la temperatura del mar provee condiciones favorables para el desarrollo e intensificación de estos fenómenos. Sin embargo evidencia histórica sugiere que han existido picos de máxima actividad y que ahora nos encontramos justamente en un periodo similar (Vecchi y Soden, 2007). Simulaciones basadas en el incremento del CO<sub>2</sub> como un factor detonante en el efecto invernadero y calentamiento de las masas de aire, sugieren que las tormentas y huracanes en las regiones tropicales tenderán a incrementar sus radios de impacto con tendencias a presentarse con intensidades más severas y con una alta velocidad de propagación (Jiang y Perry, 2007).

Sin embargo las atribuciones causales de las tendencias actuales de los patrones de biodiversidad atribuidas al CCG no es una tarea simple, hasta ahora no se ha demostrado que el efecto global tenga una influencia directa sobre los patrones locales a escalas temporales cortas (Parmesan y Yohe, 2007). En una escala evolutiva los cambios climáticos han actuado como una importante fuerza natural que modela los sistemas naturales. Los huracanes y tormentas han sido parte de las fuerzas estructurantes que han modelado los ecosistemas como hoy los conocemos. Los últimos picos de máxima actividad de huracanes intensos para el Atlántico fueron registrados entre los años 30 y 50, sin embargo para este periodo los problemas de la emisión de gases tipo invernadero no representaban un factor de riesgo significativo.

Uno de los efectos asociados a los cambios al CCG que ha alertado a la comunidad científica es la tendencia de incremento en la frecuencia de aparición de enfermedades comunes en los organismos, y la aparición de nuevas enfermedades epidémicas (*e.g.* incremento en la prevalencia de parásitos) observadas en las últimas décadas. Para los ambientes marino-costeros este problema se vuelve grave debido a la interconexión existente entre los diversos ecosistemas. Por lo tanto los parásitos, virus y otros agentes infecciosos pueden diseminarse con muy pocas restricciones. El peor escenario es que, ante un aumento en la temperatura de los océanos los agentes infecciosos podrían diseminarse a rangos geográficos mayores y transmitirse a organismos anteriormente libres de enfermedades. Varios estudios recientes han examinado las relaciones

entre las variaciones climáticas en cortos períodos de tiempo y la ocurrencia de enfermedades infecciosas. En particular la influencia del fenómeno Niño/Niña sobre los patrones de transmisión de enfermedades de importancia para el hombre y que pueden convertirse en posible pandemias como lo son la malaria, dengue y el cólera (Anyamba *et al.*, 2006).

En las últimas décadas, el ciclo entre la fase cálida (el Niño) y la fría (Niña) en la temperatura de la superficie del agua ha presentado una tendencia irregular lo que ha ocasionado una alta variabilidad climática a varias escalas espaciales. Los efectos del evento Niño/Niña producen cambios marcados en la temperatura de la superficie del océano que tienen un efecto sobre los patrones de temperatura y precipitación en los ecosistemas tropicales produciendo exceso de lluvia en algunos lugares y la falta de la misma en otros (Kovats *et al.*, 2003). Se espera que la intensidad de este fenómeno se incremente como consecuencia del CCG. Hasta el momento se desconoce, debido a una falta de evidencia científica, cuales serían los efectos futuros de un mayor espectro de variabilidad en las condiciones de los ambientes costero-marinos. Sin embargo se especula una posible disminución de las poblaciones más vulnerables por efecto del aumento en la frecuencia y por la aparición de nuevas enfermedades.

La aceleración del blanqueamiento del coral ocasionado por infecciones oportunistas durante períodos elevada temperatura de la superficie del océano (Harvell *et al.*, 2002), la aparición del nuevo virus *Rhabdoviridae novithabdovirus* causante de la septicemia hemorrágica viral (VHS, por sus siglas en inglés) en varios peces marinos y dulceacuícolas y la aparición del protozooario *Perkinsus* sp. que actualmente afecta a varias poblaciones de bivalvos en estado natural o cultivados (Stenseth *et al.*, 2006) son un ejemplo de enfermedades emergentes infecciosas ocasionadas por las fuertes alteraciones en las condiciones ambientales asociadas al CCG.

Adicionalmente a los efectos mencionado anteriormente, el incremento en la frecuencia e intensidad de los huracanes y tormentas (Nortes) pueden tener efectos mucho mas largos en la salud de los ecosistemas incluyendo la salud de la especie humana (tabla 1). La presencia de huracanes y tormentas de alta intensidad usualmente terminan ocasionando inundaciones en zonas bajas y de alta vulnerabilidad como lo que actualmente esta ocurriendo en Villahermosa (Tabasco) o partes de los estados de Veracruz y Campeche. Estas inundaciones que cada vez tienen una duración más larga ocasionan desde la contaminación de las reservas de agua potable hasta la diseminación e incremento de enfermedades infecciosas. Ejemplos de estos se han observado después del paso del huracan Emily en el 2005 en Quintana Roo, el huracán Arthur en Chiapas en 2008 o durante y después de las inundaciones de Tabasco y Chiapas en 2007 y 2009 causadas por lluvias excesivas. Sin embargo los efectos a corto, mediano y largo plazo de estos eventos extremos sobre los componentes de los diversos ecosistemas costero marinos, en estos ambientes, han sido poco explorados a pesar de que se conocen los posibles riesgos.

**Tabla 1.** Ejemplos de los efectos del cambio climático global sobre los ecosistemas marinos, debido a los cambios en la frecuencia e intensidad de los eventos ambientales.

Dirección y tendencia de los fenómenos	Impacto en los ecosistemas marinos
Incremento en los niveles fisiológicos de las especies.	Acidificación del océano, daños morfológicos y de CO <sub>2</sub> .
Calentamiento de la superficie del agua.	Problemas de la calidad del agua, modificación de los parámetros fisicoquímicos del agua, mareas rojas.
Incremento en los patrones de precipitación.	Efectos adversos en la calidad del agua, contaminación del manto freático.
Incremento en la frecuencia e intensidad de los huracanes.	Modificación de la estructura y función de los ecosistemas, incremento en la frecuencia y aparición de nuevas enfermedades en los organismos.
Incremento en el nivel del mar.	Intrusión en la cuña salina. Modificación de hábitats, invasión de especies.

## **TENDENCIAS, ESCENARIOS Y CONSIDERACIONES FUTURAS**

Los ecosistemas costeros-marinos están considerados como uno de los más importantes desde el punto de vista socio-económico y cultural debido a su alta diversidad y riqueza de sus recursos naturales que proveen bienes y servicios por aproximadamente 14 trillones de dólares anualmente (Constanza *et al.*, 1997). Sin embargo existe un consenso uniforme de la comunidad científica que la presión antropogénica agudiza los efectos del CCG. De continuar la tendencia nos encontraremos ante una seria degradación ambiental que tendrán una consecuencia en la estructura y diversidad de los ecosistemas costeros-marinos, tal y como los conocemos actualmente. En años recientes los efectos del CCG se han hecho evidentes en la regiones árticas en donde la depleción de la capa de ozono, debido el incremento en los niveles de CO<sub>2</sub>, ha causado alteraciones en los patrones de abundancia y diversidad de grupos que incluyen al fitoplancton (Hoffman *et al.*, 2003) y larvas de invertebrados (Pechenik, 1987). Sin embargo los efectos sobre los ecosistemas costero-marinos en regiones tropicales son de alta incertidumbre. Esto debido principalmente a la complejidad de los ecosistemas y a su potencialmente alto grado de resiliencia, elasticidad y adaptabilidad de los mismos.

Una de las conclusiones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2008) es que hasta el momento los océanos han estado funcionando como receptores de calor absorbiendo casi en su totalidad la energía proveniente del calentamiento global minimizando el impacto sobre el deshielo y sobre el incremento de la temperatura en la atmósfera. Nuevas evidencias han mostrado que la absorción de este calor ha provocado cambios en los ecosistemas marinos y de agua dulce que incluyen cambios en los rangos de variabilidad en los patrones temporales de la abundancia del fitoplancton y peces, cambios en los patrones migratorios de ciertas especies de peces y cambios en la estructura y abundancia de los arrecifes coralinos. A pesar de esta evidencia hay ecosistemas que parecen estar resistiendo las consecuencias del

CCG. Sin embargo hay que ser cautelosos con esta aseveración. En la mayoría de las ocasiones el análisis de los datos ha resultado insuficiente o con una alta grado de incertidumbre que enmascara los efectos.

La tendencia futura apunta a que la emisión de gases invernadero seguirá aumentando, a menos que los acuerdos internacionales y la conciencia individual de cada uno de nosotros acepten reducir las actividades que producen la emisión de los mismos. Las evidencias indican que los ecosistemas más frágiles (*e.g.* arrecifes de coral) son los que en este momento están sufriendo las consecuencias más evidentes del CCG con el riesgo de sufrir cambios irreversibles que los lleven a otro estado de equilibrio ecológico o que los lleven a la extinción total en un periodo relativamente corto de tiempo. Los ecosistemas costeros-marinos de ambientes tropicales, que hasta el momento no han mostrado signos de los efectos del CCG no están exentos de los mismos. La resiliencia, elasticidad y adaptabilidad de los mismos pueden estar jugando un papel importante para absorber dichos efectos. El aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos en conjunto con los insultos ambientales antrópicos pueden llegar a romper el estado de equilibrio dinámico actual de estos ecosistemas. ¿Cuál es el grado de resiliencia, elasticidad y adaptabilidad de estos ecosistemas? ¿De que frecuencia e intensidad deben de ser los eventos extremos para ocasionar efectos irreversibles a los ecosistemas? Representan preguntas importantes para generar modelos predictivos que permitan poner en marcha medidas de mitigación contra tales efectos.

Es indudable que muchos de los efectos que actualmente se están interpretando como consecuencia directa del CCG, sobre todo los observados a escalas locales, pueden no estar asociados directamente a estos cambios. Sin embargo hay que reconocer que el incremento en los niveles en la emisión de los gases de efecto invernadero está ocasionando cambios a nivel global que en algún punto en el tiempo se verán reflejados a escalas locales y puntuales.

La vida como ahora la conocemos, ocurrió debido al extraordinario efecto de oxigenación de la atmosfera causada por un exceso en la emisión del oxígeno de la cianobacterias hace varios millones de años. Esto no quiere decir que estemos en una situación similar, sin embargo el exceso en la emisión de los gases efecto invernadero pueden llevarnos a un cambio drástico en la estructura, función y diversidad de los ecosistemas en un periodo relativamente corto de tiempo evolutivo.

## LITERATURA CITADA

- Aburto-Oropeza A., E. Ezcurra, G. Danemann, V. Valdez, J. Murray, y E. Sala, 2008. Mangroves in the Gulf of California increase fishery yields. *Proceedings of the National Academy of Science*, 105: 10456-10459.
- Anyamba, A., J. P. Chretien, J. Small, C. J. Tucker, y K. J. Linthicum, 2006. Developing global climate anomalies suggest potential disease risks for 2006-2007. *International Journal of Health Geographics*, 5:60.

- Beldomenico, P. M., O.J. Damien, M. M. Uhart, y W.B. Karesh, 2008. Wildlife Health as an Indicator of Climate Change. p. 192-198. *In*: D. A. Relman, M.A. Hamburg, E.R. Choffnes, and A. Mack, (Eds). Global climate change and extreme weather events: understanding the contributions to infectious disease emergence. The National Academies Press, Washington.
- Connell, J. H., T.P. Hughes, y C.C. Wallace, 1997. A 30-year study of coral abundance, recruitment, and disturbance at several scales in space and time. *Ecological Monographs*, 67: 461-488.
- Convention on Biological Diversity (CBD), 2007. Biodiversity and Climate Change. International day of biology diversity report.
- Costanza R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farberk, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Suttonkk, y M. van den Belt, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253-260.
- Curtis, S., 2008. The Atlantic multidecadal oscillation and extreme daily precipitation over the US and Mexico during the hurricane season. *Clim. Dynam.*, 30: 343-351.
- Ehrlich P.R., y R.M. Pringle, 2008. Where does biodiversity go from here? A grim business-as-usual forecast and a hopeful portafolio of partial solutions. *PNAS*, 105: 11579-11586.
- Gracia, A., 1998. Pesquería artesanal del camarón. p. 173-184 . En: D. Flores, P. Sánchez-Gil, J. Seijo y F. Arreguín (eds.). Análisis y diagnóstico de los recursos pesqueros críticos del Golfo de México. EPOMEX Serie Científica 4. Universidad Autónoma de Campeche. 496 p.
- Gradinger, R., 1999. Integrated abundance and biomass of sympagic meiofauna in Arctic and Antarctic pack ice. *Polar Biol.*, 22(3): 169-177.
- Grimsditch, G.D., y R.V. Salm, 2006. Coral Reef Resilience and resistance to bleaching. IUCN, Gland, Switzerland. 52 p.
- Gonnecta, M.E., A. Paytan, y J.A. Herrera-Silveira, 2004. Tracing organic matter sources and carbon burial in mangrove sediments over the past 160 years. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61: 211-227.
- Harvell, C. D., C.E. Mitchell, J. R. Ward, S. Altizer, A.P. Dobson, R. S. Ostfeld, y M. D. Samuel, 2002. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*, 296: 2158-2162.
- Hernández-Guevara, N.A., D. Pech, y P.L. Ardisson, 2008. Temporal trends in benthic macrofauna composition in response to seasonal variation in a tropical coastal lagoon, Celestun, Gulf of Mexico. *Marine and Freshwater Research*, 59: 772-779
- Hoffman, J.R., L.J. Hansen, y T. Klinger, 2003. Interaction between UV radiation and temperature limit inferences from single-factor experiments. *J. Phycol.*, 39: 268-272.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007a. Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007b. Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability. Working
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008. Group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC. Geneva, Switzerland:
- Jiang, J., y W. Perrie, 2007. The impacts of climate change on autumn North Atlantic midlatitude cyclones. *Journal of Climate*, 20: 1174-1187.

- Keeling, R.F., 2005. Comment on “The Ocean Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>” . *Science*, 308: 1743
- Kovats, R. S., M.J. Bouma, S. Hajat, E. Worrall, y A. Haines, 2003. El Niño and health. *Lancet*, 362:1481-1489
- Manabe, S., y R.J. Stouffer, 1993. Century-scale effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on the ocean-atmosphere system. *Nature*, 364: 215-218.
- May-Tec A.L., 2009. Fluctuación temporal de *Mexiconema cichlasomae* (Nematoda: Daniconematidae) en *Cichlasoma urophthalmum* (Vertebrata: Cichlidae) y en su hospedero intermediario *Argulus sp.* (Crustacea: Argulidae). Tesis de Maestría CINVESTAV, 50 p.
- McNeil, B.I., y R. J. Matear, 2008 Southern Ocean acidification: A tipping point at 450-ppm atmospheric CO<sub>2</sub>. *PNAS*, 105(48): 18860-18864.
- Nyström, M, C. Folke, y F. Moberg, 2000. Coral reef disturbance and resilience in a human-dominated environment. *Trends in Ecology and Evolution*, 15, 413-417.
- Parmesan, C., y G. Yohe, 2007. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 42: 37-42.
- Pech, D., Ardisson, P.-L., Hernández-Guevara, N. A. 2007. Benthic community response to habitat variation: a case of study from a natural protected area, the Celestun coastal lagoon. *Continental Shelf Research*, 27, 2523–2533.
- Pechenick, J.A., 1987. Environmental influences on larval survival and growth. p. 551-608. In: A.C. Giese, J.S. Pearse, and V.B. Pearse. *Reproduction of Marine Invertebrates*. Blacwell scientific Pub.
- Pérez Pérez M., R. Burgos Rosas, K. Cervera Cervera, y J.C. Espinoza Méndez, 2009. Situación pesquera del caracol *Strombus gigas* en Yucatán. Foro Regional de Caracol del Golfo de México y Mar Caribe. Inapesca.
- Schmittner, A., 2005. Decline of the marine ecosystem caused by a reduction in the Atlantic overturning circulation. *Nature*, 434: 628-633.
- Stenseth, N. C., N. I. Samia, H. Viljugrein, K. L. Kausrud, M. Begon, S. Davis, H. Leirs, V. M. Dubyanskiy, J. Esper, V. S. Ageyev, N. L. Klassovskiy, S. B. Pole, y K. S. Chan, 2006. Plague dynamics are driven by climate variation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103:13110-13115.
- UNESCO, 2000. World Migration Report. New York, USA 287 p.
- Vecchi, G., y B.J. Soden, 2007. Effect of remote sea surface temperature change on tropical cyclone potential intensity. *Nature*, 450: 1066-1070
- Wake, DB., V.T. Vredenburg, 2008. Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians. *Proceedings of the National Academy of Science*, 105: 11466-11473.
- Wilkinson, C., y D. Souter, 2008. Status of Caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in 2005. Global Coral Reef Monitoring Network, and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, 152 p.



Lara Flores, M., 2010. Importancia de la diversidad y ecología marina microbiana en los ecosistemas marinos costeros, p. 277-288. 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.

---

# Importancia de la diversidad y ecología marina microbiana en los ecosistemas marinos costeros

*Maurilio Lara Flores*

---

## RESUMEN

Los océanos del mundo con una línea de costa de 312 000 km. y un volumen de  $137 \times 10^6 \text{ km}^3$ , son los ecosistemas más grandes de la tierra y han sido usados de diferentes maneras por el ser humano durante su existencia. Por este gran volumen de agua y la vasta área que ocupa, la influencia de los océanos en el clima mundial es significativamente predominante. Los microorganismos se encuentran en cualquier parte en la naturaleza y ocupan un importante lugar en el desarrollo de la vida humana. Los microorganismos marinos representan una fuente potencial para la comercialización de importantes compuestos bioactivos y sus capacidades como bioremediadores son sobresalientes. Asimismo, participan de manera crucial en la descomposición de materia orgánica y en los ciclos de los nutrientes. Los microorganismos también sirven como fuente de alimento de algunos organismos inferiores. Sin embargo, el conocimiento de la diversidad de microorganismos marinos ha sido extremadamente limitada por el estudio de los microorganismos que han sido cultivados con fines industriales. Esta limitación en el conocimiento de la ecología microbiana ocasiona que la interacción de esta con el balance ecológico se desconozca y por lo tanto los efectos que el cambio climático pueda ocasionar en toda la cadena trófica.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los tres mayores hábitats de la biosfera, el reino marino, que cubre el 70% de la superficie del planeta, provee de grandes espacios habitables para los organismos, particularmente para los microorganismos. Los microorganismos marinos no solo se desarrollan en la superficie del agua de los mares sino que también en regiones superficiales y profundidades abismales, desde la costa hasta el mar abierto, desde el océano en general hasta nichos especializados, como las aguas circundantes de los arrecifes coralinos y las fumarolas de las ventanas termales en el lecho marino (Qasim, 1999).

El término “microorganismo” engloba a un extenso y diverso conjunto de organismos, como las bacterias, virus, protistas y hongos, que presentan características morfológicas, ecológicas y fisiológicas muy diferentes entre sí. Aunque los microorganismos son raramente visibles al ojo humano, se estima que la mitad de la biomasa existente en la tierra es microbiana (Whitman *et al.*, 1998). Más aún, la vida microbiana está ampliamente distribuida de tal forma que los microorganismos son encontrados en todos los ecosistemas. Por lo tanto, el término de ecología microbiana es usado para describir la presencia y contribución de los microorganismos a través de sus actividades en el lugar donde son encontrados.

Los microorganismos marinos empezaron a estudiarse hace apenas unos 25 años y recientemente se han reportado grupos microbianos hasta ahora desconocidos como el SAR11 y los picaotótrofos como el *Prochlorococcus*, lo cual representa un avance significativo en el entendimiento y complejidad de la diversidad microbiana marina (Das *et al.*, 2006). Sin embargo, la diversidad microbiana se encuentra subestimada desde el punto de vista de que la diversidad biológica se basa en el número de especies conocidas de cada grupo. Es cierto que el concepto de especie bacteriana es más tipológico y menos evolucionado que la plantas y animales, sin embargo, es más amplio e inclusivo (Ward, 1998).

La exploración de la diversidad microbiana es un tópico de importancia e interés considerable a desarrollar. Además, el análisis de la biodiversidad microbiana puede ayudar a aislar e identificar nuevos microorganismos con potencial para obtener nuevos compuestos de utilidad industrial y farmacéutica.

## DIVERSIDAD BACTERIANA MARINA

El estudio de la diversidad bacteriana marina es de suma importancia para entender la estructura de las comunidades y su patrón de distribución. Las bacterias, generalmente, tienen un tamaño entre 1 y 2 micras. En el ambiente marino el 90% de las bacterias son Gram-negativas con diferentes características y la pared celular está mejor adaptada para su supervivencia en ambientes marinos (Whitman *et al.*, 1998). Basados en el análisis de la secuencia molecular 16S mRNA, existen tres dominios: Archaea, Bacteria y Eucariote. El Archaea incluye microorganismos que crecen bajo condiciones extremas y que se diferencian del Bacteria en la ausencia de peptidoglucano. Ambos dominios de manera colectiva juegan un papel significativo en el ambiente marino. Los diferentes grupos fisiológicos y sus funciones se explican en la tabla 1.

**Tabla 1.** Diferentes grupos fisiológicos de bacterias marinas.

Grupo	Fisiología	Papel en el ambiente marino	Ejemplo
<i>Archaeobacteria</i> Bacterias sulfato-reductoras.	Quimioautótrofos, anaerobios, termófilos y mesófilas.	Contribuyen con más del 50% de la conversión del carbono en los sedimentos costeros, toman parte en el ciclo de compuestos azufrados en el agua marina.	<i>Desulfomonas</i> , <i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfobulbus</i> , <i>Desulfotomaculum</i> y <i>Desulfococcus</i>
Bacterias metanogénicas.	Quimioautótrofos, anaerobios estrictos, utilizan un número limitado de compuestos simples de carbono (hidrógeno, dióxido de carbono, acetato y metanol).	Utilizan trimetilamina como sustrato en los ambientes marinos y produce metano como producto final de su metabolismo energético.	<i>Methanococcus</i> , <i>Methanosarcina</i> , <i>Methanomicrobium</i> , <i>Methanogenium</i> , <i>Methanoplanus</i> , <i>Methanococcoides</i> y <i>Methanobolus</i>
Bacterias halofilas.	Requieren al menos 12-15% de NaCl para sobrevivir y su mejor crecimiento se obtiene en concentraciones cercanas a la saturación.	Forman colonias rojas ocasionado por las altas concentraciones de caroteno que poseen y dominan ambientes con salinidades altas, como las salinas y los lagos salados; regulan la presión osmótica por su capacidad de resistir los efectos desnaturalizantes de la sal en el ambiente.	<i>Haloarcula</i> , <i>Halobacterium</i> , <i>Haloferax</i> y <i>Halococcus</i>
Eubacteria. Bacterias luminosas.	Producen luz a partir de una proteína llamada luciferina al contacto con moléculas de oxígeno; son bacilos Gram-negativo, móviles y heterótrofos.	La bioluminiscencia en la profundidad de los océanos ayuda a los organismos a defenderse y evadir a los predadores, funciona para atraer a las presas y como camuflaje. Las bacterias luminosas participan en los ciclos de los nutrientes en el mar y contribuyen en la nutrición de organismos marinos como parte de su microflora intestinal.	<i>Photobacterium leiognathi</i> , <i>Photobacterium phosphoreum</i> , <i>Vibrio fischeri</i> y <i>Vibrio Harvey</i>
Bacterias nitrificantes.	Oxidan el amonio a nitritos ( <i>Nitrosococcus</i> ) o los nitritos en nitratos ( <i>Nitrococcus</i> ) y convierten el nitrógeno a una forma biodisponible.	Son extremadamente importante en los procesos biológicos desde el punto de vista que cargan positivamente a los iones de amonio para enlazarlos a partículas de sedimento acidificado donde se vuelven disponibles para procesos biológicos; son más abundantes en aguas someras que en aguas profundas.	<i>Nitrococcus</i> , <i>Nitrosococcus</i> , etc.

## PAPEL DE LAS BACTERIAS EN EL AMBIENTE MARINO

El ambiente marino está caracterizado por parámetros extremos como altas presiones, salinidad, bajas temperaturas, ausencia de luz, etc. y las bacterias marinas heterotróficas se han adaptado para sobrevivir en este ambiente, ya que requieren  $\text{Na}^+$  para su crecimiento, el cual es esencial para mantener un ambiente osmótico para la protección de la integridad celular. Las bacterias oligotróficas están aun más adaptadas por la baja cantidad de nutrientes disponibles. La función más importante de las bacterias heterotróficas es la de promover los procesos de degradación, descomposición y mineralización tanto en los sedimentos como en el agua superficial, y liberar las sustancias orgánicas e inorgánicas al sistema (Purushothaman, 1998). La mineralización por parte de las bacterias de la materia orgánica, la cual es derivada de los productores primarios, resulta en el reciclado de estos elementos que son nuevamente disponibles para los productores primarios. Los microorganismos heterotróficos son los componentes principales de la materia orgánica en los océanos. Estas bacterias heterotróficas comprenden la mayor parte de la población microbiana que habita la columna de agua de los océanos y son responsables de muchas de las transformaciones biológicas de la materia orgánica y de la producción de dióxido de carbono (Sherr y Sherr, 1996).

La distribución de las bacterias depende en los cambios en la temperatura del agua, salinidad y otros parámetros fisicoquímicos; si estos varían por efecto del cambio climático la comunidad bacteriana se vería afectada ocasionando graves problemas en las funciones de éstas en la cadena trófica (Alavandi, 1990). Las bacterias también sirven como una fuente importante de comida para una amplia variedad de organismos marinos. No solo mantienen la naturaleza prístina del ambiente, sino también sirven como mediadores biológicos por medio de su participación en los procesos biogeoquímicos.

## DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Las bacterias juegan un papel decisivo en el ciclo de la materia orgánica en el agua, ya que son capaces de descomponer los compuestos orgánicos, en los componentes de los cuales fueron originados. La descomposición de las proteínas es realizada por bacterias proteolíticas, por ejemplo *Pseudomonas* y otras Eubacteria (Alavandi, 1990). La celulosa es descompuesta por bacterias celulíticas, por ejemplo *Cytophaga*, *Sporocytophaga* (Alavandi, 1990). La quitina, la cual es sintetizada por muchos organismos marinos como material extracelular de las algas, paredes celulares de algunas clorofilas, exoesqueletos, incluyendo mudas de copépodos y otros invertebrados es difícil de degradar, sin embargo, este biopolímero es degradado por bacterias quitonolíticas y quitonoclasticas (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Vibrio*) por la producción de la enzima quitinasa (Goody, 1990; Mulish, 1993). Las pectinas son también descompuestas por numerosas bacterias en condiciones anaerobias (*Clostridium pectinovorum*) y sus productos finales son ácido péptico y metanol. Por lo anterior sin las bacterias marinas no podría realizarse el reciclado de los elementos base que conforman los compuestos orgánicos esenciales.

## CICLO MINERAL

Los microorganismos tienen un papel primordial en los ciclos minerales en los ambientes marinos. El carbono, el cual forma parte de toda la materia orgánica, pasa por un ciclo de transformación constante en el cual intervienen varios tipos de bacterias heterotróficas. El nitrógeno, que es el constituyente principal de las proteínas, es reciclado en el ambiente acuático por diversas bacterias. La nitrificación es un proceso aeróbico en el que intervienen bacterias aeróbicas obligadas, mientras que la desnitrificación es un proceso realizado por bacterias anaerobias facultativas. La fijación del nitrógeno molecular es realizado de manera intracelular por varias bacterias, como el *Azobacter*, *Clostridium*, etc., lo que muestra la importancia de estos microorganismos en la reutilización de este elemento químico. La oxidación microbiana es el único proceso bioquímico en la naturaleza que convierte los compuestos sulfurados a sulfatos, lo cual representa el último paso de la mineralización de compuestos orgánicos de azufre y sirve como fuente de azufre para las plantas. Este proceso es llamado sulfurización, en cual, intervienen bacterias sulfato-reductoras como *Desulfovibrio*, *Desulfomonas*, etc. De aquí la importancia de la diversidad microbiana en la conservación de los ciclos biogeoquímicos marinos.

## SEDIMENTACIÓN

Las bacterias son parte importante en la formación de sedimentos a través de sus actividades metabólicas (Sabu, 2003). Debido a la actividad bacteriana en los sedimentos, la cantidad de materia orgánica disminuye gradualmente y su composición cambia. Como los compuestos que son menos complejos son los primeros en degradarse, la proporción de compuestos de difícil degradación se incrementa proporcionalmente a la profundidad del lecho marino, dado que, las bacterias colonizan partículas suspendidas, con lo cual cambian su tamaño y textura y consecuentemente su tasa de sedimentación. De acuerdo a lo anterior, los mayores contribuidores a la degradación de material orgánico y sedimentación en el mar profundo son las bacterias (Sabu, 2003).

## VIRUS MARINOS: IMPORTANCIA ECOLÓGICA

Los virus son considerados el componente numéricamente dominante en todos los sistemas acuáticos y los más comunes en los ambientes marinos (Fuhrman, 1999), pero son pocos los virus marinos conocidos. Las densidades virales normalmente exceden a las densidades bacterianas en una relación de 1 a 2 en el agua marina (Danovaro *et al.*, 2002). Existen reportes que sugieren que la mayor abundancia de bacterias que de virus en el sedimento del océano profundo, es debido a que el crecimiento viral depende de complejas interacciones con factores bióticos y abióticos, incluyendo el estado metabólico bacteriano y el aporte de virus por parte de la columna de agua (Danovaro *et al.*, 2002). Debido a su abundancia en ambiente marino

( $10^9$  a  $10^{10}$  virus/l) y su habilidad para infectar bacterias y fitoplancton, influyen en gran medida a la biodiversidad bacteriana y a la producción primaria de fitoplancton en los sistemas oceánicos (Suttle *et al.*, 1990). De esta forma los virus pueden ejercer un efecto profundo en la dinámica microbiana y en los ciclos biogeoquímicos, por medio de la destrucción celular de las bacterias y el fitoplancton, los virus pueden alejar el carbono de los grandes bacteriovoros y herbívoros y consecuentemente regresar el carbono, el cual puede ser utilizado de otra manera a niveles tróficos superiores por medio del carbono orgánico oceánico disuelto (Reid y Edwards, 2001). Además, los virus juegan un papel primordial en la producción de gas de dimetil sulfuro (DMS). El DMS es el compuesto de azufre volátil más abundante en el agua marina y es producido principalmente por la hidrólisis enzimática del dimetil sulfopropionato (DMSP) en los procesos osmóticos en las algas y constituye aproximadamente la mitad del flujo mundial de azufre biogénico que es liberado a la atmósfera. Posteriormente el DMSP producido por el fitoplancton es liberado a su fase disuelta en el mar a través de la lisis viral. En términos de la relación que tiene este mecanismo entre el plancton y su influencia en el clima, la producción de DMS biogénico juega un papel muy importante, dado que, un incremento en la temperatura de los océanos podría ocasionar que este compuesto se volatizara a mayor velocidad ocasionando un incremento en el azufre atmosférico lo cual, a largo plazo, se vería reflejado en una atmósfera cada vez más venenosa para los organismos. Aunque una parte del DMS es oxidado por las bacterias y por reacciones fitoquímicas, una porción significativa es liberada al mar y es oxidada a dióxido de azufre o sulfatos gaseosos por los virus (Reid y Edwards, 2001). A pesar de estos factores, la diversidad viral es poco estudiada. Los virus son un factor importante que influye en las concentraciones de carbono, una variación en sus poblaciones ocasionada por cambios de la temperatura y salinidad podrían afectar significativamente las concentraciones de carbono ocasionando una disminución en el oxígeno disponible de los océanos afectando a todo el ecosistema marino.

## ACTOMICETOS MARINOS

Los actomicetos son bacterias Gram-positivas con filamentos ramificados. Por sus características morfológicas no bien desarrolladas y de cultivo, los actomicetos han sido considerados como un grupo diferente al de las bacterias comunes. Los actomicetos han ganado interés a partir de su capacidad de producir metabolitos secundarios bioactivos y enzimas. La biodiversidad de los actomicetos han sido estudiados en diferentes nichos marinos como el mar profundo, aguas somera y manglares (Rathna Kala y Chadrika, 1995). Aunque los primeros actomicetos fueron considerados como terrestres, los avances en biología molecular han demostrado que tiene un origen marino completamente separados de los terrestre (Curtis *et al.*, 2002).

Se ha observado que la mayor diversidad de actomicetos se encuentran en suelos cálidos o ligeramente ácidos que en el agua, sin embargo, en diversos estudios se han aislado estos de sedimentos marinos reportando diversos géneros (Barcina *et al.*, 1987). Lechevalier y Lechevalier

(citado por Das *et al.*, 2006) han descrito 32 géneros de actomicetos en base a su composición química en sedimentos marinos entre los cuales se encuentran *Actinomyces*, *Actinopolyspora*, *Micromonospora*, *Micropolyspora*, *Nocardia*, *Rhodococcus*, *Streptomyces*, *Streptosporangium* y *Streptoverticillium* (Das *et al.*, 2006).

La degradación y conversión de diversos materiales es un proceso continuo mediado por la acción de una gran variedad de microorganismos. Existe la teoría de que el aumento o disminución de una enzima en particular producida por los microorganismos puede indicar la concentración del sustrato natural y las condiciones del ambiente, de tal forma, que el aumento o disminución de actomicetos que intervienen en la reutilización y degradación de ciertos componentes de la materia orgánica en el lecho marino pueden, influir en la biodiversidad microbiana, de la flora y de la fauna, dado que, las enzimas específicas que producen degradan componentes que no son posibles de degradar por otras especies de organismos (Pisano *et al.*, 1992).

## HONGOS EN EL AMBIENTE MARINO

Los hongos han existido desde el inicio de la vida en el hábitat marino, sin embargo, su importancia en los procesos ecológicos marinos ha sido menospreciado (Kohlmeyer y Kohlmeyer, 2003). Hughes (2001) menciona que los hongos marinos no pueden ser definidos estrictamente en base a criterios fisiológicos exclusivamente y que se necesita incluir sus funciones ecológicas al definirlos. Los hongos marinos han sido clasificados como obligados y facultativos, donde los que habitan en ambientes marinos exclusivamente y producen esporas se les denomina obligados; los que se desarrollan en agua dulce o en el medio terrestre y tienen la habilidad de esporular y crecer en medio marino se denominan facultativos. Los hongos marinos contribuyen al flujo de energía y a la productividad de un ecosistema aportando carbono orgánico para satisfacer las necesidades de otros organismos en niveles tróficos superiores. Sin embargo, son organismos muy sensibles a los cambios de temperatura y una variación de apenas 5° C puede ocasionar que su desarrollo se vea comprometido, con lo que la cadena trófica puede verse afectada al limitar los aportes de nutrientes que estos emiten al medio (Buchalo *et al.*, 1999).

Los hongos marinos han sido estudiados en los diferentes sustratos marinos. La última estimación de hongos marinos es de 1 500 especies. Los hongos marinos obligados tienen cerca de 800 especies los *Basidiomycotina*, *Ascomycotina*, líquenes asociados a hongos y levaduras (Kohlmeyer y Kohlmeyer, 2003), y el número de especies de hongos superiores filamentosos marinos es de un 465 aproximadamente.

## BIOGEOGRAFÍA DE LOS HONGOS MARINOS

Se han realizado diversos estudios para determinar la distribución geográfica de los hongos en el medio marino (Kohlmeyer y Kohlmeyer, 2003). Como se mencionó anteriormente la

temperatura es el factor más importante entre los parámetros ambientales y biológicos que determinan la distribución de los hongos marinos dependiendo su supervivencia de que esta se mantenga en los rangos necesarios para su óptimo desarrollo, aunque la disponibilidad de sustratos u hospederos, la presión hidrostática y la concentración de oxígeno son también factores importantes en la distribución de los hongos marinos en los océanos del mundo. Hughes *et al.* (2001) propone la existencia de 5 zonas de distribución de los hongos con base en la temperatura superficial del mar: Ártico, templada, subtropicales, tropicales y Antártida.

## **IMPORTANCIA ECOLÓGICA DE LOS HONGOS MARINOS**

En el ambiente marino, los hongos endolíticos son importantes en los animales que producen estructuras calcáreas, ya que, producen carbonato a partir del detritus en las profundidades marinas (Tudhope y Risk, 1985). Los hongos son organismos importantes dentro del ciclo de los nutrientes por su capacidad para descomponer materia orgánica. Los hongos y otros heterótrofos que se encuentran en la hojarasca, humus y porciones minerales de los suelos, aprovechan la materia orgánica en descomposición que es rica en energía y liberan los nutrientes que se encuentran en las sustancias en descomposición. De esta manera, los hongos marinos, contribuyen al flujo de energía y productividad en un ecosistema, ya que, contribuyen de manera determinante en el aporte de carbono orgánico que es utilizado por otros organismos en niveles tróficos superiores.

## **IMPORTANCIA DE LOS MICROORGANISMOS EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS**

Los microorganismos participan en el balance ecológico en los diferentes ecosistemas marinos y aportan elementos necesarios para el desarrollo de los mismos. A continuación se explicará de manera breve el papel que juegan estos en cada uno de los ecosistemas costeros-marino más importantes.

### **ECOSISTEMA DE MANGLAR**

Los manglares son ecosistemas intermareales de los trópicos, los cuales mantienen diversos grupos de organismos acuáticos y terrestres. Estos ecosistemas están situados en la interfase entre los ambientes marinos y terrestres y mantienen a un diverso grupo de microorganismos.

En estos sistemas se encuentran diferentes grupos de bacterias las cuales obtienen alimento del detritus y a su vez ayudan al ecosistema en diversas formas (Holguin *et al.*, 2001). Estas bacterias realizan diversas actividades en el ecosistema como la fotosíntesis, fijación de nitrógeno, metanogénesis, agarolisis, producción de antibióticos y enzimas, etc., lo cual resulta en una alta productividad (Kathiresan y Bingham, 2001).

Con respecto a la diversidad de hongos marinos, los manglares son el mejor hábitat de estudio y los que mayor atención han tenido dado que los hongos que habitan la madera de mangle constituyen más del 50% de las 450 especies de hongos marinos (Purushothaman, 2000). Los bosques de mangle generan una considerable cantidad de detritus como hojarasca, desechos de madera e inflorescencias, las cuales constituyen un ambiente ideal para muchos microorganismos dependientes de detritus (Sridhar, 2004). Las poblaciones de estos hongos están involucradas en los procesos de descomposición de los detritus con lo que colaboran en el 50% de la descomposición del material, el cual es aprovechado por diversas especies de organismos.

## ARRECIFES DE CORAL

Los arrecifes de coral se encuentran entre los ecosistemas acuáticos más importantes por su productividad. Los arrecifes coralinos son definidos como comunidades complejas de organismos marinos, los cuales en conjunto son capaces de construir, modificar o mantener el ambiente de la costa mediante la formación de limo calcáreo.

Los sedimentos de los arrecifes son una de las principales fuentes de nutrientes, especialmente de fósforo y nitrógeno lo cual es resultado de la actividad bacteriana. Los corales producen mucus el cual es el principal producto en el metabolismo del arrecife como una fuente importante de material orgánico y mantiene a gran parte de la actividad bacteriana. El mucus del coral consiste principalmente en polisacáridos y proteína, siendo éste un excelente sustrato de crecimiento bacteriano (Meikle, 1988).

## MAR PROFUNDO

Del total de la superficie marina solo del 7-8% es área costera y el resto es mar profundo y el 60% es agua con una profundidad mayor de los 2 000 metros. El mar profundo es un ambiente único y extremo caracterizado por altas presiones, baja temperatura, poca luz y concentraciones de oxígeno y salinidad variables. Por lo tanto, un área tan vasta, el conocimiento, entendimiento y estudio acerca de los microorganismos que habitan el mar profundo son escasos. Sin embargo, se presenta como una buena fuente de nuevos microorganismos con potencial biotecnológico (Bull *et al.*, 2000).

Las primeras bacterias del mar profundo fueron por aisladas Certes en 1882 (citado por Deming y Yager, 1992). Certes aísla bacterias barotolerantes (resistentes a las altas presiones) de profundidades de 5 000 metros y sugiere que estos microorganismos se encuentran en estado latente suspendidos en la columna de agua. Posteriormente Zobell en 1959 (citado por Das *et al.*, 2006) aísla bacterias heterotróficas a profundidades mayores de los 1 000 metros, las cuales, presentan la propiedad de utilizar carbono orgánico y materia orgánica disuelta en el medio a muy bajas concentraciones (Das *et al.*, 2006). Estas bacterias presentan la propiedad de producir sustancias poliméricas extracelulares y proveen de moléculas monoméricas y oligoméricas a otros metabolismos bacterianos o mezclas de materia orgánica, las cuales pueden ser utilizadas posteriormente como alimento para otros organismos (Deming y Yager, 1992).

Las investigaciones sobre la presencia y el papel que desempeñan los hongos en los sedimentos marinos han sido poco estudiados (Raghukumar y Raghukumar, 1998). La mayoría de los hongos marinos han sido aislados en zonas costeras, sin embargo, se cree que en zonas profundas del mar existe una gran diversidad de estos organismos de tipo bentónico. Lo anterior se basa en estudios de laboratorio en condiciones controladas simulando altas profundidades (altas presiones) se ha logrado la germinación de esporas, crecimiento del micelio y la actividad enzimática en el medio (Gautschi *et al.*, 2004).

## AMBIENTES EXTREMOS

Cualquier condición ambiental que puede ser percibida como más allá de los límites normales aceptables es una condición extrema (Satyanarayana *et al.*, 2005). Los ambientes extremos se pueden encontrar en muchas regiones del mundo y todos ellos están colonizados por microorganismos adaptado a estas condiciones. Las bacterias que se han adaptado para sobrevivir en estos ambientes son llamadas extremófilos. El estudio de la biodiversidad bacteriana en estos ambientes nos ayuda a comprender las relaciones existentes entre la bacteria y el ambiente, y permite conocer los mecanismos de adaptación a condiciones extremas (Kis-Papo *et al.*, 2001; 2003).

El número de especies de hongos en hábitats extremos es mucho menor que en los demás hábitats, mientras que los organismos superiores a menudo están ausentes (Kis-Papo *et al.*, 2001). En realidad se sabe poco acerca de los hongos que viven en ambientes extremos, a excepción del informe sobre la diversidad de hongos en los ambientes hipersalinos del Mar Muerto, que es uno de los ambientes más extremos en los que se desarrollan los microorganismos (Buchalo, *et al.*, 1999; Molitoris *et al.*, 2000; Kis-Papo *et al.*, 2003).

En general, condiciones de alta salinidad ejercen una fuerte selectividad sobre la biota, favoreciendo el desarrollo de formas halotolerantes y halófilas, en donde los microorganismos son los colonizadores primarios y, en algunos casos, los únicos capaces de sobrevivir en esos ambientes.

## CONCLUSIONES

A pesar de que la diversidad microbiana es una de las áreas más difíciles de la investigación en cuanto a biodiversidad, la estimación de la diversidad microbiana es necesaria para la comprensión de la biogeografía, los diferentes procesos oceánicos las interrelaciones entre comunidades y los procesos ecológicos (Curtis *et al.*, 2002). La conservación y la utilización de la diversidad biológica requiere de un conocimiento exhaustivo sobre la distribución de las especies a fin de mantener el equilibrio ecológico en un entorno. Los impactos antropogénicos en el ambiente marino han puesto en peligro la existencia de todos los seres vivos, incluidos los microorganismos. A medida que la comunidad microbiana participa en los procesos complejos del ecosistema, su distribución y diversidad biológica influirán en las características de un hábitat.

El cambio climático global ocasiona que las características físicas de los océanos cambien, lo cual influye en la diversidad de microorganismos presentes. Al cambiar esta diversidad, los diferentes procesos biogeoquímicos se ven afectados, y por lo tanto, los ciclos de los nutrientes se rompen sin poder llegar a la integración de elementos esenciales al medio. Si los elementos esenciales no llegan al ambiente las cadenas tróficas se rompen, la vida en el océano se ve alterada y cambia drásticamente la diversidad biológica hasta llegar a la desaparición de las especies.

Los seres vivos de mayor importancia en el balance ecológico que se ven afectados por el cambio climático son los microorganismos y sin embargo, su importancia a sido subestimada.

## LITERATURA CITADA

- Alavandi, SV., 1990. Relationship between heterotrophic bacteria and suspended particulate matter in the Arabian Sea (Cochin). *Indian Journal on Marine Science*, 30: 89-92.
- Barcina, I., J. Iriberry, y L. Egea, 1987. Enumeration isolation and some physiological properties of actinomycetes from sea water and sediment. *Systematic Applied Microbiology*, 10: 85-91.
- Buchalo, AS., SP. Wasser, HP. Molitoris, PA. Volz, I. Kurchenko, I. Lauer, y B. Rawal, 1999. Species diversity and biology of fungi isolated from Dead Sea. p. 283-300. In: SP. Wasser (ed.). *Evolutionary Theory and Processes: Modern Perspective*. Academic Press, New York.
- Bull, AT., AC. Ward, y M. Goodfello, 2000. Search and discovery strategies for biotechnology: the paradigm shift. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 64: 573-606.
- Curtis, TP., WT. Solan, y JW. Scannell, 2002. Estimating prokaryotic diversity and its limits. *Proceedings of the National Academic Science*, 99: 10494-10499.
- Danovaro, R., E. Manini, y A. Della 'Anno, 2002. Higher abundance of bacteria than of viruses in deep Mediterranean sediments. *Applied Environmental Microbiology*, 68: 1468-1472.
- Das, S., PS. Lyla, y S. Ajmal Khan, 2006. Marine microbial diversity and ecology: important and future perspective. *Current Science*, 90 1325-1335.
- Deming, JW., y PL. Yager, 1992. Natural bacterial assemblages in deep-sea sediments: towards a global view. p. 11-28. In: GT. Rowe and V. Pariente (eds.). *Deep-sea Food Chains and the Global Carbon Cycles*. Kluwer, Dordrecht.
- Fuhrman, JA., 1999. Marine viruses and their biogeochemical and ecological effects. *Nature*, 399 541-548.
- Gautschi, JT, T. Amagata, A. Amagara, FA. Valeriotte, SL. Mooberry, y P. Crew, 2004. Expanding the strategies in natural product studies of marine-derived fungi: A chemical investigation of Penicillium obtained from deep water sediment. *Journal of Natural Products*, 67: 362-367.
- Gooday, GW., 1990. The ecology of chiton degradation. *Advances in Microbiology Ecology*, 1 387-430.
- Holguin G., P. Vazquez, y Y. Bashan, 2001. The role of sediment microorganisms in the productivity, conservation and rehabilitation of mangrove ecosystems: an overview. *Biological Fertilizants Soils*, 33: 265-278.
- Hughes, JB., JJ. Hellmann, TH. Ricketts, y J. Bohannon, 2001. Counting the uncountable: statistical approaches to estimating microbial diversity. *Applied Environmental Microbiology*, 67: 4399-4406
- Kathiresan, K., y BL. Bingham, 2001. Biology of mangroves and mangrove ecosystems. p. 81-251. In: *Advances in Marine Biology*. Academic Press, UK.

- Kis-Papo T., I. Grishkan I, A. Oren, SP. Wasser, y E. Nevo, 2001. Spatiotemporal diversity of filamentous fungi in the hypersaline Dead Sea. *Micology Research*, 105: 749-756.
- Kis-Papo, T., A. Oren, SP. Wasser, y E. Nevo, 2003. Survival of filamentous fungi in hypersaline Dead Sea water. *Microbial Ecology*, 45: 183-190.
- Kohlmeyer, J., y BV. Kohlmeyer, 2003. Marine Ascpmycetes from algae and animal hosts. *Marine Botanic*, 46: 285-306.
- Molitoris HP., AS. Buchalo, I. Kurchenko, E. Nevo, BS. Rawl, SP. Wasser, y A. Oren, 2000. Physiological diversity of the first filamentous fungi isolated from the hypersaline Dead Sea. *Fungal Diversity*, 5: 55-70.
- Mulish, M., 1993. Chitin in protistian organisms: distribution, síntesis and deposition. *European Journal of Protistology*, 29: 1-18.
- Pisano MA., MJ. Sommer, y L. Taras, 1992. Bioactivity of chitinolytic actinomycetes of marine origin. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 36: 553-555.
- Purushothaman A., 1998. Microbial Diversity. p. 86-91. *In*: M.S. Swaminathan. Proceedings of the Technical Workshop on Biodiversity of Gulf of Mannar Marine Biosphere Reserve, Research Foundation, Chennai.
- Purushothaman, A., 2000. Fungal flora in mangrove ecosystem. *CAS in Marine Biology*, 128-147 .
- Qasim, SZ., 1999. The Indian Ocean: Images and Realities. Oxford and IBH, New Delhi.
- Raghukumar C., y S. Raghukumar, 1998. Barotolerance of fungi isolated from deep-sea sediments of Indian Ocean. *Aquatic Microbiology Ecology*, 15: 153-163.
- Rathna Kala, R., y V. Chadrika, 1995. Microbial production of antibiotics from mangrove ecosystem. *CMFRI Supplement Publications*, 61 117-122.
- Reid PC., y M. Edwards, 2001. Plankton and climate. p. 2191-2200. *In*: JH. Steele (ed.). Encyclopedia of Ocean Science. Academic Press, New York.
- Sabu A., 2003. Sources, properties and applications of microbiol therapeutic enzymes. *Indian Journal of Biotechnology*, 2: 334-341.
- Satyanarayana, T., C. Raghukumar, y S. Shivaji, 2005. Extremophilic microbe: Diversity and perspectives. *Current Science*, 89: 78-90.
- Sherr, EB., y BF. Sherr, 1996. Temporal Offset in oceanic production and respiration process implied by seasonal changes in atmospheric oxygen: The role of heterotrophic microbes. *Aquatic Microbial Ecology*, 1: 91-100.
- Sridhar, KR., 2004. Mangrove fungi in India. *Current Science*, 86: 1586-1587.
- Tudhope, AW., y MJ. Risk, 1985. Rate of dissolution of calcium carbonate sediments by microboring organisms from Devon Reef Australia. *Journal Sediment*, 55: 440-447
- Suttle, CA., AM. Chan, y MT. Cottrell, 1990. Infection of phytoplankton by virases and reduction of primary productivity. *Nature*, 347: 467-469.
- Ward, DMA., 1998. A natural species concept for prokaryotes. *Current Opinion on Microbiology*, 1: 271-277.
- Whitman, WB., DC. Coleman, y WJ. Wiebe, 1998. Prokaryotes: the unseen majority. *Proceedings of National Academy Science*, 95: 6578-6583.