

# IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA ZONA COSTERA

ALEJANDRO YÁÑEZ-ARANCIBIA (EDITOR)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Instituto Nacional de Ecología  
Instituto de Ecología, A.C.  
Texas Sea Grant Program



# IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA ZONA COSTERA

*Alejandro Yáñez-Arancibia*  
EDITOR



D.R. © Primera edición: Agosto de 2010

© Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)  
Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco  
04530, México D. F.  
[www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)

© Instituto de Ecología A. C. (INECOL)  
Carretera antigua Xalapa-Coatepec No. 351  
El Haya, 91070 Xalapa  
Xalapa, Ver., México  
[www.inecol.edu.mx](http://www.inecol.edu.mx)

© *World right reserved. No part of this e-book may be stored in a retrieval system, transmitted, or reproduced in any way, including, but not limited to photocopy, photograph, magnetic or other record, without the prior and written permission of the publisher.*

El INECOL agradece la colaboración de *Texas Sea Grant College Program* -NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y Texas A & M University System-, para el desarrollo del Panel Internacional sobre Cambio Climático - Impactos sobre la Zona Costera, desarrollado en el Auditorio UNIRA, INECOL-2007 e INECOL-2008.

**ISBN: 978 607-7579-17-5, versión electrónica**

## CONTENIDO

<b>Presentación: El Instrumento <i>Panel</i> en el INECOL.....</b>	<b>5</b>
<i>Miguel Equihua Zamora</i>	
<b>Prólogo: INE-SEMARNAT.....</b>	<b>7</b>
<i>Alejandro Frías, Julia Martínez y Margarita Caso</i>	
<b>Directorio de Participantes.....</b>	<b>10</b>
<b>1. La Zona Costera frente al Cambio Climático: Vulnerabilidad de un Sistema Biocomplejo e Implicaciones en Manejo Costero.....</b>	<b>12</b>
<i>Alejandro Yáñez-Arancibia y John W. Day</i>	
<b>2. Causas y Consecuencias de la Erosión de Playas.....</b>	<b>36</b>
<i>Arturo Carranza-Edwards</i>	
<b>3. Programa Veracruzano de Acción ante el Cambio Climático: Síntesis de los Estudio.....</b>	<b>51</b>
<i>Carlos M. Welsh-Rodríguez y Adalberto Tejeda-Martínez</i>	
<b>4. Urbanización Resiliente: Primera Respuesta al Cambio Climático en las Costas del Golfo de México.....</b>	<b>67</b>
<i>John S. Jacob</i>	
<b>5. Los Manglares frente al Cambio Climático: ¿Tropicalización Global del Golfo de México.....</b>	<b>91</b>
<i>Alejandro Yáñez-Arancibia, John W. Day, Robert R. Twilley y Richard H. Day</i>	
<b>6. Impacts of Climate Change on Mediterranean Coastal Wetlands and Lagoons.....</b>	<b>127</b>
<i>Carles Ibáñez Martí</i>	

<b>7. Cambio Climático y Políticas Públicas Ambientales en Zonas Costeras y Marina.....</b>	<b>143</b>
<i>Amparo Martínez Arroyo</i>	
<b>8. El Mapa Climático como Estrategia de Políticas Públicas frente al Cambio Climático: El Caso de Veracruz.....</b>	<b>157</b>
<i>Saúl Miranda Alonso</i>	
<b>9. Panel INECOL 2007: Conclusiones - La Zona Costera en Crisis en el Golfo de México, el Caribe y el Mediterráneo.....</b>	<b>167</b>
<i>Alejandro Yáñez-Arancibia (Coordinador), John W. Day, John S. Jacob, Carles Ibáñez Martí, Amparo Martínez Arroyo, Saúl Miranda Alonso, Adalberto Tejeda Martínez, Carlos M. Welsh-Rodríguez y Arturo Carranza-Edwards</i>	
<b>10. Panel INECOL 2008: Conclusiones - La Zona Costera y sus Impactos Ecológicos, Económicos y Sociales.....</b>	<b>173</b>
<i>Alejandro Yáñez-Arancibia (Coordinador), John W. Day, John S. Jacob, Carles Ibáñez Martí, Amparo Martínez Arroyo, Saúl Miranda Alonso, Adalberto Tejeda Martínez, Carlos M. Welsh-Rodríguez y Arturo Carranza-Edwards</i>	

## **PRESENTACIÓN:**

### **EL INSTRUMENTO *PANEL***

La formulación de lineamientos de acción en preparación ante el cambio climático global es una agenda de primera importancia en el Instituto de Ecología A. C. (CPI-CONACYT).

El INECOL a través de su Unidad de Ecosistemas Costeros desarrolló, el 30 de Agosto de 2007, el *1er Panel Internacional sobre Cambio Climático INECOL 2007: La Zona Costera en Crisis en el Golfo de México, el Caribe y el Mediterráneo*. Dando seguimiento a esta iniciativa, el 16 de Octubre de 2008 se desarrolló el *2do Panel Internacional sobre Cambio Climático INECOL 2008: La Zona Costera y su Impacto Ecológico, Económico y Social*. Ambos eventos se desarrollaron en el Auditorio UNIRA del INECOL con la presentación de trabajos y un debate intenso de las propuestas formuladas. Estos espacios de reflexión tuvieron la participación del Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), el Programa Sea Grant Texas de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), la Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz a través del Centro Estatal de Estudios del Clima, Subcoordinación de Investigación en Cambio Climático, y el Instituto de Ecología A. C. Además se invitó a expertos de los Estados Unidos, España y México. En estos eventos se logró la asistencia de más de 250 personas en cada uno de ellos.

Las Conclusiones de todos los panelistas estuvieron publicadas en formato electrónico en la página de sitio del INECOL: <http://www.inecol.edu.mx>, y sirvieron de referencia en reuniones posteriores y cursos específicos de orientación. Esas Conclusiones han sido incorporadas como capítulos en el presente libro. En ambos paneles, la primera conclusión fue que, tanto para el Golfo de México como en las costas del Caribe y del Mediterráneo, la discusión académica ya no se centra en si existe o no el cambio climático, sino cual está siendo su impacto en la zona costera y cuales podrían ser las magnitudes en el futuro. Asimismo, hubo consenso en que los contrastes que se observan en la magnitud de los parámetros ambientales que están impactando las costas, muestran sistemáticamente una “variabilidad a la alza de los parámetros” y esto está reflejado con fuerza en la literatura publicada en los últimos años en revistas de indiscutible rigor científico (p. ej. *Science, Nature, BioScience*). Patrones atípicos de lluvias y sequías, inundaciones severas, emisión de gases de efecto invernadero, ascenso de la temperatura y del nivel del mar, frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos como tormentas, huracanes, o ciclones, que ya están generando declinación de la agricultura en tierras bajas, incertidumbre pesquera, vaivenes del turismo costero,

afectación al bienestar y la seguridad en las ciudades, preocupación de las industrias, erosión de playas, fueron parte de los tópicos presentados y discutidos por los panelistas.

Fue un consenso alcanzado en ambos eventos que el cambio climático está actualmente en desarrollo en su fase de ascenso, trayectoria que difícilmente cambiará en las próximas décadas y que, por tanto, el paso inmediato es la formulación de medidas de mitigación y adaptación que deben partir de, la *planificación ambiental estratégica* para fortalecer el *diseño de políticas públicas* que conduzcan de una vez por todas la *gestión integrada de la zona costera* en un amplio intervalo latitudinal, particularmente en lo relativo a la orientación de la expansión urbana, actividades turísticas, agropecuarias, pesqueras, e industriales, en la zona costera.

Ningún ecosistema sobre el planeta acusa todos los impactos del cambio climático como la zona costera y por lo tanto la preparación de la sociedad ante los desafíos que enfrentará ahí es urgente. Este libro es una síntesis ejecutiva lograda por los panelistas invitados, hacia la gestión integrada de las costas frente a la perspectiva cierta, pero también la incertidumbre que inducirá el cambio climático para procurar la sustentabilidad ambiental del desarrollo social y económico de estos ecosistemas.

Desde noviembre de 2008 y hasta julio de 2009, todos los capítulos que integran este libro, fueron cuidadosamente revisados a través de información cruzada entre los autores, con el propósito de asegurar un consenso que refleje las Conclusiones de los dos últimos capítulos -producto directo de los Paneles de 2007 y de 2008-.

Con especial satisfacción, el INECOL presenta este libro que induce y estimula a continuar explorando las costas para atestiguar los impactos del cambio climático, considerado uno de los grandes temas del Siglo XXI.

Dr. Miguel Equihua Zamora

Investigador Titular y Profesor, Red Ambiente y Sustentabilidad (INECOL)

Xalapa, Ver., México, Diciembre de 2009

## PRÓLOGO

Los océanos y la zona costera con frecuencia son olvidados en términos de su conservación y manejo. En particular la zona costera que, a pesar de que se trata de una franja relativamente angosta, tiene una gran importancia debido a que en ella se presentan interacciones entre el mar, la tierra, los ríos y la atmósfera, que la caracterizan como una zona altamente dinámica y compleja, en la que se presentan una gran diversidad de ecosistemas, cada uno con una gran cantidad de servicios ambientales.

Las zonas costeras han sido clasificadas como vulnerables a los impactos del cambio climático debido a sus características físicas, biológicas y socioeconómicas. El aumento del nivel del mar, la exposición a eventos hidrometeorológicos, la erosión costera, las variaciones en la circulación litoral por la construcción de infraestructura costera son algunos de los factores que alteran las costas y contribuyen a su vulnerabilidad. Los estudios sobre los impactos del cambio climático en éste ámbito han cobrado gran relevancia en una gama amplia de sectores, debido a que las zonas costeras más vulnerables albergan cerca del 10% de la población mundial. Asimismo, son zonas que, junto con los mares, albergan algunos de los ecosistemas más diversos y productivos del mundo, incluyendo a los manglares y a los arrecifes de coral.

Entre los aspectos que han recibido mayor atención entre la comunidad científica y, por ello, han sido estudiados con mayor profundidad, se encuentra el estudio de los impactos en la infraestructura costera, en las actividades productivas (p.ej. la industria, la pesca, el turismo y las actividades mercantiles) y en los ecosistemas.

Por otra parte, se ha estudiado el impacto de los contaminantes que son producto de las actividades humanas desarrolladas en las zonas costeras. Los procesos de transporte de diversos materiales que, por vía eólica, pluvial y/o fluvial tienen como destino final el océano son de gran importancia, en virtud de que las descargas de residuos provenientes de los centros urbanos, de las actividades industriales y agroindustriales, además de los originados por la industria extractiva (minera y petrolera), constituyen una problemática que trasciende las fronteras nacionales y que ha demostrado tener un impacto considerable en los ecosistemas costeros y marinos.

El estudio de los impactos del cambio climático en los ecosistemas costeros, es un tema que se ha posicionado de manera acelerada entre las prioridades gubernamentales. Lo anterior se ha reflejado en el desarrollo de proyectos de investigación de gran envergadura enfocados al diseño e implementación de estrategias de adaptación ante el cambio climático. En el caso de México, destaca el *Proyecto Piloto de Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en los Humedales Costeros del Golfo de México*, que es un esfuerzo conjunto del Banco Mundial, diversas Instituciones

de Investigación nacionales y el Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, cuyos primeros avances se encuentran plasmados en dos volúmenes de reciente publicación.<sup>1</sup>

En este contexto, la presente obra es un esfuerzo interinstitucional de Sea Grant Texas, el Instituto de Ecología, A.C., el Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT y de reconocidos expertos por sintetizar y presentar, de manera estructurada, los aspectos más relevantes y la propia experiencia de los investigadores sobre los impactos del cambio climático en la zona costera.

Ante esta situación, el Instituto Nacional de Ecología, de acuerdo con su misión de generar, integrar y difundir conocimiento e información a través de investigación científica aplicada, para apoyar la formulación de política ambiental y la toma de decisiones que promuevan el desarrollo sustentable, se complace en presentar este volumen, cuya publicación contribuye de manera significativa a la comprensión y dimensionamiento de los impactos del cambio climático.

Los impactos del cambio climático en los ecosistemas costeros es de gran relevancia para México, ya que de las 32 entidades federativas que conforman la República Mexicana, 17 tienen apertura al mar y representan el 56% del territorio nacional. Cuenta con más de 11,122 km de litorales de los cuales 7,828 km corresponde al litoral del Pacífico y Mar de Cortés y 3,294 km al del Golfo de México y Mar Caribe.

En la presente obra, expertos de reconocida trayectoria abordan en 10 capítulos, ricos en información y con rigor científico y metodológico, diversas aristas de este problema complejo, tanto desde la perspectiva ecosistémica, como desde la perspectiva socioeconómica. Se presentan aspectos que incluyen el estudio de los impactos (ecológicos, económicos y sociales), la vulnerabilidad, la capacidad adaptativa, la urbanización y la gestión de riesgos en las zonas costeras de México y de otras regiones del mundo. Asimismo, se hace un especial énfasis en la relevancia de los instrumentos de gestión y de política pública, para hacer frente de manera eficiente a los impactos del cambio climático en el corto, mediano y largo plazos.

La publicación del presente volumen se inserta de manera integral en los esfuerzos que a través del INE realiza la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, para fomentar la investigación como una base sólida en la conducción de la política nacional en materia de medio ambiente y cambio climático.

El libro se presenta en un momento relevante para México en el ámbito internacional, en virtud de que la dieciseisava conferencia de las partes (COP16) de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se realizará en nuestro País a finales de este año.

En este contexto, esperamos que la presente publicación sea una herramienta útil para los diversos sectores y, en particular, para el desarrollo de esfuerzos enfocados al desarrollo e implementación de políticas y estrategias de mitigación y adaptación ante el cambio climático en las zonas costeras de nuestro País. Asimismo, esperamos que el material que se presenta sea tanto una fuente de información como una invitación a la reflexión crítica para académicos, integrantes de organizaciones no gubernamentales, público en general, servidores públicos y, de manera más amplia como una herramienta útil en el proceso de toma de decisiones en los diferentes niveles.

---

<sup>1</sup> Buenfil-Friedman J. (editor)(2009)Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México. Volumen I y II. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Instituto Nacional de Ecología.

Biól. Alejandro Frías  
Jefe del Departamento de Ecología de Ecosistemas  
Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente  
y Recursos Naturales (INE-SEMARNAT), México D.F.  
[afrias@ine.gob.mx](mailto:afrias@ine.gob.mx)

Biól. Julia Martínez  
Coordinadora del Programa de Cambio Climático  
Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente  
y Recursos Naturales (INE-SEMARNAT), México D.F.  
[jmartine@ine.gob.mx](mailto:jmartine@ine.gob.mx)

Dra. Margarita Caso  
Directora de Conservación de los Ecosistemas  
Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico  
y Conservación de los Ecosistemas, Instituto Nacional de Ecología,  
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (INE-SEMARNAT), México D.F.  
[casom@ine.gob.mx](mailto:casom@ine.gob.mx)

*In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010*

## **PARTICIPANTES**

### **Dr. Arturo Carranza-Edwards**

Investigador Titular y Profesor  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,  
Universidad Nacional Autónoma de México,  
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria UNAM,  
Delegación Coyoacán, 04510 México DF  
[carranza@cmarl.unam.mx](mailto:carranza@cmarl.unam.mx), [dr.arturo.carranza@gmail.com](mailto:dr.arturo.carranza@gmail.com)

### **Dr. John W. Day**

Distinguished and Emeritus Professor  
Department of Oceanography and Coastal Science,  
School of the Coasts and Environment, Louisiana State University,  
Baton Rouge, 70803 Louisiana, USA  
[johnday@lsu.edu](mailto:johnday@lsu.edu)

### **Dr. Richard H. Day**

Senior Research Scientist  
United States Geological Survey USGS,  
700 Cajundome Boulevard, Lafayette, 70506 Louisiana, USA  
[dayr@usgs.gov](mailto:dayr@usgs.gov)

### **Dr. Miguel Equihua Zamora**

Investigador Titular y Profesor, Red Ambiente y Sustentabilidad (INECOL)  
Carretera antigua Xalapa-Coatepec No. 351,  
El Haya, 91070 Xalapa  
Xalapa, Ver., México  
[miguel.equihua@inecol.edu.mx](mailto:miguel.equihua@inecol.edu.mx)

### **Dr. Carles Ibáñez Martí**

Senior Scientist and Professor  
IRTA, Coordinador Programa d'Ecosistemes Aquàtics  
Carretera Poble Nou Km 5.5, Apartat de Correus 200  
43540 Sant Carles de la Ràpita  
Catalunya, Spanya  
[carles.ibanez@irta.cat](mailto:carles.ibanez@irta.cat)

### **Dr. John S. Jacob**

Director General Texas Sea Grant Program  
Senior Scientist and Professor,  
Texas A & M University System,  
Houston, Texas, USA  
[jjacob@tamu.edu](mailto:jjacob@tamu.edu)

**Dra. Amparo Martínez Arroyo**

Directora General del Centro de Ciencias de la Atmósfera,  
Universidad Nacional Autónoma de México,  
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria UNAM,  
Delegación Coyoacán, 04510 México DF  
[marroyoampa@gmail.com](mailto:marroyoampa@gmail.com)

**Dr. Saúl Miranda Alonso**

Centro Estatal de Estudios del Clima,  
Sub Coordinación en Investigación sobre Cambio Climático,  
Secretaría de Protección Civil, Gobierno del Estado de Veracruz,  
Calle 1ro de Septiembre No 1, Colonia Isleta, 91090 Xalapa,  
Xalapa, Ver., México  
[saul.malo@gmail.com](mailto:saul.malo@gmail.com)

**Dr. Adalberto Tejeda-Martínez**

Investigador Titular y Profesor  
Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas,  
Universidad Veracruzana,  
Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91090 Xalapa  
Xalapa, Ver., México  
[atejeda@uv.mx](mailto:atejeda@uv.mx)

**Dr. Robert R. Twilley**

Director Wetlands Biogeochemistry Institute,  
Senior Scientist and Professor,  
Department of Oceanography and Coastal Science,  
School of the Coast and Environment, Louisiana State University,  
Baton Rouge, 70803 Louisiana, USA  
[rtwilley@lsu.edu](mailto:rtwilley@lsu.edu)

**Dr. Carlos M. Welsh-Rodríguez**

Investigador Titular y Profesor  
Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana.  
Calle Francisco J. Moreno No. 207  
Colonia Emiliano Zapata, 91090 Xalapa,  
Xalapa, Ver., México  
[cwelsh@uv.mx](mailto:cwelsh@uv.mx)

**Dr. Alejandro Yáñez-Arancibia**

Coordinador, Panel Internacional Impactos del Cambio  
Climático sobre la Zona Costera (INECOL 2007-2009)  
Investigador Titular y Profesor  
Instituto de Ecología A. C. (CPI-CONACYT)  
Carretera antigua Xalapa-Coatepec No. 351,  
El Haya, 91070 Xalapa, Ver., México  
[alejandro.yanez@inecol.edu.mx](mailto:alejandro.yanez@inecol.edu.mx), [yanez.arancibia@gmail.com](mailto:yanez.arancibia@gmail.com)

In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010

# **LA ZONA COSTERA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO - VULNERABILIDAD DE UN SISTEMA BIOCOMPLEJO E IMPLICACIONES EN MANEJO COSTERO**

**ALEJANDRO YAÑEZ-ARANCIBIA**

Instituto de Ecología A. C. (CPI-CONACYT), Unidad de Ecosistemas Costeros,  
Km 2.5 Carretera antigua Coatepec No. 351, El Haya, Xalapa 91070, Veracruz, México.  
*alejandro.yanez@inecol.edu.mx*

**JOHN W. DAY**

Department of Oceanography and Coastal Sciences, School of Oceanography and  
Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, 70803 Louisiana, USA,  
*johnday@lsu.edu*

## **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 desintegración ecológica y obteniendo 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.

## 1. INTRODUCCION

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; típico 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 deltáicas. 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., 2009).

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.

## 2. ENFOQUE ECOSISTEMICO PARA COMPRENDER LA VULNERABILIDAD DE LA ZONA COSTERA Y EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMATICO

La planicie costera es característica 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 deltáicas, estuarios, lagunas, 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 and 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 sub región costera se caracteriza por: a) Importantes humedales, b) Alta diversidad de especies biológicas y de hábitats críticos, c) Recarga 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, 2009a). Las [Figuras 2 y 3](#) muestran 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 microbiológica, 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.

Desde un punto de vista estructural y funcional, las [Figuras 1, 2 y 3](#) 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, 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 litorales generalmente producen perfiles sedimentarios normales en la costa incluyendo bancos arenosos alargados, amplias bocas estuarinas, vigorosos canales distributarios deltáicos, y amplias llanuras de inundación intermareales. De esta forma, es posible distinguir entre costas dominadas por oleaje (p. ej., deltas dominados por oleaje, estuarios dominados por oleaje, entrantes de mar hacia la planicie costera, y lagunas costeras), y costas dominadas por mareas (p. ej., deltas dominados por mareas, estuarios dominados por mareas, y deltas mareales progradantes), ver [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 pluma estuarina es el área donde las condiciones estuarinas se extienden sobre el mar en la plataforma continental (Figuras 2 y 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 deltáicos, 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 (Figuras 2 y 3) (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 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 gran 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 and 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 (1996)?: a) Provee un marco de trabajo para la planificación y la toma de decisiones, b) La sociedad se sitúa en el centro del manejo de la biodiversidad, c) Se enfatiza en los beneficios funcionales que ofrece el ecosistema, d) Se enfatiza en el manejo de la biodiversidad más allá de los límites de las áreas naturales protegidas, e) Las áreas protegidas son reconocidas de vital importancia para la conservación, f) El enfoque es flexible con respecto a escalas espaciales y temporales, g) La sociedad juega un papel importante en el manejo del suelo, del agua y los recursos extraíbles, h) El manejo debe considerar los efectos reales y potenciales de las actividades de desarrollo en ecosistemas vecinos, i) Reconoce las ventajas económicas de un manejo racional y articulado, j) 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 basado en experiencias, 5) Ser actualizado al aplicar ciencia y tecnología para restaurar/rehabilitar humedales costeros, y 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 and 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 factores 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 Villa Hermosa en Tabasco.

### 3. 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, 1989; Yáñez-Arancibia et al., 2007a): 1) Son altamente productivos, 2) Son ecológicamente complejos, 3) Son ecológicamente estables coexistiendo en un medio físicamente variable, 4) 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. 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 ambientes costeros y serán incomprensidos los efectos del impacto por el cambio climático.

### **3.1 Lagunas Costeras, Estuarios y Humedales, son Intensamente Utilizados por los Humanos**

Revisando los problemas prácticos del manejo de lagunas costeras y estuarios, se aprecia que el tópico más frecuente de preocupación es el asolve sedimentario por deforestación de las cuencas y 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 fitoplantónica bloquean la penetración de la luz y provoca la muerte de la vegetación macro fíta 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).

### **3.2 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 del trópico, asociado 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 macro ffitas, 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). En el escenario de 50 centímetros de elevación del mar para fines del siglo-21, se estima que las islas del Caribe estarán bajo severa presión ambiental, y más de 2000 millas cuadradas de humedales en México y 4000 millas cuadradas 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 reciente ofrecen información verdaderamente preocupante. Con esto, muchos desarrollos urbanos costeros en el Golfo

de México estarán en el franco umbral del drama ambiental (p.ej., Tampa, Pensacola, Mobile, Gulf Port, Nueva Orleans, Galveston-Houston, Corpus Christi, Tuxpan-Panuco, Veracruz-Boca del Río, Alvarado, Tlacotalpan, Villa Hermosa, 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., 2008, 2009; Yáñez-Arancibia et al., 2007b).

### 3.3 Enfoque-Ecosistémico Hacia el Manejo Costero

Con el 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 sectorial 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 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 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 desarrollo social y económico integrado con la dinámica natural, d) Incorporar técnicas y métodos de ingeniería ecológica para restaurar/rehabilitar hábitats 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 monitoreo ecológico permanente.

---

**Tabla 1. Vulnerabilidad Natural e Inducida por el Cambio Climático en Lagunas Costeras y Estuarios Tropicales**

---

1. Los mecanismos que propician una eficiente trampa de nutrientes, también contribuyen con éxito como trampa de contaminantes. Estos mecanismos son alterados por impacto antropico o eventos climático-meteorológicos; la turbulencia provocada reincorpora contaminantes a la columna de agua.
2. La destrucción de macro fitas 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.**

Evento o Condición	Impacto y Costos	
	Directos	Ocultos
Viento, Oleaje e Inundación	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.
	Pérdida de árboles en parques y residencias	Incremento en la demanda de electricidad por calefacción o enfriamiento. Efectos psicológicos.
	Diseminación invasiva de plantas y animales exóticos. Sustitución por abundancia de especies oportunistas	Pérdida de vegetación nativa. Alteración de hábitats. Incremento de la vulnerabilidad a invasión de plagas.

		CONTINÚA .....
<b>Daño o Destrucción del Paisaje</b>	<p>Pérdida de hábitats</p> <p>Erosión de suelos y bancos ribereño-deltáicos y pérdida de tierras</p> <p>Erosión de playas, dunas y humedales</p>	<p>Pérdida de biodiversidad. Incremento en número de plantas y animales amenazados o en peligro. Riesgo de ANP</p> <p>Degradación de la calidad de agua. Asolve de distributarios. Pérdida de cobertura vegetal. Incremento de temperatura del agua. Incremento de turbidez. Abatimiento del oxígeno disuelto. Contaminación de fuentes no-puntales (pesticidas, herbicidas, fertilizantes, sistema séptico, otros).</p> <p>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.</p>

<b>Disturbio de Ecosistemas Naturales</b>	Pérdida de bosques viejos únicos, dunas, pantanos, erosión de desembocadura de ríos y otros ecosistemas costeros	Alteraciones permanentes o pérdida de hábitats. Incremento de especies en peligro. Extinción o exclusión de especies. Pérdida de resiliencia y mayor vulnerabilidad. Sobre estimación de la capacidad de asimilación del ecosistema.
	Pérdida de sedimentos de la cuenca baja, distributarios y estuario. Asolve en lagunas costeras	Incremento en turbidez. Acumulación de contaminantes. Disminución del oxígeno disuelto. Pérdidas de vegetación acuática y fauna. Limitada capacidad de circulación de canales. Pérdida de canales de navegación. Incremento en costos de dragado. Incremento a riesgos de inundación. Declinación de pesquerías.
	Intrusión salina en aguas superficiales o freáticas	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.
	Incremento de agua dulce dentro del estuario	Declinación de especies marinas. Incremento de especies de agua dulce. Incremento de materia orgánica y decremento de oxígeno. Declinación de la pesquería. Simplificación del ecosistema por pérdida de biodiversidad.
	Fragmentación de islas de barrera	Pérdida de hábitats y de propiedad privadas. Pérdida de ANP. Daño o pérdida de infraestructura diversa.
	Contaminación de hábitats en el largo-plazo por liberación de contaminantes e inundación salobre	Pérdida de hábitats. Incertidumbre en recuperación de la vida silvestre. Incremento del número de especies amenazadas o en peligro.
	Incremento de la vulnerabilidad de ecosistemas costeros a eventos subsecuentes. Pérdida de resiliencia. Sobre estimación de la capacidad de asimilación	Pérdida de hábitats o alteración permanente. Incremento de especies en peligro. Extinción o exclusión de especies animales y vegetales

<p style="text-align: center;"><b>Viento, Oleaje, Ascenso del Nivel del Mar, Lluvias, Inundaciones. Daño Ambiental en Aumento por Persistencia Severa</b></p>	<p>Descarga de fuente-puntual de contaminación en el aire, agua y canal de navegación (químicos, basura, aguas negras, tóxicos)</p> <p>Descarga de fuente no-puntual de contaminación en el agua, canal de navegación y sedimentos (pesticidas, herbicidas, fertilizantes, descarga urbana, falla del sistema séptico)</p> <p>Liberación de basura, acumulación de desechos sólidos en el medio ambiente, por el evento o por esfuerzos de limpieza</p> <p>Pérdida del acceso a la playa (daño de senderos, terrazas, muelles). Esfuerzos de reconstrucción</p> <p>Esfuerzos de reconstrucción</p> <p>Daño de largo-plazo a maquinaria, vehículos e infraestructura, debido a inundaciones, intrusión de sedimentos, derrumbes, o daños mecánicos similares</p>	<p>Pérdida de recursos acuáticos. Declinación de pesquería comercial y recreativa. Impacto a la salud y seguridad humana.</p> <p>Pérdida de recursos acuáticos. Declinación de pesquería comercial y recreativa. Impacto a la salud y seguridad humana.</p> <p>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.</p> <p>Declinación de las actividades recreativas (pesca, canotaje, veleo). Pérdida de turismo e impacto económico.</p> <p>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.</p> <p>Decremento sostenido del presupuesto fiscal y recursos para prevención, mitigación, restauración, o subsidios. Encarecimiento de la energía, alimentos e insumos. Prevalece política coyuntural de alto costo</p>
---	---	--

**Tabla 3. Técnicas de Mitigación para Proteger Recursos Naturales en la Zona Costera ante el Impacto del Cambio Climático**

---

**PLAYAS:**

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).
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).
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).
4. Prohibición de la remoción de pastos marinos de la zona intermareal (como remoción –por estética- de la vegetación sumergida adyacente a la playa).
5. Restaurar las playas post- evento en áreas que proveen habitats críticos para tortugas marinas y aves costeras.
6. Análisis de sensibilidad de hábitat críticos para establecer prioridades pre- y post- tormenta para protección y restauración de habitats en alto riesgo.
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.
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.

**HUMEDALES:**

1. Ordenanza que protege los humedales costeros y zonas de amortiguamiento frente a los desarrollos.
2. Análisis de sensibilidad de vulnerabilidad de los humedales, para establecer prioridades de restauración post- evento, y restringir actividades que pueden degradar o destruir humedales importantes.
3. Revegetar (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).
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.

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).
6. Establecimiento de una línea base comprensiva para entender, ecológicamente, que los humedales son “usuarios naturales” de agua y sedimentos.

#### **BOSQUES:**

1. Manejo forestal costero (como espaciamiento, densidad y biomasa) para reducir el daño que provocan los vientos y la erosión litoral.
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.
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.
4. Desarrollo de planes y regulaciones pre- tormenta para operar quemas controladas y remover fragmentos de árboles.
5. Desarrollo de nidos artificiales y cavidades para compensar la carencia por pérdida de los árboles durante y después de la tormenta.
6. Establecimiento de una línea base comprensiva para explorar la opción, ecológica, de introducción de árboles en áreas normalmente no forestadas.

#### **PESQUERIAS:**

##### *Moluscos, Jaibas y Cangrejos*

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.
2. Propiciar el desarrollo de planes de negocio para acomodar la clausura temporal de las pesquerías de moluscos, jaibas y cangrejos.
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.

##### *Camarones*

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.
2. Recuperar/reconstruir estructuras y otras facilidades tierra adentro para reducir futuras pérdidas en el almacenaje del recurso post- evento.
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).

4. Desarrollo de planes de compensación post- desastre (fondo de emergencia) para recuperar la infraestructura pesquera (embarcaciones, maquinaria, artes de pesca).

*Peces*

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.

**PESCA DEPORTIVA (Turismo asociado):**

1. Desarrollo de estrategia alternativa para reemplazar el aspecto recreativo, importante en la economía local.
2. Desarrollo de planes de construcción y recuperación de embarcaciones y otras facilidades, mejor adaptadas a los efectos de tormentas.

**CALIDAD DE AGUA:**

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.
  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.
  3. Desarrollo de estándares normativos y medidas de emergencia para prevenir la liberación de contaminantes tóxicos durante las tormentas.
  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 hábitat críticos para la flora y la fauna, y son mucho más baratas que las plantas convencionales de tratamiento de aguas).
-

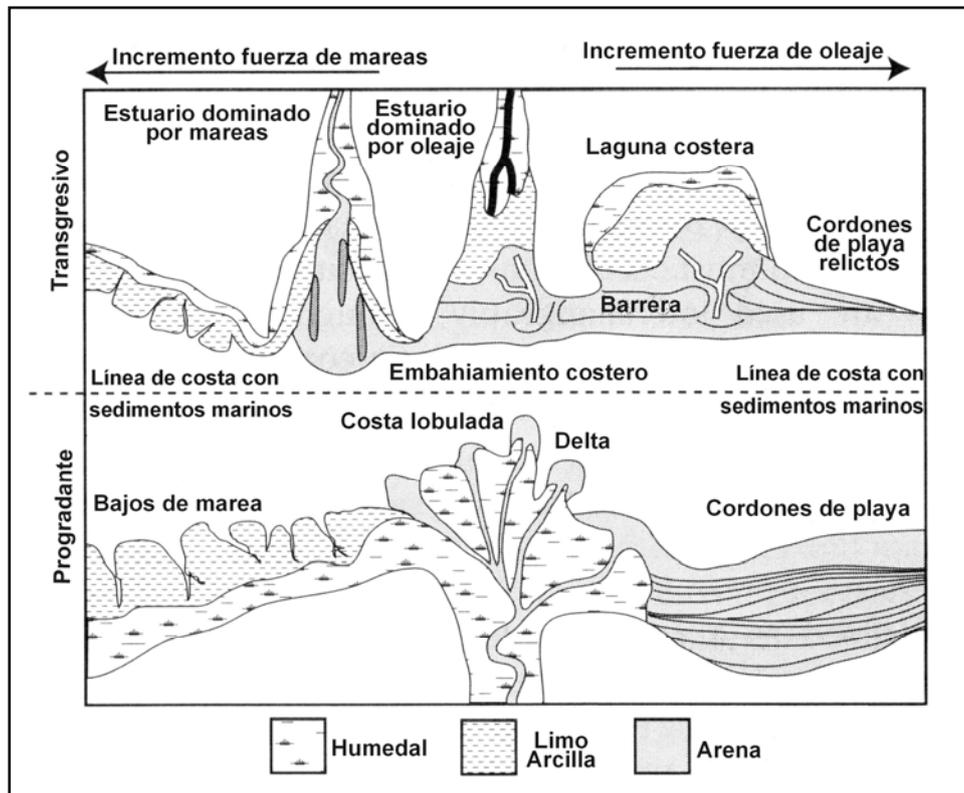


Figura 1. Ambientes de depósito costero. La fuerza ambiental del oleaje erosiona los cordones de playa. La fuerza ambiental de las mareas erosiona la planicie de inundación deltaica y sus bajos. Una costa de delta lobulado es la imagen contraria del embahamiento de un estuario dominado por oleaje. Modificado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

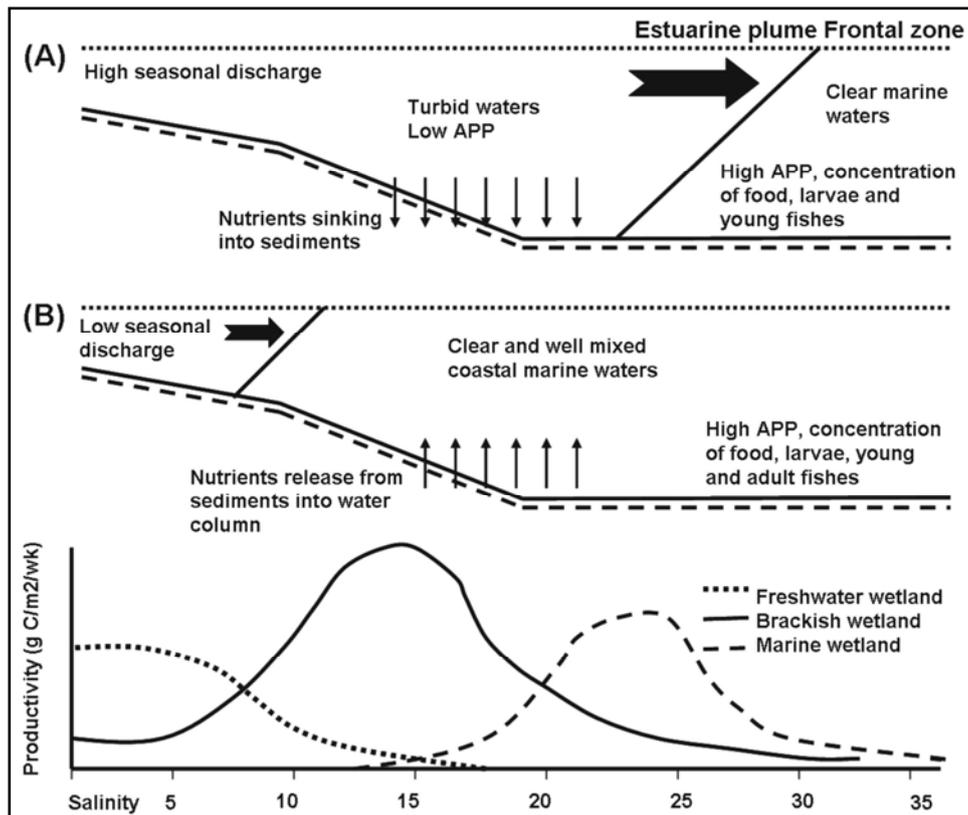


Figura 2. Enfoque-ecosistémico del funcionamiento de humedales costeros. (A), Modelo conceptual de la descarga del sistema fluvio deltáico y respuestas del ecosistema estuarino. Larvas, juveniles y adultos de peces y macro invertebrados, utilizan el sistema de aguas abiertas y el gradiente de la zona 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. (2007a).

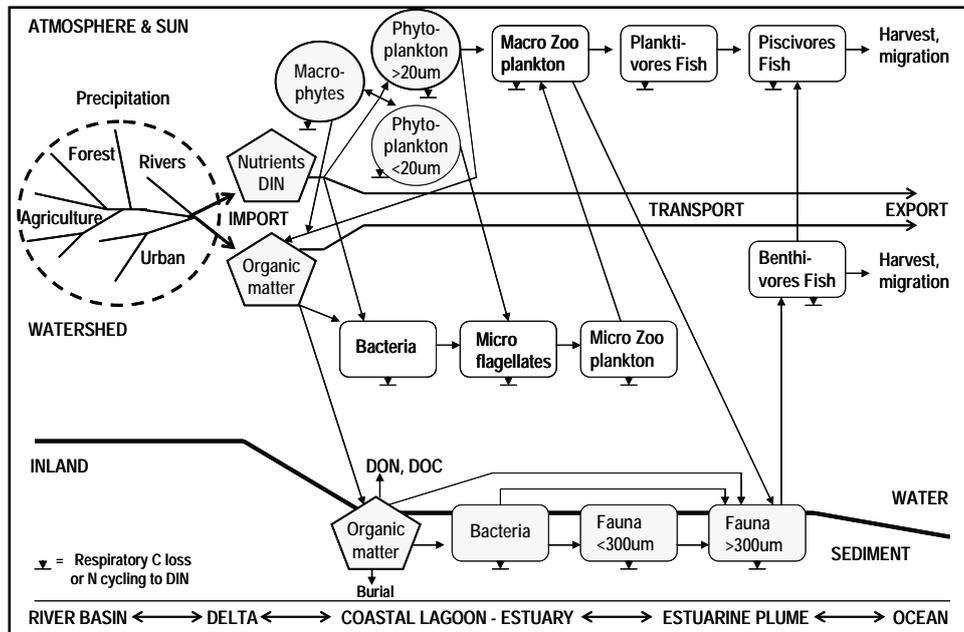


Figura 3. Modelo conceptual del flujo de nutrientes en un ecosistema estuarino, enfatizando el aporte de Nitrógeno orgánico e inorgánico desde la llanura costera, y los cuatro principales patrones tróficos pelágicos y bentónicos que permiten el éxito de la producción de carnívoros superiores (recursos 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. Fuente: Yáñez-Arancibia y Day (2009b).

### Agradecimientos

Al Instituto de Ecología A. C. las facilidades otorgadas para la realización del Panel Internacional sobre Cambio Climático: Impactos sobre la Zona Costera, INECOL 2007 e INECOL 2008, eventos efectuados en el Auditorio UNIRA, Xalapa, Ver., México.

#### 4. REFERENCIAS

- 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 CSMP. Island Pres, Inc., Washington DC, 517 pp.
- 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, Internl. Symposium Series, 485 pp.
- 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 OAE Washington DC*, 22 (1-2): 11-25.
- Day, J. W. y A. Yáñez-Arancibia (Eds.), 2009. *The Gulf of Mexico: Ecosystem-based Management*. 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 pp.

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.

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 pp.

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 Science to Management*. ECSA/ERF Symposium, Institute of Marine Studies, University of Plymouth. Olsen & Olsen, International Symposium Series, 485 pp.

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 pp.

Dugan, P. (Ed.), 2005. *Guide to Wetlands*. A Firefly Book, Ltd., Ontario, Canada, 304 pp.

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 pp.

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. Lefeuvre (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 pp.

Mann, K. H., 2000. *Ecology of Coastal Waters with Implications for Management*. Blackwell Science Inc., Malden Massachusetts, 406 pp.

McKee, K., 2008. Sea level rise 1991-2009. United States Geological Survey.  
<http://www.sealevel.colorado.edu/results.phb>

Mitsch, W. J. y J. G. Gosselink, 2000. *Wetlands*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 920 pp.

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 pp.

Pfeffer, 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. Arrequín (Eds.), *Análisis y Diagnostico de los Recursos Pesqueros Críticos del Golfo de México*. Universidad A. de Campeche, EPOMEX Serie Científica 7, 496 pp.

Sánchez-Gil, P., A. Yáñez-Arancibia, M. Tapia García, J. W. Day, C. A. Wilson and J. H. Cowan, 2008. Ecological and biological strategies of *Etropus crossotus* 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 pp.

Schwartz, M. (Ed.), 2005. *The Encyclopedia of Coastal Sciences*, Springer, Dordrecht, The Netherlands. 1211 pp.

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. Sheppard (Ed.), *The Seas at The Millennium: An Environmental Evaluation*. Elsevier Science Ltd. 3 vols, 2400 pp.

Yáñez-Arancibia, A., 2005. Middle America, coastal ecology and geomorphology, p. 639-645. *In*: Schwartz, M (Ed.), *The Encyclopedia of Coastal Sciences*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 1211 pp.

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 y 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 pp.

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/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. 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. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A & M University Press, College Station, TX, 110 pp.

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 y R. Mahon (Eds.) Marine Ecosystem Based Management in the Caribbean. The University of Dalhousie, Nova Scotia Canada, y University of West Indies, Barbados. (in press).

Yáñez-Arancibia, A, J. W. Day, and 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 pp.

In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010

## **CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LA EROSIÓN DE PLAYAS (\*)**

**ARTURO CARRANZA-EDWARDS**

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.  
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 México D.F.  
*carranza@cmarl.unam.mx*

(\*) Versión re-editada de la publicación original en *Publica tu Obra UNAM*. Con autorización.  
<http://www.tuobra.unam.mx/mostrarObra.htm?id=1890>

### **RESUMEN**

Las causas de la erosión de las playas pueden ser naturales o inducidas por las actividades humanas. La velocidad de erosión en las playas puede variar considerablemente en el espacio y en el tiempo. Así, los huracanes pueden tener una respuesta inmediata en la erosión de las playas, mientras que los deshielos de las zonas polares y los hundimientos del terreno por causas tectónicas, pueden tardar más en reducir la anchura de las franjas playeras. Las actividades relacionadas con el desarrollo industrial pueden ser altamente importantes para la vulnerabilidad de las playas, como sucede con la extracción de líquidos del subsuelo, que es generadora de subsidencia y por lo mismo sería también responsable del retroceso de la línea de costa. Aun cuando el calentamiento global es un hecho, no es la única causa de la erosión de las playas, por lo cual aquí se analizan diversos procesos generadores de erosión de los litorales arenosos. Las consecuencias de la erosión de playas pueden ir desde pérdidas de vidas humanas hasta impactos económicos, sociales y políticos. Es prioritario establecer programas de monitoreo en los diecisiete estados ribereños de México con la finalidad de minimizar daños ligados con el crecimiento demográfico exponencial, que es la primera causa del deterioro ambiental para la zona costera.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Hablar de playas es situarse geográficamente en la zona costera, es observar la línea de costa, es comprender la dinámica del perfil del litoral, es percibir la erosión evidente que induce el cambio climático, es lamentar la pérdida de infraestructura, es palpar el deterioro del medio ambiente, e intuir el peligro evidente para la población humana asentada en zonas de alto riesgo (Cambers, 1998; Anthony, 2005; Finkl y Walker, 2005).

Las playas son acumulaciones de materiales no consolidados en zonas litorales y están sujetas a la acción del oleaje, las corrientes, los vientos y las mareas.

En condiciones de concentraciones de detritos de alta densidad y resistencia, las arenas de playas pueden ser ricas en minerales (Cabrera-Ramírez y Carranza-Edwards, 2002); no obstante, pensar en la extracción de minerales de importancia económica de las playas incrementaría el daño que ya sufren debido a la construcción de represas. Las playas no deben explotarse desde un punto de vista minero, pues el desarrollo sustentable se vería amenazado.

Las playas pueden ser erosionadas como parte de aquel proceso según el cual se pierde material terrestre pudiendo ser removido hacia otras partes de las franjas litorales. Ejemplos extremos los constituyen tsunamis producidos por meteoritos, cometas o terremotos, siendo de enorme magnitud pero de escasa frecuencia.

En condiciones menos extremas la velocidad de erosión de una playa también puede variar considerablemente con el tiempo. En particular, el límite inferior de la playa, conocido como infra playa (Figura 1) es el más variable hacia su frontera con la plataforma continental.

Las variaciones en la franja de infra playa dependen fundamentalmente del nivel base de la ola que actúa sobre el material no consolidado del fondo.

Cuando se presentan oleajes de tormenta el nivel base de la ola se profundiza e incluso material muy fino puede entrar en movimiento hacia las partes más elevadas de la playa. Esto es de gran importancia pues en los sedimentos finos es común encontrar contaminantes dado que la energía del oleaje es menor.

La erosión de las playas se inicia principalmente a partir de la infraplaya, afectada por el oleaje y las corrientes. Como resultado de la misma erosión en algún otro sitio, cercano o lejano, tendrá lugar la depositación de sedimentos. Esto es, cuando en un sitio hay erosión en otro hay depositación y *viceversa*.

Este equilibrio dinámico es muy importante para el caso de las playas. La erosión de las playas puede ser de origen natural o antrópico. El objetivo de este trabajo es analizar las principales causas naturales y antrópicas que afectan a las playas.

## **2. CAUSAS NATURALES DE LA EROSIÓN DE PLAYAS**

### **2.1 Erosión de Promontorios**

Cuando un litoral arenoso se ve interrumpido por un litoral rocoso (Figura 2), este último concentrará la energía del tren de olas hacia sí mismo con un consecuente incremento en la energía del oleaje que producirá a lo largo del tiempo la erosión de dichos promontorios.

Las partículas derivadas de esta erosión tenderán a depositarse en los alrededores de dichos promontorios, donde la energía de oleaje es menor. Este proceso a lo largo de

decenas o centenas de años tenderá a formar líneas de costa rectas en las cuales se desarrollen playas arenosas, implicando que se trata de márgenes litorales pasivas como es frecuente observar en el litoral del Golfo de México.

## 2.2 Huracanes y Ciclones

Las tormentas asociadas con huracanes (Golfo de México y Mar Caribe) y ciclones (Océano Pacífico y Golfo de California) son fenómenos naturales de una respuesta a corto plazo. Es frecuente pensar que un huracán producirá solamente erosión, pero se ha visto que durante el huracán Gilberto y el huracán Wilma tuvieron lugar una fuerte erosión costera en las playas de Cancún y depositación respectivamente en Akumal y Puerto Morelos.

Carranza Edwards et al. (2004) observaron que entre 1981 y 2000 las trayectorias de huracanes del Golfo de México y Mar Caribe han incrementado sus intensidades y sus trayectorias han sido más meridionales si se les compara con el periodo de 1960 a 1980. Aún cuando estos son fenómenos naturales, tal vez el cambio climático global ha tenido que ver con las diferencias en magnitud y distribución de los huracanes, lo cual ha sido analizado con esa perspectiva para el Golfo de México (Yáñez-Arancibia y Day, 2005).

## 2.3 Inundaciones

Durante grandes periodos de lluvias los escurrimientos que llegan al mar estarán constituidos principalmente por materiales finos (arcillas y limos) que no pueden ser retenidos en las franjas litorales dado que la energía del oleaje impide su depósito. Estos productos finos son resultado de la erosión de las zonas costeras elevadas y su consecuente depositación tendrá lugar más allá de la acción del oleaje en profundidades donde el nivel base de la ola no remueve el material. Es decir, aun cuando hay materiales que llegan al mar estos se encuentran en suspensión como sucede con los aportes de sedimentos finos del sistema fluvio-lagunar Papaloapan-Alvarado produciéndose incluso mortandad de peces (Figuras 3 y 4).

En noviembre de 2007 se formó de manera natural un tapón en el Río Grijalva, el cual represó de forma natural las aguas y los sedimentos de dicho río, el cual de no haber sido corregido de manera adecuada por los ingenieros de la Comisión Federal de Electricidad habría tenido como consecuencia la falta de aporte de sedimentos hacia el litoral. Por otro lado, una apertura violenta de este tapón hubiese tenido consecuencias desastrosas para la región del Arroyo Seco que pasa por Cárdenas, Comalcalco, Paraíso y Dos Bocas (Figura 5).

## 2.4 Actividad Tectónica en Márgenes Litorales Activos

En las zonas de subducción del pacifico mexicano se pueden dar levantamientos y hundimientos tectónicos. En el primer caso la tierra gana al mar, pero en el segundo el

mar avanzaría hacia tierra en forma transgresiva. Durante el terremoto de 1957 el nivel medio de mar registrado en el mareógrafo de Acapulco descendió 25 cm, lo cual implica que el terreno donde se ubicaba el mareógrafo ascendió la misma cantidad. La actividad tectónica en estas regiones genera de manera continua nuevo relieve el cual llega a ser muy pronunciado como sucede en la región de Acapulco ([Figura 6](#)).

### **2.5 Deslizamientos Submarinos**

Con el conocimiento reciente de los Fondos oceánicos cada vez es mas frecuente observar en zonas de talud deslizamientos rotacionales como sucede en la cadena de montes marinos de Cocos en Costa Rica, en el reborde de la plataforma continental de Yucatán, en la costa norte de Panamá, o en la cordillera submarina ubicada al este de Tuxpan ([Figura 7](#)).

De hecho si un deslizamiento submarino se presenta en el borde de las plataformas continentales o cerca de los litorales, el desgaste de masa puede desaparecer terrenos de manera abrupta.

Como resultado de estos deslizamientos se genera una topografía que semeja circos o anfiteatros. Estas situaciones se producen a partir de taludes con ángulos mayores que 10 grados (Alvarado-Hernández, 2009). Si en la base de los deslizamientos no hay depósito, se implica la remoción del mismo por la acción de corrientes de fondo.

## **3 LA EROSIÓN DE PLAYAS POR CAUSAS ANTRÓPICAS**

### **3.1 Subsistencia del Suelo por Extracción de Líquidos**

Cuando en una zona costera se extraen líquidos del subsuelo mediante pozos de bombeo se produce subsidencia del terreno superficial, toda vez que durante la extracción de líquidos los acuíferos disminuirán su volumen, debido a la compactación de los mismos ([Figura 8](#)).

### **3.2 Elevación del Nivel del Mar debido al Calentamiento Global**

A partir de la revolución industrial se ha observado un incremento considerable del CO<sub>2</sub> atmosférico el cual se vuelve exponencial hacia el año 2000. La tendencia de ésta curva es similar a la correspondiente al incremento demográfico mundial ([Figura 9](#)).

El calentamiento global es una realidad incuestionable; incluso cada año el retroceso de los glaciales en Alaska se sigue incrementando ([Figura 10](#)). Para muchos investigadores dedicados a las ciencias ambientales, el principal problema ambiental se debe al crecimiento de la población, (Montgomery, 1992; Keller, 1996; Murck et. al,

1996). Esto es lógico, ya que, al crecer la población también crecen la demanda de energéticos, agua, minerales, espacios urbanos, terrenos agrícolas, etcétera.

### **3.3 Represamiento de Ríos**

Debido a la demanda de energía eléctrica continuamente se construyen cortinas que represan el agua de los ríos y la carga de sedimentos que transportan. Los sedimentos y nutrientes que antes llegaban al mar ahora quedan retenidos en los embalses de las presas (Figura 11). Esta falta de sedimentos en las zonas costeras da lugar al fenómeno de la erosión como se puede observar en algunas localidades del alto Golfo de California (Fig. 12). Como se menciona anteriormente, a toda erosión corresponde una depositación, es decir, los sedimentos que antes constituían deltas empezaron a formar depósitos hacia el interior de las presas. Este un punto fundamental y en conflicto, pues el hombre requiere de energía eléctrica, pero la playas requieren de abastecimiento de sedimentos.

### **3.4 Modificaciones de los Litorales por la Construcción de Escolleras en las Desembocaduras de los Ríos**

Las escolleras conformadas por *enrocamientos*, o grandes tetrápodos de concreto son fundamentales para proteger los canales de navegación dentro de ríos importantes.

El lado negativo de estas construcciones es que representan obstáculos al transporte litoral de sedimentos. Las corrientes litorales pueden cambiar su dirección a lo largo de un año, no obstante, siempre hay la tendencia de contar con un transporte litoral preferente, de tal forma que una de las escolleras va a retener sedimentos, los cuales no pasarán al otro lado del río, donde se producirá erosión.

Así por ejemplo, es importante evitar la construcción de escolleras frente a Cancún, pues un nuevo huracán las impactaría contra las bases de los hoteles.

### **3.5 Construcción de Tuberías en Zonas Litorales**

Con frecuencia se construyen tuberías que drenan líquidos de diferente naturaleza. Si estas tuberías no son enterradas dentro de los sedimentos de la plataforma continental somera se corre el riesgo de que sean fracturadas por oleaje en épocas de tormentas o de huracanes, que es cuando el nivel base de la ola se profundiza.

Una vez que la tubería aflora sobre el piso marino, tendrá del mismo efecto que tienen las escolleras, de un lado de la tubería se producirá depositación y del otro lado se dará erosión. Este desbalance en la depositación de sedimentos no solamente causará erosión en la playa sino que constituirá un riesgo de ruptura de la misma tubería. Un efecto similar se puede presentar cuando se construyen puertos o canales que interrumpen el camino natural de los sedimentos.

### 3.6 Monitoreo de Líneas de Erosión de Playas.

Ya sea por causas naturales o antrópicas, es fundamental determinar las líneas de playa que se erosionarán en 10, 30, 50 o 100 años. Una vez determinadas estas líneas se tendrá el criterio adecuado para la toma de decisiones relativas a la construcción de obras de infraestructura. De esta manera la construcción de un hotel de varios cientos de millones de pesos debe ubicarse en la línea de erosión de 100 años y *las palapas* deberían de construirse cerca de la línea de erosión de 10 años (Figura 13).

## 4. CONCLUSIONES

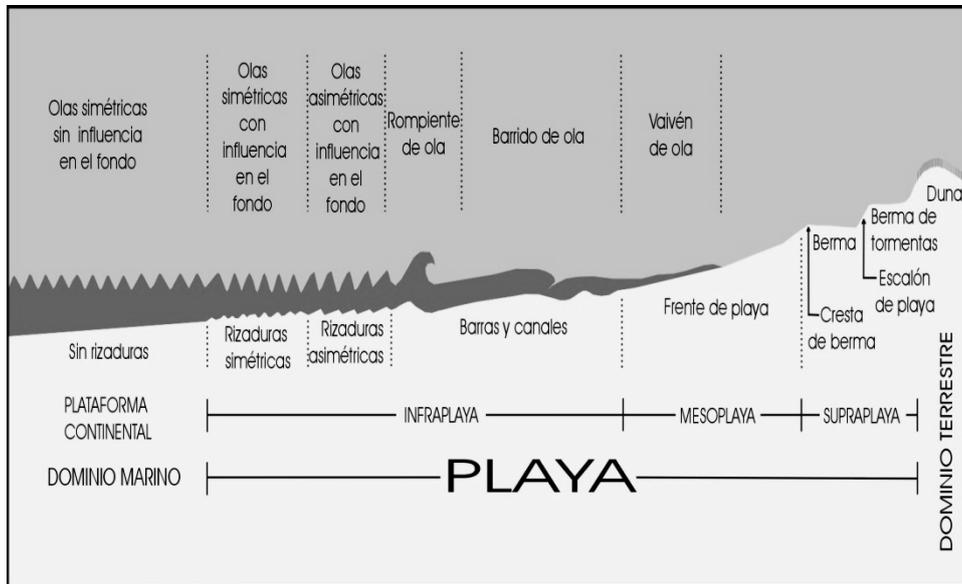
Las causas de la erosión de playas son múltiples y se relacionan directamente con el crecimiento de la población, como causa original. Aún cuando el calentamiento global constituye una amenaza muy importante, este no es el único causante de la erosión de las playas, por lo cual, en el análisis de las zonas litorales resulta fundamental considerar todas las causas naturales y/o antrópicas que intervienen en la vulnerabilidad de un litoral dado. Las consecuencias de un mal manejo ambiental de nuestros litorales pueden variar desde pérdidas de vidas humanas hasta un alto costo social, económico y político.

**Nota del Editor:** El Panel Internacional INECOL-2007: La Zona Costera en Crisis en el Golfo de México, el Caribe y el Mediterráneo, en Agosto de 2007 (ver Capítulo 9 de este Volumen), consideró que el proceso de erosión de las playas de Cancún es irreversible e irá en aumento, esencialmente por los impactos del ascenso relativo del nivel medio del mar y la mayor frecuencia e intensidad de huracanes que inciden sobre la Península de Yucatán. En Enero de 2006, después del Huracán Wilma (Noviembre 2005), la empresa Belga Jan de Nul restituyó 2.8 millones de metros cúbicos de arenas en un proyecto que costó varios millones de dólares. Los impactos de los Huracanes Dean y Felix (Agosto 2007) están bien documentados con una pérdida combinada de más de 6 millones de metros cúbicos de arenas. La tormenta tropical Dolly (Julio 2008) causó erosión y pérdidas de arenas en Cancún, estimado en 3 millones de metros cúbicos. Se conoce que las arenas depositadas en cuencas someras sobre la plataforma continental del Mar Caribe frente a Cancún, son prácticamente imposible que regresen a las playas de manera natural. Sobre este tema de “recuperación de playas” se han tomado medidas inadecuadas, incompletas, ineficientes y muy costosas, por el desconocimiento de la dinámica de la zona costera y la simpleza con que se está observando los impactos del cambio climático regional.

**Agradecimientos**

El autor de este capítulo agradece a las autoridades del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, las facilidades brindadas para la elaboración de este trabajo. Asimismo a Adriana y a Arcelia por su apoyo en el ICMYL.

Al Instituto de Ecología A. C., la invitación para participar en la Iniciativa: Panel Internacional sobre Cambio Climático – Impactos sobre la Zona Costera, coordinado por el Dr. Alejandro Yáñez-Arancibia de la Unidad de Ecosistemas Costeros, Red Temática Medio Ambiente y Sustentabilidad.



**Figura 1. Terminología del perfil de playa (Fuente: Carranza-Edwards y Caso-Chávez, 1994)**



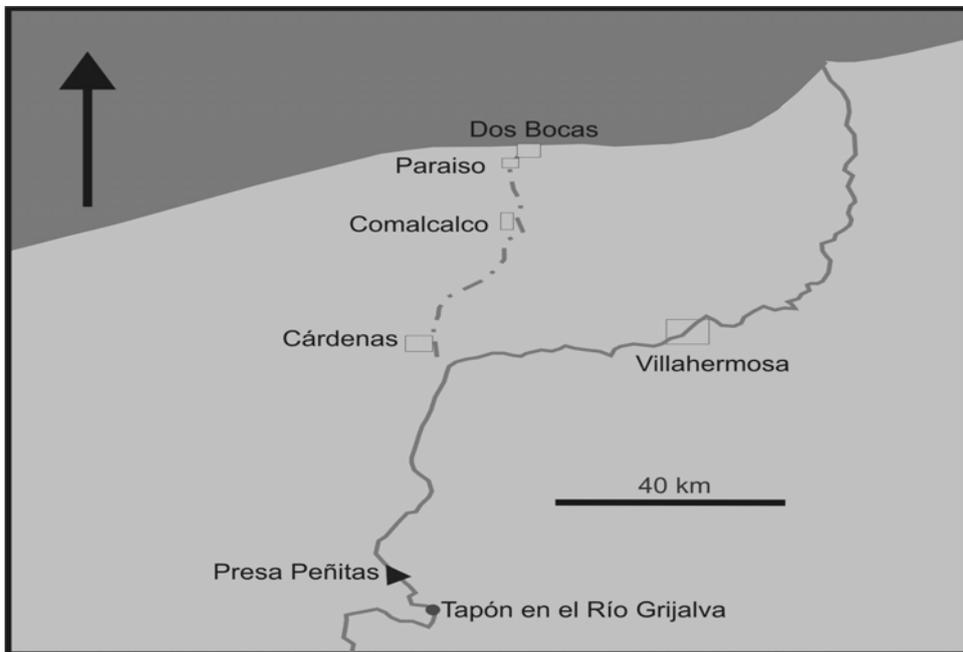
**Figura 2. Promontorio rocoso en Punta Delgada, donde la faja volcánica transversal mexicana interrumpe la zona litoral en el Golfo de México.**



**Figura 3. Lodos suspendidos. Descarga boca de Alvarado y Papaloapan. Septiembre 2008.**



**Figura 4. Mortandad de peces en el litoral cercano a la desembocadura del sistema fluvio-lagunar Papaloapan-Alvarado, Ver.**



**Figura 5. Tapón de sedimentos y rocas formado por el propio Río Grijalva, Tab.**



Figura 6. Relieve producido por tectonismo en Acapulco, Gro.

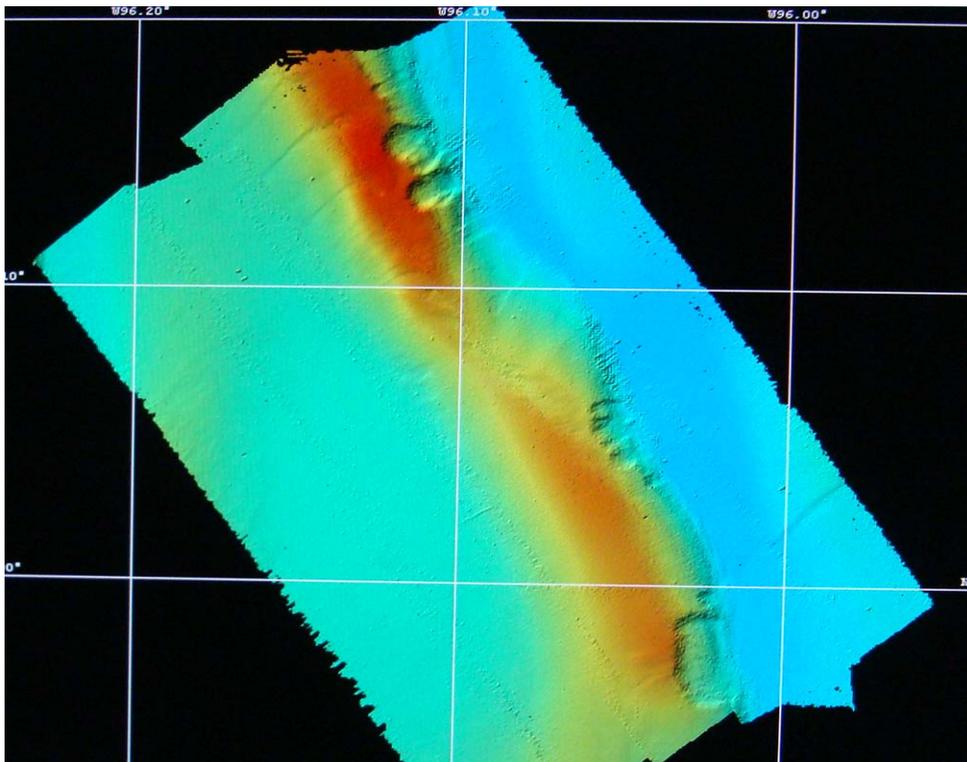


Figura 7. Sierra submarina en la que se observan huellas de deslizamientos rotacionales, frente a las costas de Tuxpan, Ver.

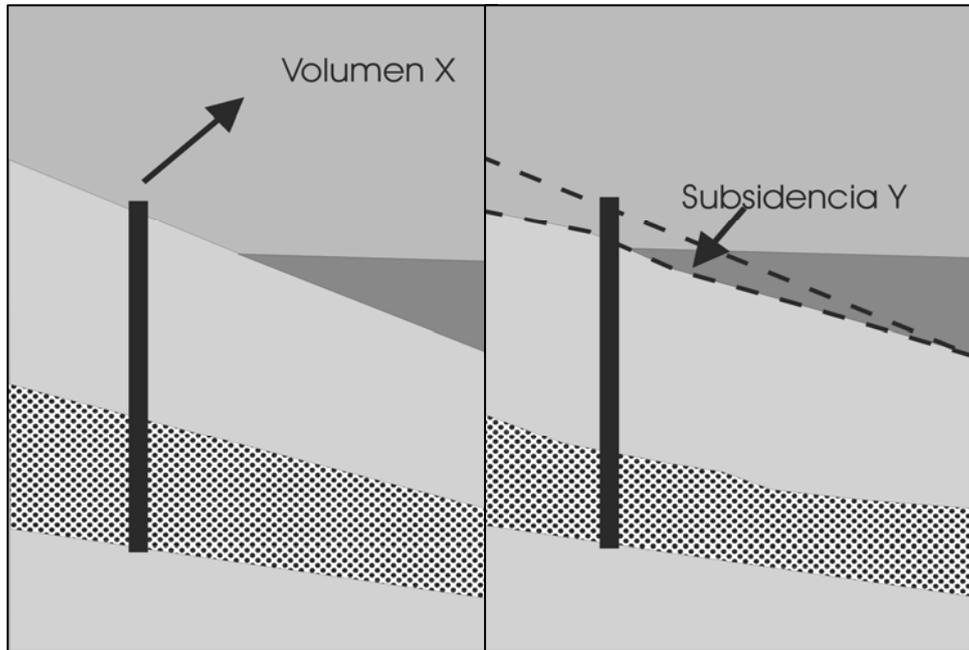


Figura 8. La extracción de líquidos del subsuelo es causa de subsidencia que a la vez es causa de erosión en zonas costeras.

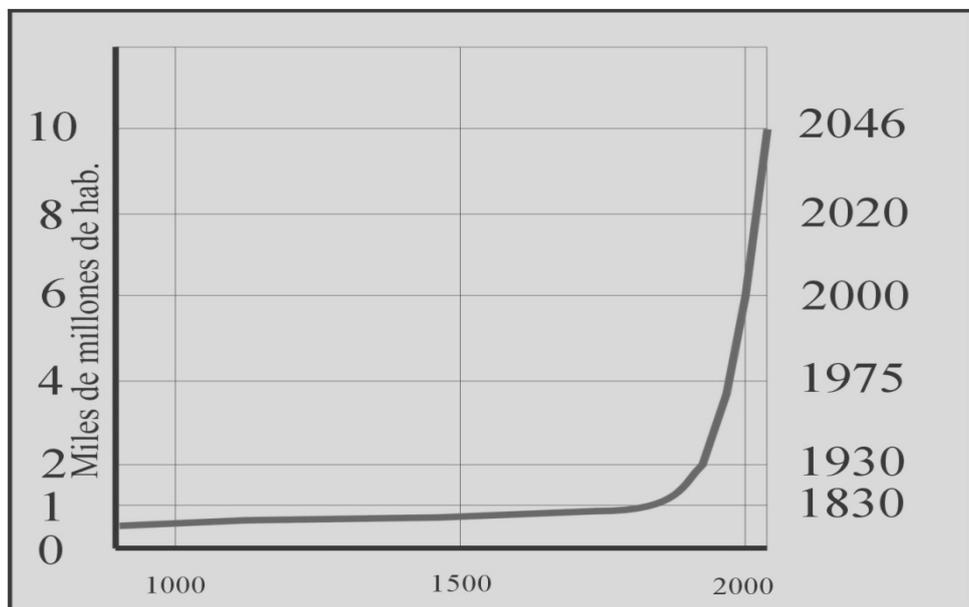


Figura 9. Crecimiento de la población a nivel mundial (modificado de McFalls, 1991).



**Figura 10.- El retroceso del Glacial Mendenhall Groenlandia, en Julio de 2008.**



**Figura 12.- Erosión en playas del Golfo de California, Santa Clara, Son.**

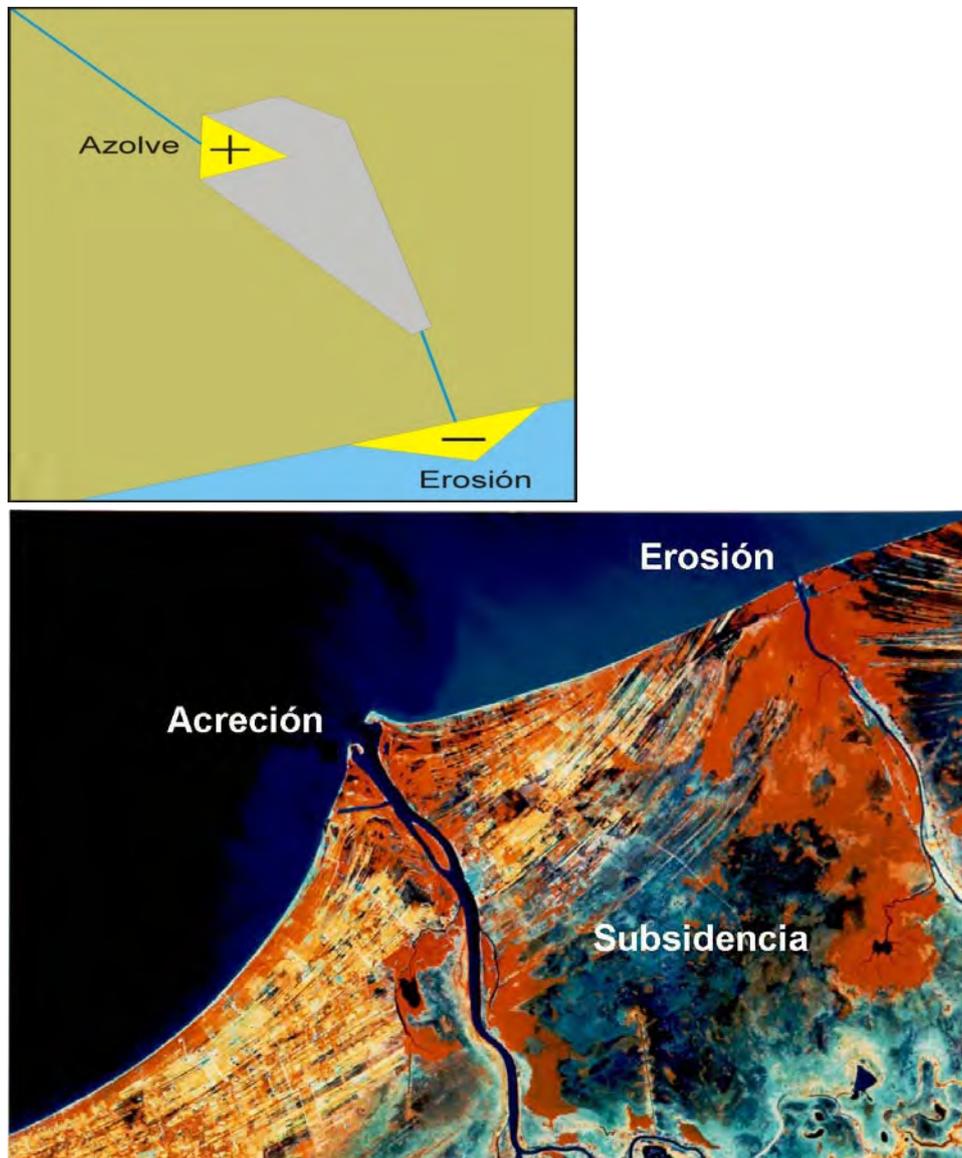
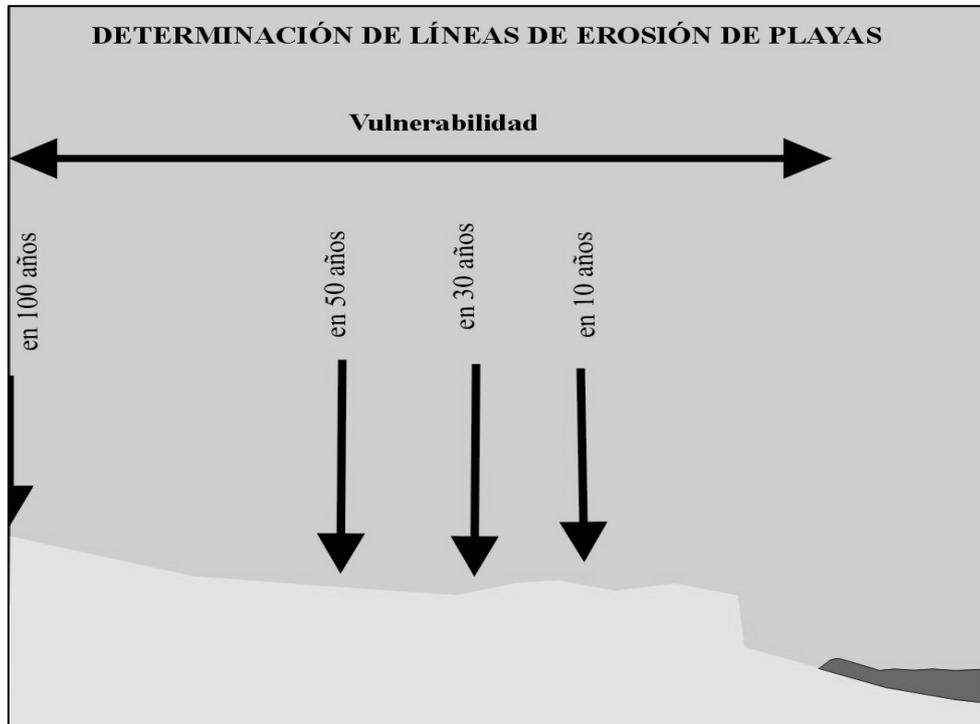


Figura 11. Retención de sedimentos y nutrientes que no llegan al mar (diagrama superior). La fotografía de satélite corresponde a la desembocadura de los ríos San Pedro-San Pablo (marcada Erosión litoral) del sistema del Ríos Usumacinta-Grijalva (Acresión), indicando los cordones de playa recientes, y antiguos erosionados, además de extensa área de Subsistencia en la zona de humedales (hundimiento en color azul por extracción de agua freática) (Fotografía, del Dr. A. Yáñez-Arancibia del Proyecto INECOL-Pemex-Centla 2001-2003).



**Figura 13.** Antes de realizar inversiones multimillonarias en los litorales, se deben establecer las líneas potenciales de erosión y definir los gradientes de vulnerabilidad para desplantar infraestructura urbana, industrial, o turística.

## 5. REFERENCIAS

Alvarado Hernández, L. A., 2009. Riesgo por Tsunamis en el Litoral del Caribe Mexicano. Carrera de Ingeniero Geólogo de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional. Fecha de Examen: 20 de enero de 2009.

Anthony, E. J., 2005. Beach erosion, p. 140-145. *In*: M. L. Schwartz (Ed.), The Encyclopedia of Coastal Sciences, Dordrecht, The Netherlands, 1212 pp.

Cabrera-Ramírez, M. y A. Carranza-Edwards, 2002. The beach environment in Mexico as a potential source of placer minerals. *Marine Georesources and Geotechnology*, 20:187-198.

Cambers, G., 1998. Coping with Beach Erosion with Case Studies from the Caribbean. Coastal Management Sourcebooks. Environment and Development UNESCO Publishing. UNESCO Paris, 120 pp.

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, p. 573-602. *In*: M. Caso, I. Pisanty y E. Ezcurra (Eds.), Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. Instituto Nacional de Ecología SEMARNAT, Instituto de Ecología, A. C., INECOL, Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A&M University Corpus Christi, Vol 1, 626 pp.

Finkl, C. W. y H. J. Walker, 2005. Beach nourishment, p. 147-161. *In*: M. L. Schwartz (Ed.), *The Encyclopedia of Coastal Sciences*, Dordrecht, The Netherlands, 1212 pp.

Keller, E. A., 1996. *Environmental Geology*. Prentice-Hall, New Jersey, 558 p.

McFalls A. Jr., 1991. Population: A Livelily Introduction. *Population Bulletin*, 46 (2): 4.

Montgomery, C. W., 1992. *Enviromental Geology*. Wm. C. Brown Publishers, 466 pp.

Murck, B. W., B. J. Skinner, S.C. Porter, 1996. *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 535 pp.

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. URL: <http://www.ine.gob.mx/download/huracanes2005.pdf>.

#### **Enlaces para información complementaria:**

<http://www.ine.gob.mx/download/huracanes2005.pdf>

<http://www.el-universal.com.mx/estados/69114.html>

<http://www.hoteles-en-cancun.com.mx/las-playas-en-cancun-riviera-maya-isla-de-cozumel-seran-recuperadas-gobierno-mexicano.html>

<http://www.planetaazul.com.mx/www/2007/08/08/empeora-la-erosion-de-playas-en-cancun/>

<http://mx.news.yahoo.com/s/18072009/7/mexico-rechazan-proyecto-explotar-bancos-arena.html>

- Ortiz Pérez, M. A. y A. P. Méndez Linares, 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del Golfo de México y Mar Caribe, p. 307-320. *In*: E. Rivera Arriaga, TG. J. Villalobos, I. Azuz Adeath y F. Rosado May (Eds.), *El manejo Costero en México*. Universidad A. de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 654 pp.

*In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010*

## **PROGRAMA VERACRUZANO DE ACCIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO - SÍNTESIS DE LOS ESTUDIOS**

**CARLOS MANUEL WELSH-RODRÍGUEZ (Compilador)**

Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana.  
Calle Francisco J. Moreno No. 207. Col. Emiliano Zapata, Xalapa 91090, Ver., México.  
*cwelsh@uv.mx*

**ADALBERTO TEJEDA-MARTÍNEZ (Compilador)**

Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas, Universidad  
Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán, Zona Universitaria, Xalapa 91090 Ver.,  
México. *atejeda@uv.mx*

### **RESUMEN**

El Programa Veracruzano ante el Cambio Climático (PVCC) ha sido el producto de una iniciativa multi institucional y transdisciplinaria, en cuya conformación han participado cerca de 80 coautores, la gran mayoría citados como fuente en esta compilación sintética, el mérito de la presente compilación es resaltar el valor académico de cada contribución. El PVCC es una piedra angular que servirá para construir una política sensible y flexible para enfrentar la adaptación al cambio climático. Pero su aplicación necesita del impulso de la sociedad, el gobierno y la empresa para que los impactos del cambio climático sea una oportunidad de desarrollo para el estado de Veracruz. Según los expertos en cambio climáticos, los países en vías de desarrollo presentan una capacidad adaptativa reducida en relación a los efectos del aumento en la temperatura, ascenso del nivel medio del mar, mayor frecuencia e intensidad de huracanes, inundaciones, o sequías. La adaptación al cambio climático en algunos sectores de Veracruz es algo inminente, los efectos de los eventos extremos (p. ej., lluvias intensas alternado con sequías prolongadas) en el sector agrícola, o en el sector salud, tienen efectos tan contundentes que el gasto público, tanto inmediato, como en la atención posterior, supera los presupuestos asignados a atender emergencias. Esto es un indicador que sin una política de planificación estratégica, el futuro marca gran incertidumbre ecológica, social y económica, por los efectos del cambio climático.

## 1. INTRODUCCIÓN

A partir de 1993, año en el que México firma la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, este tema se empieza a incluir en la agenda nacional. En el 2000 se adopta la primera estrategia nacional al respecto y, desde entonces, la lucha contra el cambio climático ha ido ganando protagonismo en las políticas públicas del país. En 2007 se incluye un apartado específico dentro del Plan Nacional de Desarrollo (PND) y se anuncia la elaboración de un Programa Especial de Acción Climática, reconociéndose, también por primera vez, que el cambio climático es un problema de seguridad nacional e internacional.

La Estrategia Nacional ante el Cambio Climático (<http://www.semarnat.gob.mx>) - presentada por el Gobierno Federal en mayo de 2007-, parte del reconocimiento de que el cambio climático es un problema de seguridad estratégica (local y mundial) y propone dos grandes líneas de acción: 1). Mitigación de las emisiones y, 2) Adaptación ante sus impactos adversos previsibles.

En este contexto, el Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT) invitó a un grupo de académicos, coordinados desde la Universidad Veracruzana, con la participación, además, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto de Ecología, A. C. (INECOL), a elaborar un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático (PVCC), aprovechando recursos del Fondo de Oportunidades Globales del Reino Unido, quien patrocinó estos estudios.

El PVCC tiene como primer propósito el alertar con información confiable. Ante una sociedad cada vez más receptiva al tema, no exenta de ser bombardeada ocasionalmente con información alarmista, es fundamental entender el fenómeno y sus posibles consecuencias para el estado de Veracruz. Particularmente, los líderes de esa sociedad –políticos, sociales, económicos, culturales- podrán ejercer su liderazgo en la materia al disponer de información válida de estudios científicos y tecnológicos, sobre los posibles impactos y análisis, tanto en el medio natural, como en los sectores encargados del desarrollo social y económico del Estado de Veracruz.

El Programa Veracruzano ante el Cambio Climático se encuentra disponible en el portal de Internet de la Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Estado de Veracruz. En dicho portal están disponibles los estudios en extenso que conforman el programa (<http://www.proteccioncivilver.gob.mx/>).

## 2. INVENTARIO DE EMISIONES

Un inventario de emisiones que identifique y cuantifique las principales fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero (GEI) de una región es básico para cualquier estudio sobre cambio climático, con el fin de identificar su responsabilidad global y planificar posibles opciones de mitigación.

Las emisiones de GEI de los sectores estimados en el Estado de Veracruz han tenido un crecimiento total, en el periodo 2000-2004 de 11.2% (Welsh, 2008). De los sectores considerados en el Inventario de Emisiones de GEI de Veracruz, el que más aportó a las emisiones fue el sector eléctrico, seguido del agropecuario y, por último, de los sectores industrial, petrolero (emisiones fugitivas) y residuos.

Entre los factores que favorecen el incremento de las emisiones de GEI que se ha observado en el estado, los más importantes son el crecimiento industrial y de las zonas urbanas, así como el aumento en las actividades agropecuarias y el cambio de uso del suelo, aunque de esta última no ha sido imposible estimarse debido a la falta de calidad de datos. Las emisiones de la industria metalúrgica, por ejemplo, se incrementaron en 1.8% a lo largo del periodo 2000-2004, lo que equivale a una tasa promedio de crecimiento anual de 0.4%. Por otra parte, a lo largo del mismo periodo, las emisiones de GEI de la industria química del estado, disminuyeron 19.6%, a una tasa promedio anual de decremento de 5.3%. Para la producción de cemento y cal, las emisiones de GEI en el periodo disminuyeron 0.7%, a una tasa de reducción promedio anual de 0.2%.

Del total de las emisiones de GEI, provenientes de los cuatro sectores de estudio en conjunto sin incluir los procesos industriales, el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el que más contribuye a estas emisiones, seguido del metano (CH<sub>4</sub>) y, por último, con una contribución mínima, el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). La contribución del CO<sub>2</sub> al total de las emisiones de GEI varía a lo largo del periodo, entre 62.4 y 67.3 %, y presentando su mayor aportación en el año 2003. La contribución del CH<sub>4</sub> varía igualmente a lo largo del periodo, aportando entre 32.6 y 37.6% con la mayor participación en el año 2004. El N<sub>2</sub>O se mantiene aproximadamente con una participación de 0.1% a lo largo del periodo referido (Welsh, 2008).

### 3. ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Los escenarios climáticos proporcionan representaciones verosímiles del clima futuro construidas a partir de relaciones entre las variables del clima observado y el proyectado (Juárez, 2008), y suelen utilizarse como fundamento para la elaboración de modelos de impacto futuro.

Los escenarios de cambio climático (ECC) usados para describir un posible estado futuro del mundo, están basados en las condiciones climáticas observadas (generalmente durante un periodo de treinta años); actualmente se emplea el periodo 1961-1990, denominado “escenario base” (Palma, 2008a; Ruiz, 2008).

Los escenarios futuros para el país apuntan hacia un aumento del riesgo climático, dado que las proyecciones en las temperaturas y precipitación han resultado ser similares o superiores a los presentados durante eventos extremos en el pasado (Figura 1, Vázquez, 2008); lo cual hace necesario identificar a escalas regionales los posibles impactos y

vulnerabilidad con el fin de plantear estrategias de adaptación y mitigación ante dichos escenarios y contingencias climáticas.

#### 4. VULNERABILIDAD DEL SISTEMA BIOFÍSICO

##### 1.1 Costas

Para el Golfo de México, el escenario de cambio climático global más aceptado es aquél que, en síntesis, prevé que los accidentes extremos del clima (sequías, lluvias abundantes, mayor incidencia de huracanes y depresiones tropicales) se acentuarán en los años por venir. A este escenario se suman dos fenómenos mayores: 1) El cambio en las condiciones térmicas de la corriente del Golfo y, 2) El aumento en el nivel de los mares relacionado con el deshielo de los glaciares continentales y la dilatación térmica, de acuerdo a los resultados difundidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático en su cuarto reporte de evaluación (IPCC, 2007).

En el Golfo, a escala mensual, las mediciones del nivel del mar en diferentes puntos de su costa durante 15 años, muestran que los niveles más altos durante el año se presentan en Coatzacoalcos (189 a 213 cm.), mientras que en invierno en Ciudad Madero llega a 179.8 cm. (rango medio de 35 cm.; rango diario 40.8 cm.), y en Progreso a 112.7 cm. En esta generalidad, la amplitud del cambio entre mareas normales bajas y altas es muy pequeña: se ubica entre 25 y 50 cm. (Palma, 2008).

Las costas -bajas, arenosas, con extensos humedales adyacentes, a menos de un metro sobre el nivel del mar- representan la fracción de territorio veracruzano más vulnerable al ascenso del nivel del mar, que afectará poblados y ecosistemas, además de la infiltración de agua salina hasta los mantos freáticos (Palma, 2008; Pereyra, 2008).

Es probable que ocurran modificaciones importantes en la interfase mar-tierra y en los manglares y los arrecifes coralinos, que podrán ser afectados por el aumento del nivel del mar pronosticado por los modelos de calentamiento global.

Estos datos son preocupantes si se considera que en Veracruz, a partir de los años cincuenta, una vez puestas en marcha diferentes acciones para mejorar las condiciones salubres en sus llanuras costeras, la atracción migratoria hacia sus principales puertos y tierra abiertas a la colonización rural, no cesó de aumentar (González, 2008).

Además sí, como es de esperar, el cambio climático conlleva un incremento en la demanda de agua por disminución de la lluvia en zonas áridas, e intrusión salina en los mantos de las planicies costeras, sería muy probable que se presente una disminución en la disponibilidad de este líquido para cubrir las necesidades futuras de la sociedad (González, 2008). En este sentido, de acuerdo a los resultados del PVCC se prevé para este siglo una disminución significativa en el almacenamiento hídrico para las regiones de Coatzacoalcos, Papaloapan, norte de Veracruz y Pánuco (Pereyra, 2008).

## 1.2 Biodiversidad

Las perspectivas sobre las posibles implicaciones del cambio climático para la biodiversidad a nivel mundial son desalentadoras, e incluyen el desplazamiento y la extirpación de especies de plantas y animales, la modificación o sustitución de ecosistemas a nivel regional –como humedales– y, en el peor de los casos, la extinción, sustitución, o invasión de especies (IPCC, 2007; Day et al., 2008).

Los bosques tropicales perennifolios y caducifolios se espera tendrán una ampliación en la prevaencia de condiciones propicias en la década 2020, para dar lugar en el horizonte de 50 años, a las condiciones que favorecerán reacomodos, sobre todo al bosque tropical caducifolio (Benítez, 2008). Asimismo, esto ya se está presentando en los bosques perennes de manglares con nuevas distribuciones en el Golfo de México (Yáñez-Arancibia et al., 2009, este volumen).

Se ha reconocido que los bosques mesófilos de montaña (BMM) de México serán más sensibles al aumento en la temperatura, es decir, serán más secos y cálidos; además son asociaciones vegetales que están en continuo disturbio causado por agentes naturales y antropogénicos. Este escenario para el BMM provocaría cambios dramáticos en su estructura, composición y distribución (Alba, 2008; Pineda, 2008).

La destrucción del hábitat es el factor más importante de la pérdida de biodiversidad en Veracruz. Los mamíferos probablemente se desplazarán hacia las partes altas del estado. Los anfibios y los reptiles parecen estar en desventaja para enfrentar el calentamiento global en el escenario veracruzano. Es de esperar que las especies de aves de Veracruz colonicen otras áreas. No se avizoran extinciones locales, salvo alguna de las 28 especies endémicas. Las poblaciones y especies aisladas (en las montañas) con limitadas capacidades para dispersarse pueden estar en riesgo en gradientes altitudinales o latitudinales limitados (Benítez, 2008).

Los efectos derivados del cambio climático global pueden ocasionar sobre este recurso, además de la extinción de especies y la reducción drástica de los rangos de distribución ya discutidos, condiciones que favorecerían el establecimiento de ciertas especies de animales en zonas donde antes no se encontraban, la ampliación de sus áreas de distribución y la creación de las condiciones ambientales adecuadas para que aumenten su abundancia; lo que desafortunadamente pudiera ocurrir con especies consideradas como nocivas para el ser humano, como sería el caso de los insectos transmisores de organismos patógenos causantes de enfermedades ([Figura 2](#); Benítez, 2008; Pineda 2008).

## 5. ECONOMÍA Y SOCIEDAD

El cambio climático provocaría grandes pérdidas económicas al sector turístico y comercial del Estado de Veracruz, y originaría que este sector económico disminuyera su contribución al producto interior bruto (PIB) estatal. A este cambio se agrega la

condición de pobreza urbana que caracteriza a la mayoría de las ciudades. En síntesis, el cambio climático puede provocar la caída del PIB estatal y la pérdida de su participación en el PIB nacional debido a la disminución de la producción en gran parte de las actividades económicas (IPCC 2007, Gutiérrez 2008). Un efecto sinérgico negativo puede aumentar el decremento de las actividades económicas por la desintegración ecológica de los ecosistemas por actividades antrópicas que se suman al impacto por cambio climático (Yáñez-Arancibia et al., 2009).

Así, la riqueza biológica de Veracruz se encuentra en grave riesgo, aunado al hecho de que más del 72% de la superficie del estado ha sido transformada para usos agropecuarios y urbanos. Además, en caso de perder especies vegetales, se afectaría de manera importante la nutrición de poblaciones locales que se basan en plantas comestibles, así como la disponibilidad de otros productos que contribuyen al apoyo económico y son un medio de mantenimiento de las poblaciones rurales (Gutiérrez, 2008).

Por otro lado, ante el aumento del nivel del mar y dada la ubicación cercana al litoral de las industrias más importantes del estado, se pueden esperar graves problemas en particular para la industria eléctrica, petroquímica, y agropecuarias de la llanura costera, en especial si no se toman medidas de adaptación al cambio climático con la suficiente anticipación.

### 5.1 Sector Agropecuario

En cuanto a la vulnerabilidad agrícola, los efectos del cambio climático se diferencian para cada cultivo; en el caso del maíz se incrementarían las zonas no aptas si aumenta la precipitación; en el caso de otros cultivos importantes para el Estado como la naranja, la tendencia es hacia la disminución de la aptitud para su cultivo en todas las regiones hidrológicas para todos los escenarios, resalta además que este comportamiento obedece generalmente a los incrementos de la temperatura proyectados más que a las variaciones de precipitación (Figura 3, Palma, 2008b) En el caso de la papaya las altas temperaturas diurnas tendrían como consecuencia problemas de fertilidad y calidad de los frutos fecundados (Pineda, 2008).

Por su parte, dados los escenarios de cambio climático proyectados para la década del 2020, se espera que la vulnerabilidad de la ganadería bovina del Estado no sea homogénea geográficamente. El nivel de vulnerabilidad estará asociado al tipo de fenómeno climático (sequías, lluvias torrenciales e inundaciones) y a la susceptibilidad de los componentes que integran las unidades de producción (animales, potreros y/o infraestructura). Además las condiciones climáticas y las enfermedades del ganado, principalmente las de carácter infeccioso, mantienen una relación de espacio y tiempo. Los brotes de enfermedades están asociados con agentes patógenos y cuadros típicos definidos (Salazar, 2008).

Asimismo, los efectos del cambio climático sobre la pesca incrementarían los problemas de sustentabilidad, desde ya existentes en este sector. La sobreexplotación, el sobre dimensionamiento de la capacidad instalada, los conflictos entre flotas y con otras

actividades, un manejo que ignora la variabilidad ambiental y la incapacidad para emprender y aplicar medidas jurídicas eficaces, son aspectos recurrentes, que según el IPCC (2007), se agravarán por el cambio climático (Jaimes y Marín, 2008).

## **5.2 Energía Eléctrica**

Previsiblemente, los requerimientos energéticos de la población aumentarán a medida que se acentúe el cambio climático (González, 2008), principalmente por climatizar casas y edificios públicos y privados.

Los incrementos por usuarios domésticos más llamativos ocurrirán en las zonas costeras: 10.3%, 20.0% y 43.4% correspondientes a los periodos 2020, 2050 y 2080. Este incremento tenderá a disminuir hacia las localidades situadas en las regiones montañosas, pero para la zona costera se esperaría que pudiera llegar a 25% para el 2020, 91% para el 2050 y de 111% para el 2080, mientras que para el estado en su conjunto será del 35%, 127% y 155% para los mismos años. Todo ello sin considerar el calentamiento producido por el efecto de las islas urbanas de calor, que debería incorporarse en los casos de las conurbaciones cercanas o que sobrepasen un millón de habitantes (Tejeda y García, 2008).

En suma, para la década del 2020, los consumos eléctricos domésticos se incrementarán en un 35% (7% debido al crecimiento poblacional y 28% al cambio climático). Para los 2050 la población aportará el 62% y por cambio climático el 65% (para un incremento total del 127% respecto al presente) (Tejeda y García, 2008).

## **5.3 Salud Pública**

La salud humana puede verse afectada de muy diversas formas por el clima y sus variaciones. Especialmente, ciertas enfermedades transmitidas por vectores, infecciosas y parasitarias, y las asociadas a eventos climáticos extremos, se agudizarán o harán más frecuentes a raíz del cambio climático. Por otra parte, los efectos de las ondas de calor en la población de las zonas cálidas se traducirán cada vez más claramente en muertes de personas con problemas cardíacos y respiratorios, especialmente niños y ancianos (Tejeda y García, 2008; Hernández, 2008; Riojas, 2008).

El dengue puede ser una de las enfermedades más sensibles al cambio climático a largo plazo. Además, es importante señalar que muchos estudios epidemiológicos han implicado a la radiación solar en los cánceres de piel (Hernández, 2008, Riojas, 2008).

## 6. COMENTARIOS FINALES

Si bien es cierto que la lucha contra el cambio climático exige la adopción de medidas de mitigación de las emisiones antropogénicas de GEI, a nivel estatal se necesita la colaboración y soporte del Gobierno Federal, su aplicación no depende de acciones de política Estatal sino Nacional. Desde luego, que la participación del sector empresarial privado puede ser fundamental en una política de mitigación.

Según los expertos en cambio climático, los países en vías de desarrollo presentan una capacidad adaptativa reducida en relación a los efectos del aumento en la temperatura en el largo plazo, esto se debe a una serie de factores relacionados, entre los que se encuentran: 1) los bajos niveles de riqueza económica, 2) la falta de infraestructura física y social, especialmente en salud y educación, 3) la escasez de tecnología, 4) el nivel bajo de eficiencia y confianza en las instituciones y servicios que prestan a la sociedad, 5) la falta de información y conocimientos, y 6) la desigualdad social y la pobreza que impide la equidad en la distribución de los beneficios sociales. Por ello, uno de los objetivos de los países pobres debe ser, necesariamente, el aumentar el desarrollo económico, lo cual aumentará la capacidad de adaptación de los habitantes de las comunidades y los hará menos vulnerables al cambio climático.

Además de hacer un análisis de la vulnerabilidad del territorio veracruzano frente a los efectos del cambio climático, en el PVCC se proponen medidas de adaptación para sectores específicos que pretenden que dichos efectos sean lo menos nocivos posible. Pero quizá el valor más importante es la capacidad de quienes contribuyeron al PVCC para hacer viable la colaboración entre instituciones y disciplinas, el interés de abordar de manera integral cada uno de los impactos del cambio climático en Veracruz, además de vincularse directamente con la realidad social mediante las propuestas de adaptación, reconociendo ser parte del problema y de la solución. Fueron más de ochenta personas (científicos y técnicos) quienes intervinieron en la construcción del PVCC, un proyecto académico que deberá ser empoderado por el Gobierno, su efectividad depende de un número alto de factores exógenos a la dupla Gobierno-Sociedad. Sin embargo, es una piedra angular que servirá para construir una política sensible y flexible para enfrentar la adaptación al cambio climático. Pero su aplicación necesita del impulso de la sociedad, el gobierno y la empresa para que los impactos del cambio climático sea una oportunidad de desarrollo para el estado de Veracruz.

La adaptación al cambio climático en algunos sectores de Veracruz es algo inminente, los efectos de los eventos extremos (p.ej. lluvias intensas alternado con sequías prolongadas) en el sector agrícola, o en el sector salud, tienen efectos tan contundentes que el gasto, tanto inmediato, como en la atención posterior, supera los presupuestos asignados a atender emergencias, lo que es una evidencia de que en el largo plazo las acciones de adaptación que se implementen hoy lograrán disminuir la magnitud de los impactos a futuro.

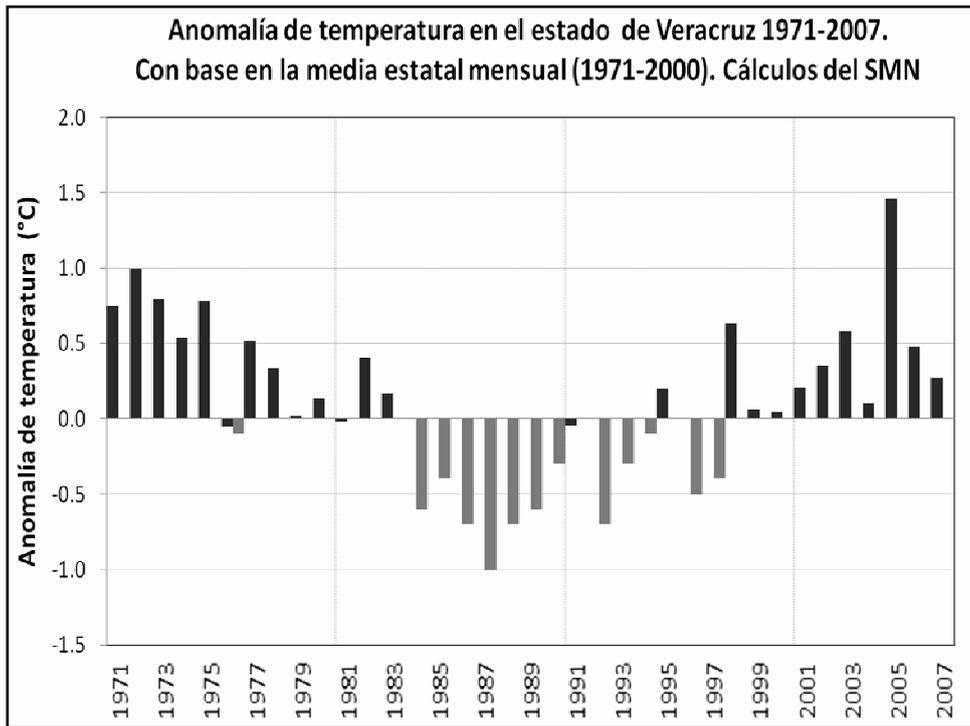
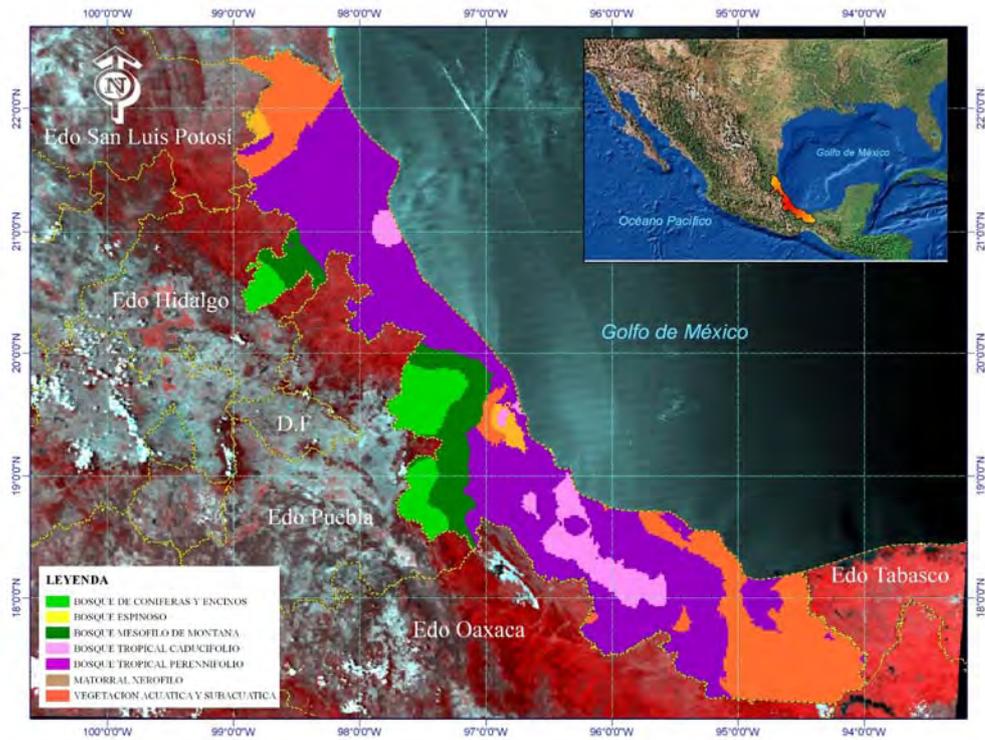


Figura 1. Anomalía de temperatura estatal para Veracruz 1971-2007 con base en la media calculada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Fuente: Vázquez (2008).



**Figura 2.** Mapa potencial de vegetación del Estado de Veracruz, proyectado a la década 2020, basado en el método HadRCM PRECIS, bajo un escenario de altas emisiones atmosféricas (A2). Tomado de Benítez et al. (2008). Bosque de coníferas y encinos en verde lima, bosque espinoso en amarillo, bosque mesófilo de montaña en verde olivo, bosque tropical caducifolio en rosa, bosque tropical perennifolio en magenta, matorral xerófilo en café y vegetación acuática y subacuática en naranja.

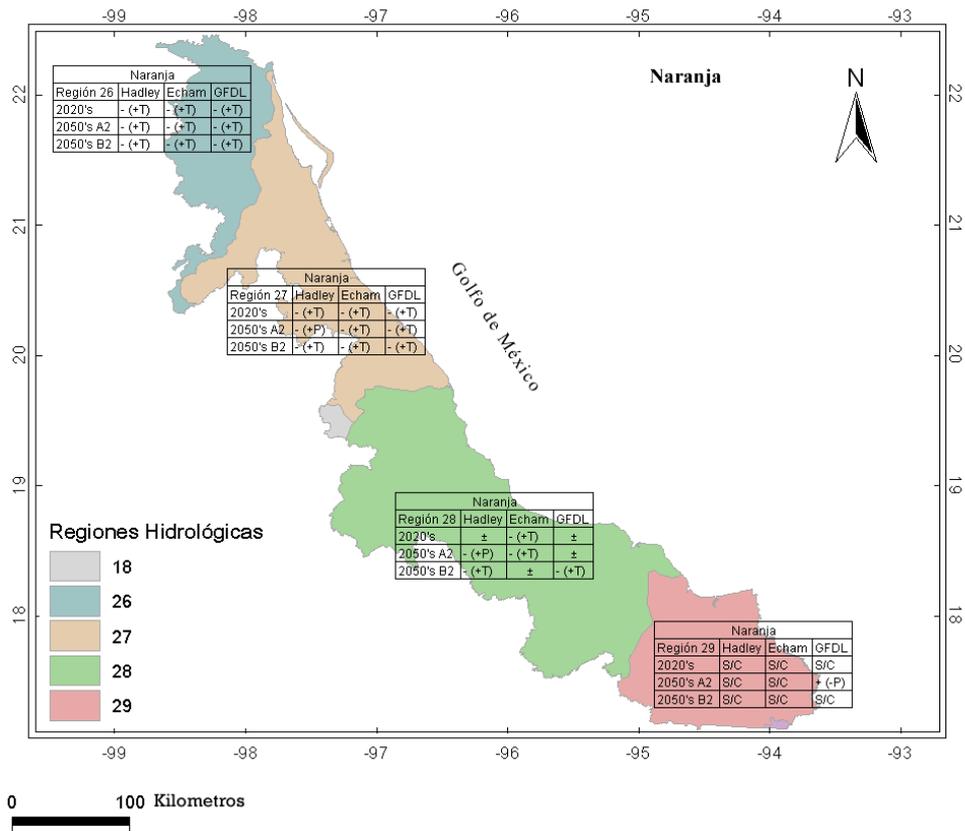


Figura 3. Cambios en la aptitud del cultivo de la naranja causados por variaciones en la temperatura media y precipitación acumulada anual por región hidrológica (una región hidrológica es la agrupación de varias cuencas hidrológicas con niveles de escurrimiento superficial muy similares). Tomado de Palma et al. (2008 b). Región 18 Balsas en gris, región 26 Pánuco en acero, región 27 Tuxpan-Nautla en madera, región 28 Papaloapan en verde y región 29 Coatzacoalcos en rosa.

## 7. REFERENCIAS

- Alba-Landa, J., L. C. Mendizábal-Hernández, J. Márquez-Ramírez y A. Niembro-Rocas, 2008. Los bosques y el cambio climático. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 4. Impactos en el Medio Natural.
- Benítez-Badillo, G., A. Hernández-Huerta, M. E. Equihua-Zamora, A. Medina-Chena, J. L. Álvarez-Palacios, S. Ibáñez-Bernal y C. Delfín-Alonso, 2008. Biodiversidad y cambio climático. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 4. Impactos en el Medio Natural.
- Contreras-López, M. E., R. E. Contreras-López, C. Daniels-Rodríguez, L. C. Martí-Capitanachi, S. Moncayo-Rodríguez, J. Montalvo-Romero y M. T. Montalvo-Romero. 2008. Reflexiones en torno al marco legal e institucional. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 6. Aspectos Sociales y Políticos.
- COPLADEVER, 2008. [Consejo de Planeación y Desarrollo de Veracruz] Resultados definitivos del segundo conteo de población y vivienda levantado en octubre del 2005. Versión resumida. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Anexo 2.
- 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.
- García-López, T., 2008. La política mexicana de acción climática y su aplicación en el estado. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 6. Aspectos Sociales y Políticos.
- González-Martínez, J. R., 2008. La población y los asentamientos humanos veracruzanos ante el calentamiento global. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 6. Aspectos Sociales y Políticos.
- Gutiérrez-Bonilla, L. A., A. Juárez, E. López-Flores, R. Palma-Grayeb, C. Reyes-Sánchez, 2008a. El cambio climático y su impacto económico. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 5. Aspectos Económicos.

Gutiérrez-Bonilla, L. A., E. López-Flores, 2008b. Alineación del Plan Nacional de Desarrollo y el Plan Veracruzano de Desarrollo, en materia de cambio climático. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Anexo 1.

Hernández-Guerson, E., E. Rodríguez-Romero, M. S. Lozanía-Valerio, 2008. Clima y salud. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 6. Aspectos Sociales y Políticos.

IPCC, 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Core writing team, R. K. Pachauri y A. Reisinger, y equipo principal de redacción. IPCC, Suiza, 105 p.

Jaimés, A. y M. Marín-Hernández, 2008. Vulnerabilidad de la pesca artesanal en el litoral veracruzano ante el cambio climático. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 5. Aspectos Económicos.

Juárez-Cerrillo, S. F., R. Jiménez-Zamudio, M. L. Velasco-Vázquez, A. Luna-Díaz Peón, C. A. Ochoa- Martínez, A. Jiménez-Lagunes, L. Jiménez-Lagunes, 2008. Análisis estadístico histórico de variabilidad climática. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 3. Modelación Climática y Evidencia Estadística.

Macedo-Paredes, J., 2008. Medidas de mitigación y adaptación en el sector vivienda. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 5. Aspectos Económicos.

Ochoa-Calderón, V., 2008. Granjas Carroll de México: ejemplos de uso de mecanismos de desarrollo limpio. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Anexo 4.

Palma-Grayeb, B. E., C. Conde-Álvarez, R. E. Morales-Cortez, G. Colorado-Ruiz, 2008. a). Escenarios climáticos. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 3. Modelación Climática y Evidencia Estadística.

Palma-Grayeb, B.E., C. Conde-Álvarez, R.E. Morales-Cortez, G. Colorado-Ruiz, 2008. b). Análisis de la vulnerabilidad agrícola. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 5. Aspectos Económicos

Palma, R., 2008. Vulnerabilidad de las costas: apuntes para una caracterización general. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 4. Impactos en el Medio Natural.

Pereyra-Díaz, D., J. A. Agustín Pérez-Sesma, A. D. Contreras-Hernández, 2008. Escenarios futuros de los recursos hídricos. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 4. Impactos en el Medio Natural.

Pineda-López, M. R., L. R. Sánchez-Velázquez, J. C. Noa-Carrazana, N. Flores-Estévez, F. Díaz-Fleischer, L. Iglesias-Andreu, G. Ortiz-Cevallos, G. Vázquez-Domínguez, S.G. Vásquez-Morales, 2008. Adaptación de la biodiversidad y cambio climático. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 4. Impactos en el Medio Natural.

Riojas-Rodríguez, H., M. Hurtado-Díaz, G. Litai-Moreno, S. Rothenberg-Lorenz, R. Santos-Luna, J. L.. Texcalac-Sang, 2008. Estudio piloto sobre escenarios de riesgos en salud asociados al cambio climático en regiones seleccionadas de México. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 6. Aspectos Sociales y Políticos.

Ruiz-Barradas, A., 2008. Variabilidad climática y teleconexiones: una revisión bibliográfica. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 3. Modelación Climática y Evidencia Estadística.

Salazar-Lizán, S., A. Hernández-Beltrán, S. Muñoz-Melgarejo, B. Dominguez-Mancera, P. Cervantes-Acosta, C. Lamothe-Zavaleta, 2008. La ganadería bovina: vulnerabilidad y mitigación. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 5. Aspectos Económicos.

Tejeda-Martínez, A., G. García-Grijalva, 2008a. Escenarios de consumos eléctricos por climatización. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 5. Aspectos Económicos.

Tejeda-Martínez, A., M., Guadarrama-Olivera, C. A., Ochoa-Martínez, A. Medina-Chena, M. E., Equihua-Zamora, A., Cejudo-Báez, C. M., Welsh-Rodríguez, S., Salazar-Lizán, T., García-López y M., Marín-Hernández (Compiladores), 2008b. Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México.

Vázquez-Aguirre, J. L., M. Brunet, P. D. Jones, 2008. Variabilidad natural del clima y detección instrumental del cambio climático. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y

Embajada Británica en México. Capítulo 3. Modelación Climática y Evidencia Estadísticas.

Welsh-Rodríguez, C. M., L. Rodríguez-Viqueira, S. Guzmán-Rojas, 2008. Inventario preliminar de emisiones de gases de efecto invernadero en el estado de Veracruz 2000-2004. *In: Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Capítulo 2. Inventario Preliminar de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day, R. R. Twilley y R. H. Day, 2009a. Los manglares frente al cambio climático: ¿Tropicalización global del Golfo de México? *In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.), Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*. INECOL, Texas Sea-Grant Program, INE-SEMARNAT, México DF, 2010. (Este Volumen).

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? 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 pp.



*In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010*

## **URBANIZACIÓN RESILIENTE – PRIMERA RESPUESTA AL CAMBIO CLIMATICO EN LAS COSTAS DEL GOLFO DE MÉXICO**

**JOHN S. JACOB**

Texas Sea Grant Program, Texas A&M University System, Houston, TX,  
*jjacob@tamu.edu*

### **RESUMEN**

El crecimiento poblacional en las costas del Golfo de México está exponiendo cada año a más y más personas a peligros costeros como las inundaciones y tormentas tropicales. El cambio climático promete hacer lo mismo al haber más y tal vez peores tormentas. Las prácticas que debemos de instituir para enfrentarnos al cambio climático son exactamente las mismas para responder al crecimiento poblacional costero. Una urbanización más resiliente que contribuye menos al cambio climático y que a la vez es más resistente a las tormentas requiere el establecimiento de una cultura de planificación que actualmente no existe en plenitud en ninguna parte del Golfo. La forma urbana más resiliente es compacta y caminable. México desafortunadamente está siguiendo un modelo fallido de “modernización” que se centra en facilitar la circulación de automóviles privados a expensas del ambiente peatonal. Esta política hará que las poblaciones costeras del Golfo sean más susceptibles a los impactos de los peligros costeros, así como a los trastornos futuros asociados con el cénit del petróleo. Hacer una ciudad, compacta, vivible y caminable, conjuntamente con proteger los humedales adyacentes, resulta ser la mejor política para enfrentarnos al cambio climático.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Ha habido, y siempre habrá, una concentración preferencial de las ciudades en las costas, por su cercanía al agua, paisaje y nexos a los mercados. En los Estados Unidos, por ejemplo, el 53% de la población vive en zonas costeras que solamente ocupan el 17% del área de la nación (Crossett et al., 2004). Históricamente, la población humana ha sido rural y/o sub urbana. Sin embargo, es muy significativo que el Siglo XXI es el primer

siglo en la historia donde la mayor parte de la población mundial vive en ciudades (UNFPA, 2007). Queda claro, que cuando hablamos de cambio climático en las costas del Golfo de México, tenemos que tener un enfoque preferencial hacia las ciudades.

Las ciudades merecen atención especial. En primer lugar, porque generan fuertes impactos sobre el ambiente de la zona costera. Sus superficies impermeables resultan en escurrimiento fuertemente contaminado que impacta la calidad de las aguas costeras (Islam y Tanaka, 2004). Además, la expansión urbana destruye miles de hectáreas de bosques, hábitat costero y humedales en particular. Estos dos y otros impactos más, hacen que la costa sea más susceptible a los efectos del cambio climático (IAIA, 2001; Levina et al. 2007). Más allá de los impactos directos de la urbanización sobre la calidad del ambiente, el crecimiento urbano costero desordenado está exponiendo a más y más personas a los peligros costeros, como por ejemplo inundaciones asociadas con huracanes y otras tormentas. El cambio climático solo empeorará esta situación.

Yo sostengo que la forma que nuestras ciudades toman tiene mucho que ver con la severidad de los impactos urbanos sobre el ambiente costero, y contribuye también en gran parte al nivel de exposición de poblaciones costeras a los peligros del cambio climático sobre las costas. Pero más allá de estos impactos, estamos llegando a un punto de equilibrio en cuanto a la “vivibilidad” de nuestras ciudades. Resulta que las políticas que tenemos que implementar para mejorar la vivibilidad de nuestras ciudades en la mayor parte de los casos son las mismas políticas que hay que implementar para aminorar impactos costeros y mejorar la “resiliencia” de nuestras comunidades, y por lo tanto para adaptarnos a los impactos del cambio climático (Jacob y Showalter, 2007, Levina et al., 2007).

Hay que reconocer que hay bastante incertidumbre en cuanto al cambio climático. No en cuanto a si existe o no, o si es el resultado de impactos humanos o no. Estas preguntas están resueltas con respuestas afirmativas en los paneles internacionales que hemos desarrollado en Xalapa, Ver., INECOL, México (ver los dos capítulos finales de este Libro); pero si falta información en cuanto a la magnitud y clase de impactos.

## **2. INTERSECCIÓN DEL CAMBIO CLIMATICO Y EL CRECIMIENTO POBLACIONAL, Y “POLITICAS QUE NO SE LAMENTAN”**

Casi toda la costa del Golfo de México está experimentando crecimiento poblacional acelerado. Texas y Florida, por ejemplo, crecieron por lo menos 12% entre 2000 y 2006, y se proyecta que estos dos estados doblarán sus poblaciones en los próximos 30 años (Jacob y Showalter, 2007). Estos son los dos estados de los EUA con más crecimiento en el Golfo, pero los otros están creciendo también, y por simple inspección se ve que las ciudades costeras de México igualmente están experimentando altas tasas de crecimiento e impactando el medio ambiente en sacrificio de su desarrollo económico (Yáñez-Arancibia et al., 2009).

La [Figura 1](#) muestra el cambio poblacional en un condado costero del estado de Texas, sobrepuesto a la incidencia de huracanes que han tocado tierra en este condado en

los últimos cien años. Es obvio que la incidencia de huracanes no ha influido en lo más mínimo en la tasa de crecimiento. Todo este condado está expuesto a peligros costeros asociados con los huracanes. El resultado sencillo de este crecimiento es que se están exponiendo a más y más personas a los peligros costeros. A pesar de que no podemos precisar exactamente los resultados del cambio climático, es casi una certeza de que experimentaremos más extremos en el clima, y por lo tanto es bastante probable de que habrá eventos más intensos y tal vez más frecuentes (Parmesan y Yohe, 2003; Hoyos et al., 2006, Pfeffer et al., 2007, Rahmstorf, 2008). En otras palabras, habrá más personas expuestas a peligros costeros, aún sin crecimiento poblacional.

Por lo tanto, el crecimiento poblacional costero y el cambio climático tienen el mismo resultado: más personas expuestas a peligros costeros. Dada esta intersección, se puede reconocer que lo que hacemos para uno es exactamente lo que debemos hacer para el otro. Casi todos nuestros políticos pueden reconocer el problema de crecimiento poblacional, aunque muchos pueden tener dudas en cuanto al cambio climático. Podemos proponer entonces una política “sin lamentos<sup>1</sup>” para enfrentar los retos de cambio climático en la costa. Una política sin lamentos es una política de hacer lo que deberíamos hacer “bajo cualquier circunstancia”, haya cambio climático o no, entendamos con precisión o no los impactos. Son políticas que tendrán resultados positivos sea cual sea el resultado del cambio climático. Yo intentaré demostrar que si mejoramos nuestras ciudades para ser más vivibles, a la vez tendrán menos impactos al ambiente costero y serán más resilientes a peligros costeros actuales y potenciales como resultado del cambio climático. Si resultara que el cambio climático no fuera significativo, no habría razón de lamentar estas políticas de mejoramiento urbano, porque tendrían resultados positivos y necesarios de cualquier manera.

## 2.1 La Resiliencia Urbana

La resiliencia es un concepto bien establecido en la ecología, pero que está apenas emergiendo en el área de planificación urbana (Allenby y Fink, 2005). En la ecología, se dice que un sistema es resiliente si puede tolerar un disturbio sin colapsar a un estado completamente distinto, controlado por otro conjunto de procesos. Por lo menos para cuestiones costeras, el concepto tal vez tenga más validez que la “sustentabilidad” porque la capacidad adaptativa de reponerse después de un desastre es marca distintiva de ciudades costeras duraderas y resilientes (Godschalk, 2003; Levin y Lubshenko, 2008).

¿Porqué algunas ciudades son más resilientes que otras? Venecia, Italia, por ejemplo, está enfrentando lo que para muchas ciudades sería el peor de los casos en cuanto al ascenso del nivel del mar. Y sin embargo, esta gran ciudad no está colapsando a otro estado distinto. Más bien, parece estar aflorando en vez de colapsar. En parte, la resiliencia de esta ciudad se debe a una infraestructura duradera, incluyendo los edificios. Su ubicación estratégica también contribuye. Pero también tiene algo que ver con

---

<sup>1</sup> “no regrets policy” en inglés

conceptos más difíciles de definir como “sentido de pertenencia”<sup>2</sup> (Manzo y Perkins, 2004). La Venecia es tan especial que nadie está dispuesto a abandonarlo (Figura 2). Es un lugar que vale la pena defender, venga lo que venga.

Contrasta esta situación con la de la colonia Brownwood, en Houston, Texas, donde por procesos de subsidencia local se inundó esta colonia. No hubo gran movimiento para salvarla, en parte porque no había nada especial que salvar, a pesar de ser una colonia muy ordenada y placentera (Figura 3).

Godschalk (2003) explica que la resiliencia involucra un balance de opuestos: redundancia y eficiencia, diversidad e interdependencia, fuerza y flexibilidad, y planificación y adaptabilidad. Ciudades resilientes tienen un sistema vital de carreteras y otra infraestructura de apoyo diseñado para seguir funcionando cuando suba el agua o sople el viento. Se canaliza la urbanización a áreas que no tienen peligros definidos, como la inundación. Los edificios se construyen basados en códigos diseñados para amenazas específicas. Las áreas naturales se preservan como un amortiguamiento contra tormentas. Y los gobiernos y sus agencias tienen información actualizada que comparten a través de redes efectivas de comunicación. También existe un sistema de gobernanza que da máxima autonomía a gobiernos locales, pero con mandatos rigurosos a nivel federal o estatal que establecen normas mínimas para planes de manejo de los peligros costeros.

Jacob y Showalter (2007) sostienen que hay cuatro componentes claves para una comunidad costera resiliente: 1). Planificación apropiada (especialmente en cuanto a ubicación o sitio), 2). Un sistema intacto de infraestructura verde (bosques y humedales en particular), 3). Códigos de construcción adecuados, y 4). Una forma urbana compacta. Trataré todos estos aspectos aquí, menos los códigos de construcción.

## 2.2 Planificación, Ordenamiento, y Vulnerabilidad

Hay básicamente dos estrategias para protección costera. Una es estructural, a veces llamado “dura”, e incluye estructuras como diques, escolleras, malecones, diferentes muros y revestimientos, etcétera. La otra se puede decir “suave”, y se enfoca más en planificación. Hay necesidad de los dos enfoques, pero hay que tener cierto cuidado con estrategias duras o estructurales. El problema principal con estas estructuras es que generan más confianza de lo que tal vez ameritan, y por lo tanto alientan a personas a establecerse en zonas de peligros costeros donde tal vez no se hubieran arriesgado sin esa protección. La reciente experiencia con Katrina en Nueva Orleans demuestra este peligro. La Academia Nacional de Ingeniería de los EUA, en su reporte reciente sobre el sistema de protección de Nueva Orleans contra huracanes (Committee on New Orleans Regional Hurricane Protection Project, 2009), dijo esto en cuanto a los límites de estructuras de protección: *“los riesgos de inundación jamás se pueden eliminar por medio de estructuras protectoras, no importa que tan grandes o resistentes sean esas estructuras”*.

---

<sup>2</sup> “sense of place” en inglés

Los diques tienen su lugar, pero dado que no eliminan todo riesgo, es mejor restringir su uso a sitios importantes, limitados, e “inevitables”.

La preponderancia de opinión profesional académica (p.ej., Burby, 2006; Godschalk, 2003; Berke y Campanella, 2006; Costanza et al., 2006; Day et al., 2008), reconoce que reducir la exposición de poblaciones costeras a huracanes e inundaciones por medio de la práctica “suave” de planificación, es mucho más acertado que hacer inversiones cuantiosas en estructuras de protección, particularmente en vista del riesgo inherente que hay en estas estructuras. Más aún vinculando el desarrollo urbano con la dinámica natural del sistema ecológico.

Sabemos muy bien donde debemos y no debemos de construir en la costa. Desde tiempos inmemoriales, comunidades humanas han sabido reconocer y evitar tierras inundables en las cuencas fluviales bajas en conexión con el mar; y han construido en tierras altas. Pero a la vez, siempre ha habido tentación de ubicarnos donde no debemos, especialmente en las costas por sus atractivos comerciales, paisajísticos y acuáticos. Todas las ciudades costeras son, hasta cierto punto, lo que Pierce Lewis (2003) caracterizó como “*ciudades inevitables en sitios imposibles*.” Esta frase fue aplicada primero a Nueva Orleans, cuyo sitio de localización es, en realidad, muy inadecuado; por ejemplo, en muchos lugares es 2-3 metros por debajo el nivel del mar. Pero, en el proceso de colonización, era inconcebible que no hubiera una ciudad en la boca del río más grande de Norte América. Nueva Orleans está en un sitio imposible, pero tiene ejemplos instructivos en cuanto a planificación costera. La ciudad original, el hoy centro histórico o Barrio Francés (*French Quarter*) fue construida en la posición natural más alta de la zona, sobre el borde natural del Río Mississippi. La [Figura 4](#) demuestra la mancha urbana de la ciudad por el año 1863. No fue sino hasta la mitad del siglo XX, con la construcción de grandes diques, que empezó a haber urbanización en tierras por debajo el nivel del mar en Nueva Orleans. Estos diques, entonces, han constituido una forma de “riesgo moral” (Burby, 2006), que, al igual que el subsidio de los seguros de inundación que empezaron en el mismo tiempo, abrieron las puertas a la urbanización de zonas que nunca hubieran sido urbanizadas sin estas ayudas. Cincuenta años después estamos pagando las consecuencias.

El ordenamiento territorial es tal vez la práctica fundamental más importante para una planificación eficaz en la costa. El ordenamiento, en primer lugar, es hacer un inventario de la capacidad de carga del suelo, del agua, y de sus usos más adecuados, pero en particular de usos *no* indicados. El ordenamiento, fundamentalmente es practicar *planificación* del uso del suelo. Esto implica que autoridades competentes (municipalidades, condados, estados, federación, etc.) tienen autoridad para imponer, e imponen, ciertos límites al uso del suelo. Planificación suena bien en teoría, pero es otra cosa aplicada al mundo real, donde choca con derechos de propiedad, y otros intereses en conflicto, en particular cuando se trata de peligros que no son inminentes, como los huracanes que tienen cierta *probabilidad* de ocurrencia cada año.

Para el caso de los estados del Golfo de los Estados Unidos, Jacob y Showalter (2007) demuestran que hay una variedad bastante significativa en cuanto a autoridad de

planificación, y el uso de esa autoridad, entre estos estados. Florida es el estado con más infraestructura de planificación de los 5 estados americanos del Golfo. Lo interesante y tal vez más instructivo del caso de Florida es que tiene un mandato fuerte a nivel estatal que requiere que las municipalidades tengan planes integrales<sup>3</sup> para su crecimiento, planes que por ley tienen que incorporar elementos de planificación para zonas costeras peligrosas. Pero esta ley da bastante flexibilidad y autonomía a las municipalidades para desarrollar estos planes. Se considera que esta combinación de mandato riguroso a nivel estatal o federal, y máxima autonomía local, es lo que mayor éxito puede tener para planificación efectiva en cuanto a peligros costeros (Deyle et al., 1998; Brody et al., 2003; Norton, 2005). Muchas de las municipalidades en los estados americanos del Golfo tienen toda la autoridad necesaria para restringir ciertos usos del suelo, como por ejemplo urbanización en zonas inundables, pero parece que es necesario mayor severidad de arriba para que ejerzan esa autoridad, y lo ejercen mejor cuando tienen flexibilidad local.

Es interesante observar que, a pesar de tener una relativamente buena infraestructura de planificación, en la Florida todavía se ven bastantes ejemplos de urbanización reciente en zonas de peligro, lo cual significa que todavía hay pocos lugares donde en realidad se ejerce una autoridad rigurosa en cuanto a planificación. En una democracia siempre va a ser difícil ejercer una autoridad de planificación rigurosamente científica, que se enfoca en peligros sin tomar en cuenta derechos de propiedad. Lo cierto es que cada tormenta grande, como Katrina, Rita o Ike, es un “espacio único de aprendizaje”. O como han dicho otros, una crisis es una cosa terrible e importante como para desperdiciarla. En la costa de Texas, después de Ike, hemos visto mucho más discusión que antes sobre la necesidad de planificar el uso de la tierra.

Desafortunadamente mucha de esa discusión se centra en estructuras duras, en particular el comentado “dique de Ike” (Ike Dike), un dique de 85-100 km propuesto para proteger el sistema de la Bahía de Galveston. Igualmente en Nueva Orleans, se está contemplando repoblar las áreas más bajas y peligrosas de esta área. Al parecer, el espacio de aprendizaje es muy limitado, aun después de tormentas catastróficas. Pero con el cambio climático hay un nuevo imperativo de considerar cambios en nuestros procesos de urbanización en la costa. Es posible que la consideración de los efectos de cambio climático junto con los efectos de crecimiento poblacional en áreas de peligro costero sea suficiente para animar a los servidores públicos más conscientes a tomar los primeros pasos para una planificación más racional en las costas del Golfo de México. Aunque no se ha visto mucho cambio en la planificación después de Katrina y otras tormentas, sí ha mejorado el establecimiento de códigos de construcción adecuados para zonas de peligro costero y en su cumplimiento y vigilancia. Después de Katrina, hubo un cambio bastante drástico y mejor en cuanto a la adopción de códigos de construcción modernizados en los condados costeros de Louisiana, Mississippi, y Alabama (Jacob y Showalter, 2007; Day et al. 2007). Así que esta crisis ambiental no fue totalmente desperdiciada.

Para poder planificar para el cambio climático (o crecimiento y urbanización que igualmente expone a más gentes a peligros costeros), hay que empezar por entender bien la naturaleza de los peligros costeros en cada área, igual que quienes, y que, está o estará

---

<sup>3</sup> “Comprehensive plan” en inglés

expuestos a estos peligros. Esto es la esencia del concepto de la vulnerabilidad: sencillamente saber dónde va a haber problemas, y quién o qué está en riesgo en esas áreas, y qué tan lisos están para sobrellevar los peligros costeros (Deyle et al., 1998).

Hay una variedad de términos que se usan en la literatura de manejo de peligros costeros. Nuestro trato aquí es tan general que no necesitamos diferenciar los términos “riesgo”, “vulnerabilidad”, “sensitividad”, “exposición”, etcétera. La vulnerabilidad como término capta bien nuestro trato general del riesgo a peligros costeros.

Siguiendo a Deyle et al. (1998), una evaluación de la vulnerabilidad empieza con un inventario riguroso de los peligros. Por ejemplo, ¿dónde y con qué frecuencia se inunda un lugar? ¿Qué tan tierra-dentro y a qué elevación pueden llegar las mareas de tormentas? En los Estados Unidos, casi todas las comunidades tienen acceso a mapas de inundación con riesgos de 100 y 500 años delineados, aunque falta suficiente detalle en muchos lugares. Frente a la severidad del cambio climático, esto debe actualizarse.

El siguiente paso es de hacer un inventario de lo que está ubicado en estas zonas de peligro en cuanto a personas, edificios, fraccionamientos, plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas industriales, obras de infraestructura, etcétera. Finalmente, se necesita hacer un análisis del estado de la infraestructura y de las personas o comunidades en estas zonas. Por ejemplo, ¿cuáles edificios son más resistentes a las mareas de las tormentas u otras inundaciones? ¿Qué tan protegidas están las plantas químicas, o de tratamiento de aguas, a daños de tormentas costeras? ¿Cuáles poblaciones costeras están más expuestas en términos de daños potenciales o de su capacidad para evacuarse? Una evaluación rigurosa de la vulnerabilidad involucra muchos otros detalles (ver p. ej., Mileti, 1999; Smith, 2004).

Lo importante para esta discusión es entender la forma en qué políticas, que facilitan la adaptación al cambio climático se pueden integrar en la estructura normativa y política de la reducción de peligros costeros. Aquí se puede introducir el concepto de “*francobordo*” para discutir el margen de seguridad que debemos incorporar a nuestros planes para acomodar al cambio climático. Francobordo es un término náutico que describe la altura o volumen de un barco por encima del nivel del agua. El término se usa en la ciencia de la mitigación de peligros para referirse a la elevación de un piso inferior de una casa sobre la elevación de la inundación “de base” (por ejemplo, la inundación con 100 años de frecuencia de retorno). Esa elevación adicional, o francobordo, sobre el nivel “jurisdiccional” de la inundación añade un margen de seguridad a la estructura, dada la incertidumbre de donde exactamente está ese nivel “oficial” de inundación, y la posibilidad muy real de que puedan haber inundaciones significativamente peores.

El cambio climático trae cambios que no podemos precisar con mucha seguridad en cuanto a riesgos costeros, pero la prudencia, y la misma ciencia, nos hace sospechar que estos cambios podrían resultar en más extremos en cuanto al clima, con tormentas posiblemente más severas y más frecuentes. ¿Qué tanto francobordo debemos añadir a nuestros cálculos para acomodar a este nuevo riesgo? ¿Diez por ciento? ¿Veinte por ciento? Quizá no hay una respuesta automática a esta pregunta. El hecho sencillo y

fundamental es que si simplemente empezáramos a planificar para el crecimiento urbano que tenemos actualmente, sin tomar en cuenta el cambio climático, estaríamos haciendo mucho para enfrentar los riesgos que magnificará el cambio climático. Al hacer ese primer paso, el siguiente es incorporar un francobordo para mayor seguridad y resiliencia.

### 3. LA IMPORTANCIA DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE

La infraestructura verde, en contraste con la infraestructura gris de carreteras, alcantarillado, pasos sobre nivel, consiste de bosques, humedales, praderas, etcétera (Benedict y McMahon, 2006). Las dos infraestructuras son igualmente necesarias para poder vivir en la costa, aunque a la larga la infraestructura verde es absolutamente indispensable, por los servicios críticos que nos provee de integridad ecológica, paisaje, agua limpia, aire puro, etcétera. La ciudad resiliente está rodeada de una infraestructura verde integrada y ecológicamente intacta, áreas verdes que no sólo proveen servicios esenciales para la vida, sino que también áreas que sirven de refugio para vida silvestre igual que para refugio para humanos que necesitan contacto ocasional con la naturaleza.

En cuanto a cambio climático en la costa, el hábitat más amenazado son los humedales costeros, las marismas, y las llanuras de inundación deltaicas (Day et al., 2008; Yáñez-Arancibia y Day, 2010). Al subir el nivel del mar, los humedales costeros desaparecen si no puede migrarse tierra adentro. Aparte de accidentes topográficos, como por ejemplo costas acantiladas o escarpadas, o peñas, la urbanización puede ser el factor más crítico en la desaparición de estos humedales, al impedir su migración tierra adentro con muros de retención y otras estructuras. Donde hay complejos extensivos de humedales, su desaparición puede tener efectos bastante dañinos, ya que se pierde un gran amortiguador que puede disminuir los efectos de las tormentas. Y con pocos centímetros de subida en el nivel del mar, se pueden perder áreas muy extensivas de humedales si no tienen lugar para migrar tierra adentro. Además del amortiguador que se pierde, también habría grandes cambios en las pesquerías cerca de estos humedales al perderlos. Más de 90 por ciento de todas las especies de peces comerciales o recreacional dependen en alguna parte de su vida de estos humedales costeros (NOAA, National Marine Fishery Services). La expansión urbana desordenada que draga y rellena humedales costeros, puede tener un impacto económico muy significativo además del amortiguador que se pierde, un impacto que será exacerbado fuertemente por el cambio climático y la crisis energética (Day et al., 2005).

Es difícil desarrollar una política coherente que preserve las tierras inundables donde los humedales van a estar en el futuro, pero no lo están hoy. Apenas tenemos voluntad política para preservar los humedales que existen hoy. Jacob y Showalter (2008) recomiendan adaptar el “servidumbre-rodante” que tiene el estado de Texas, para proteger sus playas en el Golfo de México, que por ley tienen que estar accesibles al público. Las islas de barreras, donde se presenta la mayor parte de estas playas, son ambientes dinámicos y movedizos. El estado de Texas mantiene una servidumbre-rodante para el acceso del público entre la línea de la marea alta y la línea de vegetación

permanente. Al moverse estas líneas, como frecuentemente ocurre después de un huracán, la servidumbre-rodante se mueve también, y si una estructura resulta entre la línea de vegetación y la marea alta después de una tormenta, tiene que ser removida. Jacob y Showalter (2008), siguiendo a Titus (1998), argumentan que se podría establecer una servidumbre-rodante tierra adentro de las marismas que se podrían perder con una subida en el nivel del mar. Se podría prohibir construcciones que no estuvieran construidas sobre pilotes, y se podría comprar la servidumbre-rodante con un descuento fuerte ya que no se ejercería hasta un futuro indefinido. Es sin duda un sistema técnicamente factible, pero hay serias dudas en cuanto a la voluntad política para implementarlo.

Lo anterior demuestra que no podemos, por lo menos a corto plazo, depender de medidas coyunturales regulatorias para proteger las tierras inundables. Podemos tener más esperanza, tal vez, en cambiar el carácter de nuestras ciudades, porque ya hay un movimiento fuerte para construir ciudades más vivibles, y las ciudades vivibles, en primer lugar son peatonales y por lo tanto mucho más compactas que las ciudades diseñadas alrededor del automóvil.

#### **4. LA CIUDAD COMPACTA O PEATONAL COMO MODELO DE SUSTENTABILIDAD COSTERA**

El automóvil privado se ha emergido como el símbolo de status más importante en el mundo. Y hay pocas cosas que han transformado tanto el ambiente –urbano o rural – como el automóvil. La planificación y el diseño urbano moderno se enfocan casi exclusivamente en facilitar el movimiento de automóviles privados (Duany et al., 2000). Esta planificación moderna apenas reconoce la existencia de peatones. El peatón parece ser un estorbo para la libre circulación de los automóviles. En muchas urbanizaciones modernas a veces ni cruces peatonales se proveen. En ciudades como las de México, donde mucha gente no tiene automóvil y tienen que atravesar los nuevos pasos a desnivel, parece que impera la ley de sálvese quien pueda. Los peatones se tienen que acomodar y padecer el ambiente del automóvil, en evidente desmedro de la calidad de vida urbana.

El resultado ha sido una expansión extraordinaria que ha consumido hábitat, ha contaminado aguas, y ha resultado en una calidad disminuida de vida para muchas personas (Alberti, 2005). En Europa y los Estados Unidos ha emergido en los últimos años alternativas a esta forma de urbanización que irónicamente se enfocan en el urbanismo peatonal de hace 80 a 100 años. Esta forma antigua/nueva se denomina el Nuevo Urbanismo o Desarrollo Inteligente<sup>4</sup> (Ascher, 2004), y está surgiendo como respuesta a una demanda creciente para un urbanismo auténtico que maximiza la

---

<sup>4</sup> “Smart Growth” en inglés

interacción social y minimiza los impactos negativos al ambiente. El urbanismo peatonal tiene como característica imprescindible un patrón mucho más compacto que el urbanismo centrado en el automóvil particular, precisamente porque se hace a una escala humana que pone en primer lugar la “caminabilidad”<sup>5</sup>.

Idealmente, una urbanización bien diseñada tendría la mayor parte de los servicios cotidianos a una distancia no mucho mayor que un medio kilómetro de las áreas residenciales, con la mayor parte de empleos y otros servicios más distantes en áreas servidas por tránsito público. La caminabilidad resulta en una serie de beneficios ambientales y sociales: menos uso de combustible, menos consumo de hábitat natural y de tierra agrícola, y más interacción social, entre otros (Norman et al., 2006; Jacob y López, 2009; Richards, 2006; Bettencourt et al., 2007).

El auge del automóvil hizo posible por primera vez la separación de usos del suelo, y la zonificación urbana, que es la marca distintiva de planificación en la edad del automóvil, es la extensión lógica de este patrón. En urbanizaciones modernas, las zonas residenciales están completamente separadas de las zonas comerciales e industriales. Las urbanizaciones residenciales que siguen este patrón usualmente no tienen suficiente densidad para mantener a un sistema de transporte público, y la única forma de moverse de un lado a otro es por medio del automóvil, como es en caso en la mayor parte de Houston. El nuevo urbanismo peatonal, al contrario, exige la mezcla de usos, no su separación<sup>6</sup>.

Una urbanización caminable es, por lo tanto, mucho más compacta o densa que la ciudad del automóvil. Esta densidad urbana es lo que produce los resultados positivos ambientales como por ejemplo el menor consumo de tierra, etcétera. También tiene beneficios positivos en cuanto a salud pública. El desparrame urbano, con sus oportunidades muy reducidas para caminar, se señala como uno de los factores principales en la epidemia de obesidad que se está observando en los Estados Unidos (Ewing et al., 2003). En cuanto al cambio climático, la ciudad compacta o peatonal tiene emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita mucho menores que las que surgen de ciudades dispersas, porque el consumo per cápita de combustible es mucho menos (Figura 5). Pero el urbanismo compacto, aún en los Estado Unidos, todavía no prevalece en las urbanizaciones recientes. En Europa, donde ha predominado el urbanismo compacto por mucho tiempo, desafortunadamente se está empezando a ver más y más urbanismo disperso diseñado alrededor del automóvil. Y en México y otras partes de Latinoamérica, la mayor parte del urbanismo existente es peatonal, pero casi todo el urbanismo nuevo de los últimos 20-30 años ha dado primer lugar al automóvil privado, transformando a casi todas la ciudades de México en un laberinto de pasos a desnivel, viaductos, y puentes, sobrepuesto a la antigua rejilla o cuadrícula urbana peatonal preexistente. Esta nueva infraestructura dedicada al automóvil representa una diversión cuantiosa de fondos públicos que benefician a relativamente pocos en el nombre de la modernización.

---

<sup>5</sup> “Walkability” en inglés

<sup>6</sup> Lo cual no implica que no haya algunos uso industriales que deben de estar separados de residencias, como la industria pesada, por ejemplo.

El caso de México no es muy diferente que otros países del mundo en desarrollo que luchan por balancear la “modernización” con un desarrollo sustentable y equitativo. Es difícil porque hasta el más humilde oficio desea sobre todo tener su propio automóvil, el símbolo de máxima libertad personal, y por lo tanto son pocos los que critican la inversión pública en un sistema que favorece el automóvil privado, aun cuando tienen que aguantar un sistema de transporte público cada vez más deteriorado. El viaducto o paso a desnivel para muchos es tal vez la encarnación de sus sueños para un futuro mejor. Quizás Marx nos diría hoy que el automóvil es el nuevo opio de las masas. Las estadísticas ilustran una historia muy clara. La población de México creció 48% desde 1980 a 2003, desde 69 millones a 102 millones de personas. El número de automóviles en México en el mismo tiempo creció 123%, desde 60 carros por mil personas a 133 (World Research Institute, 2009). Interesante ha sido que la tasa de crecimiento poblacional disminuyó de 2.3% a 0.8% por año en este período, pero la tasa de crecimiento de automóviles per cápita ha quedado mas o menos igual (~3-4% por año), inclusive alcanzando cifras mayores que 10% anual en los primeros años de esta década. México tendrá que preguntarse si alcanzar los niveles de incidencia de automóviles per cápita como el de los Estados Unidos (~500 por mil personas) o Europa (~300 por mil) es factible o aún deseable, especialmente en vista del encarecimiento del petróleo que seguramente seguirá la cénit de producción de petróleo prevista para los próximos 20 años (e. g., Cavallo, 2002; Day et al., 2009). La política miope de enfocarse en transporte privado, a expensas de inversión en una infraestructura moderna y robusta de transporte público, exacerbará grandemente los impactos del encarecimiento del petróleo en pocos años, y su efecto sinérgico con los impactos del cambio climático.

En cuanto al cambio climático, queda claro que la ciudad dispersa empeorará la situación (por ejemplo por mayores emisiones de CO<sub>2</sub> a causa de más kilómetros manejados en automóviles particulares que en las ciudades compactas). Hay mucho que se ha escrito sobre las formas en que las ciudades bien diseñadas y compactas pueden disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> (ver p. ej., Ewing et al., 2007), y queda claro que esto es un camino que tenemos que tomar. El problema es que son relativamente pocos los tomadores de decisiones que van a responder a argumentos para reducir el CO<sub>2</sub>, especialmente a nivel local o municipal.

Argumentos para la resiliencia a tormentas costeras, por otro lado, tal vez adquieren más adherentes, especialmente cuando las prácticas que confieren resiliencia son las mismas que pueden conferir una calidad más alta de vida, si se aplican correctamente. Y afortunadamente para nosotros, estas mismas prácticas, que se centran en hacer ciudades más compactas y densas, son las mismas que minimizan las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub>. Antes de examinar las formas en que la densidad urbana confiere resiliencia, es importante recalcar algunos puntos sobre la densidad, especialmente en cuanto a percepciones que mayor densidad equivale a menor calidad de vida.

El argumento que he planteado aquí es que, no se puede -en realidad- tener una urbanización vivible y vibrante sin un mínimo grado de proximidad de servicios y residencias. Tan sólo con comparar una ciudad “pintoresca” Mexicana, como por ejemplo

Guanajuato, Morelia, o Coatepec, con una ciudad sub-urbana como la mayor parte de Houston, que aún con todas sus conveniencias y facilidad de transportarse en automóvil, no tiene ni lo atractivo de esas ciudades Mexicanas, ni la oportunidad de interacción social que existe entre sus habitantes.

Ahora bien, algunos argumentarían que la densidad tiene sus límites. Y podrían señalar a urbanizaciones como Ciudad Nezahualcóyotl como un ejemplo del hacinamiento asociado con la alta densidad. Nezahualcóyotl tiene una densidad aproximada de 17,000 a 20,000 personas por km<sup>2</sup> (Estado de México, 2009), y representa para muchos un ejemplo de invivibilidad. Pero París, en sus zonas más atractivas, como por ejemplo Le Marais, tiene densidades superiores a 30,000 personas por km<sup>2</sup>. Las partes más exclusivas de Manhattan NY tienen densidades mínimas de más de 40,000 personas por km<sup>2</sup>. Obviamente, no hay una correlación directa entre densidad y habitabilidad. Lo que es más, ni París ni Manhattan tendrían sus atractivos sin la densidad que tienen. Y la Cd. Nezahualcóyotl no necesariamente se haría más vivible al hacerse menos denso. El detalle está en el diseño.

Lo importante aquí, en cuanto a la adaptación al cambio climático, y aún en cuanto a su mitigación, es entender la intersección entre la densidad y la vivibilidad (que obviamente depende del diseño de la densidad) y la resiliencia. Es tal vez más fácil abogar por ciudades vivibles y vibrantes, y resilientes, que por ciudades con menos impactos ambientales, pero al final llegamos al mismo punto. Y la proximidad o densidad es lo que trae resultados positivos en ambos ámbitos.

Jacob y Showalter (2007) señalan seis formas potenciales en que mayor proximidad o densidad confiere resiliencia a ciudades costeras del Golfo de México. Estos ejemplos en muchos casos son más aplicables al caso de los Estados Unidos, pero ya que México está siguiendo ese mismo camino, vale la pena citarlos aquí:

**1. *Menos área que proteger.*** Una ciudad de 500,000 personas asentada con una densidad de 1,600 personas por km<sup>2</sup> (la densidad de los suburbios de Houston) ocuparía unos 300 km<sup>2</sup>. Pero la misma población con una densidad de 6,000 personas por km<sup>2</sup> (la densidad del Barrio Francés de Nueva Orleans) ocuparía solamente unos 80 km<sup>2</sup>. Si esta ciudad hipotética estuviera localizada en una “zona imposible” costera, donde se requiriera protección con diques, se tendría que construir solamente 35 km de diques en el caso más denso, versus 70 en el caso disperso. Esto representaría un ahorro multimillonario, o la oportunidad de hacer diques mucho mejores.

**2. *Más opciones para ubicación.*** Ocupando menos espacio, una urbanización compacta obviamente tiene más opciones en donde localizarse. En Nueva Orleans, por ejemplo, aunque en general toda la zona es una zona de peligros costeros, hay sitios relativamente elevados, y toda la ciudad de Nueva Orleans de 400,000 personas podría ocupar las partes altas con una densidad no mucho mayor que la del Barrio Francés (Figura 6).

**3. Edificios más duraderos.** La urbanización compacta facilita la construcción de edificios más duraderos en dos formas. En ciudades netamente dependiente en los automóviles particulares, es bastante común que las familias gastan lo mismo en transportación que en vivienda, lo cual es exactamente el caso de Houston. Donde hay sistemas de transporte público, que solamente son factibles con cierta densidad, las familias podrían dedicar más recursos a la vivienda y, por lo tanto, tal vez se podría requerir estándares muy altos en contra de riesgos costeros donde existiera estos sistemas de transporte. Y en segundo lugar, donde los edificios comparten paredes, es más barato hacer construcciones de mampostería, en vez de las casas de madera y tabla roca que caracterizan casi todas las urbanizaciones suburbanas de los Estados Unidos, construcciones que no son muy resistentes a huracanes e inundaciones. Compraré por ejemplo la situación de Villahermosa con Nueva Orleáns. Al parecer, no ha habido mucha pérdida de estructuras en Villahermosa, que sufrió inundaciones similares a las de Nueva Orleáns, donde si se han perdido muchas estructuras. Las casas compactas de Villahermosa comparten paredes y casi todas son hechas de mampostería.

**4. Proximidad de refugio.** El uso mixto del suelo es una marca distintiva del Nuevo Urbanismo o Desarrollo Inteligente. En urbanizaciones zonificadas es común tener áreas vastas de casas individuales unifamiliares, sin zonas comerciales, como es el caso del famoso barrio 9º de Nueva Orleáns. Esta área extensa se inundó con Katrina y no había donde buscar refugio ([Figura 7](#)). En esta área muchos se murieron en sus desvanes. Si hubiera habido uso mixto, pudiera haber habido zonas comerciales mucho más cercanas, que con sus construcciones más duraderas y con edificios más altos hubieron servido de refugio para muchos Galveston, Texas, es un buen ejemplo del uso mixto del viejo/nuevo urbanismo. La peor catástrofe jamás en la historia de los EUA ocurrió con el Gran Huracán de 1900. Muchos murieron (más de 6000 personas), pero muchos más pudieron tomar refugio en la zona hoy llamada El *Strand*, una zona comercial de uso mixtos con edificios bastante duraderos (casi todos resistieron la tormenta y están de pie hasta la fecha). La proximidad de zonas comerciales es posible solamente en áreas de densidad relativamente alta.

**5. Mayor cohesión social.** Un patrón urbano que facilita y promueve más el caminar a pie también promueve más interacción social que las urbanizaciones dispersas. Cuando uno va a todos lados en automóvil, es la forma que uno entra y sale de su casa, sin mucha oportunidad de interactuar con sus vecinos. Al caminar, hay muchas oportunidades de interacción. Mayor interacción social debería de resultar en mayor cohesión social. Por ejemplo, redes de asistencia mutua tienen mayor probabilidad de existir donde hay interacción social. Es mucho más probable que las personas que viven en barrios caminables van a saber más de los detalles de las vidas de sus vecinos, como por ejemplo quien va a necesitar asistencia en evacuarse o llegar a un albergue de emergencia. Se ha hecho poca investigación científica en esa área, pero hace falta.

**6. Evacuación y transporte público.** Las ciudades compactas por lo general tienen menos automóviles particulares por cápita que las ciudades dispersas. El transporte público facilita el transporte de mayores cantidades de gente sobre distancias equivalentes que los automóviles particulares. No se han hecho investigaciones para determinar si se podrían evacuar a masas de personas más eficientemente con tránsito público que con automóviles particulares, pero a primera inspección parece obvio que la respuesta sería afirmativa. Todo depende del sistema de tránsito -el número disponible de trenes y/o buses-, y que tan lejos de las zonas de riesgo se extienden las líneas de tránsito, especialmente en el caso de trenes.

## 5. CONCLUSIONES

El cambio climático promete disturbios significativos para las comunidades y ciudades que rodean al Golfo de México. Y esto es igualmente válido en los Estados Unidos y en México. Es muy probable que los riesgos costeros que ya enfrentamos sólo se pondrán peores en el futuro. En particular, podemos esperar cambios en los patrones de los huracanes y las tormentas tropicales -que serán más frecuentes y más intensos-, con la posibilidad de inundaciones más frecuentes y más severas.

Estamos entrando en una nueva era de la humanidad, donde ya la mayor parte de nosotros vivimos en ciudades. Las grandes conurbaciones de nuestras costas han consumido áreas extensas de hábitat, han modificado el paisaje costero, han contaminado las aguas costeras, y han expuesto innecesariamente a millones de personas a riesgos costeros por falta de planificación racional.

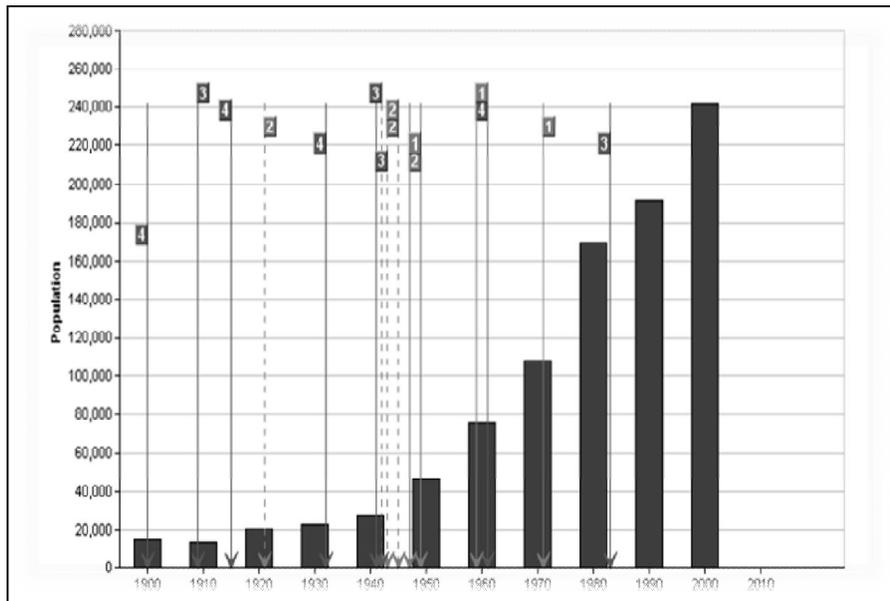
Tenemos que adaptarnos por fuerza a los cambios que trae el cambio climático, pero podríamos empezar con un reconocimiento de los riesgos costeros actuales, y de una vulnerabilidad creciente asociada con una expansión urbana, que al parecer no tiene límites. Nuestro primer paso es adaptarnos a la situación actual. Si no podemos hacer eso, de nada vale hablar de adaptación o mitigación a peligros costeros futuros que pueden ser asociados con el cambio climático. Y la primera tarea es adoptar una cultura de planificación ambiental estratégica que no existe en la mayor parte de nuestras comunidades urbanas alrededor del Golfo.

Si empezamos a enfrentar los peligros costeros actuales que tenemos, planificando a nuestras urbanizaciones para evitar zonas de inundación, por ejemplo, lo que tenemos que hacer para enfrentar el cambio climático es añadir un elemento de francobordo a nuestros cálculos, tal vez extendiendo un poco más arriba en el paisaje esa zona de inundación que queremos evitar.

Más que todo, lo que tenemos que planificar son ciudades resilientes. Nuestras ciudades costeras son inherentemente vulnerables a los riesgos costeros (p. ej. Tampa, Panamá City, Pensacola, Mobile, Gulf Port, Nueva Orleans, Galveston-Houston, Corpus Christi, en los Estados Unidos; o Ciudad del Carmen, Villahermosa, Coatzacoalcos, Tlacotalpan, Alvarado, Veracruz-Boca del Río, Tuxpan-Panuco, en México). Esta situación no va a cambiar, venga cambio climático o no. El hecho es que sí sabemos

cómo construir una ciudad resiliente en la costa, y lo hemos hecho por siglos. Ciudades como La Venecia, en Italia, que a pesar de sufrir reveses como un ascenso efectivo en el nivel del mar y elevada subsidencia, sigue no sólo de pie, sino que sigue en todo su apogeo. Ciudades como Galveston, que definitivamente está en un lugar imposible, pero que se reconstruyó en una mejor ciudad por el sentimiento cívico fuerte –de pertenencia– que unía a sus habitantes.

Tenemos que planificar reconociendo y respetando el terreno costero donde vivimos. Tenemos que proteger la infraestructura verde que nos sostiene y que nos protege. Y tenemos que construir la ciudad resiliente reconociendo el hábitat humano que en primer lugar exige un ambiente caminable. Al construir una ciudad caminable o peatonal, reduciremos nuestras contribuciones al cambio climático, y mejoraremos nuestra resiliencia para riesgos costeros actuales o potenciales. Al final, si construimos sobre nuestros valores más profundos, valores que reconocen el valor primordial de nuestros ambientes naturales costeros, y valores que resaltan la interacción humana en comunidades auténticas, habremos hecho no sólo un gran paso hacia la adaptación para el cambio climático, sino que también un paso hacia rescatar un urbanismo auténtico que permite máxima interacción con la naturaleza y con nuestros vecinos. Eso sería un resultado que no se lamentaría venga cambio climático o no.



**Figura 1. Crecimiento de la población en el condado costero de Brazoria, en Texas. Las barras sólidas representan la población en cada década. La astas representan arribo de huracán en este mismo condado, con la categoría indicada. Periodo 1990-2000.**



**Figura 2.** Una “calle” en La Venecia. La subsidencia en esta ciudad ha resultado en una subida efectiva en el nivel del mar, inundando muchas de sus calles. Sin embargo, no se está abandonando a esta ciudad. Su forma urbana compacta ha ayudado a que sus residentes tengan un fuerte “sentido de pertenencia” a esta ciudad.



**Figura 3.** La permanentemente inundada colonia Brownwood, cerca de Houston, TX. (Fuente: Houston Wet Scrapbook: <http://www.rice.edu/~lda/wet/expo/pairs/evacuate.htm>). Una colonia con todos los atractivos de un fraccionamiento moderno norteamericano, pero sin suficiente “sentido de pertenencia” para defenderlo, cuando la subsidencia la inundó, como se ha hecho en la Venecia.

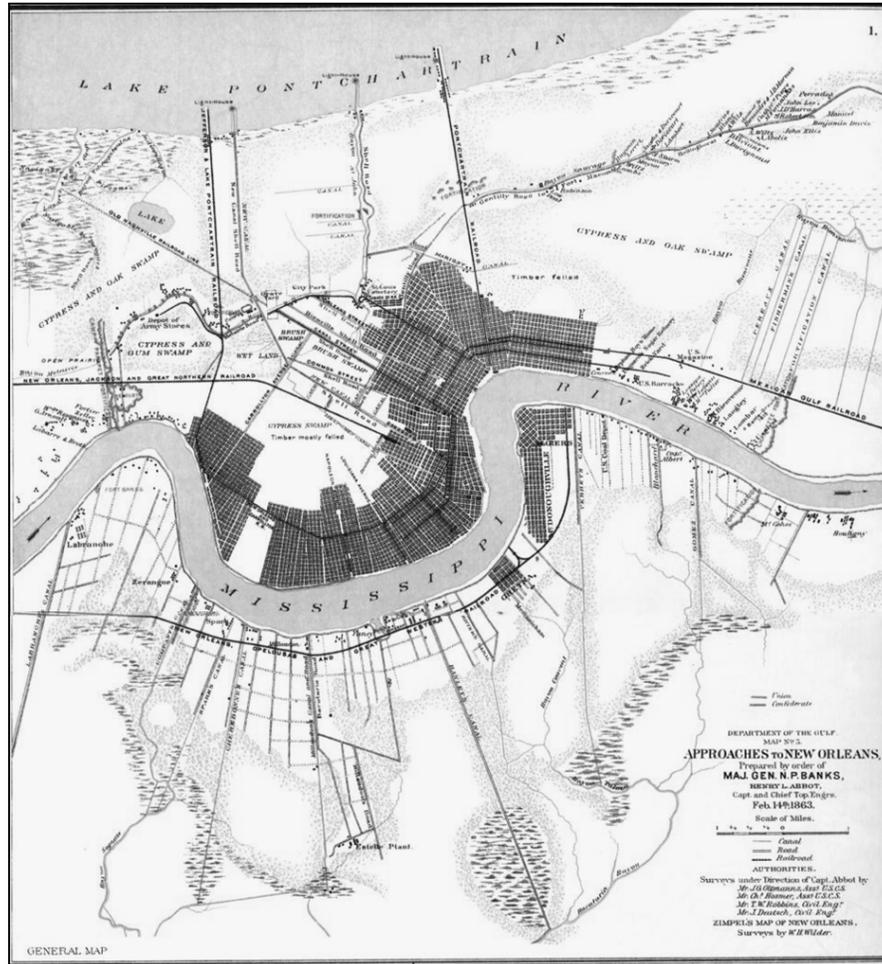
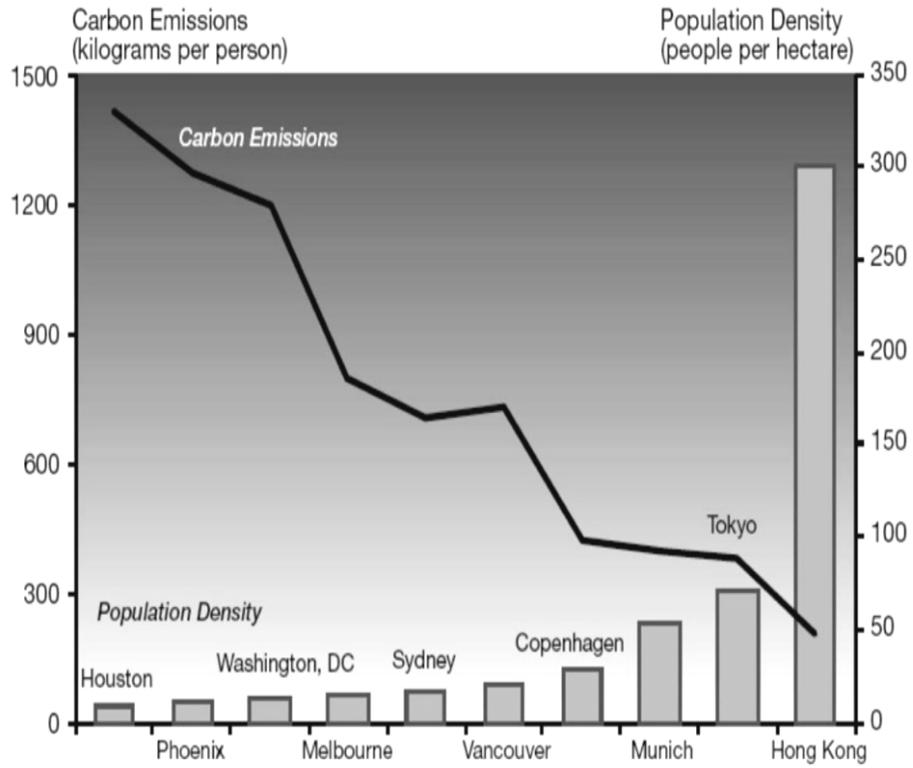


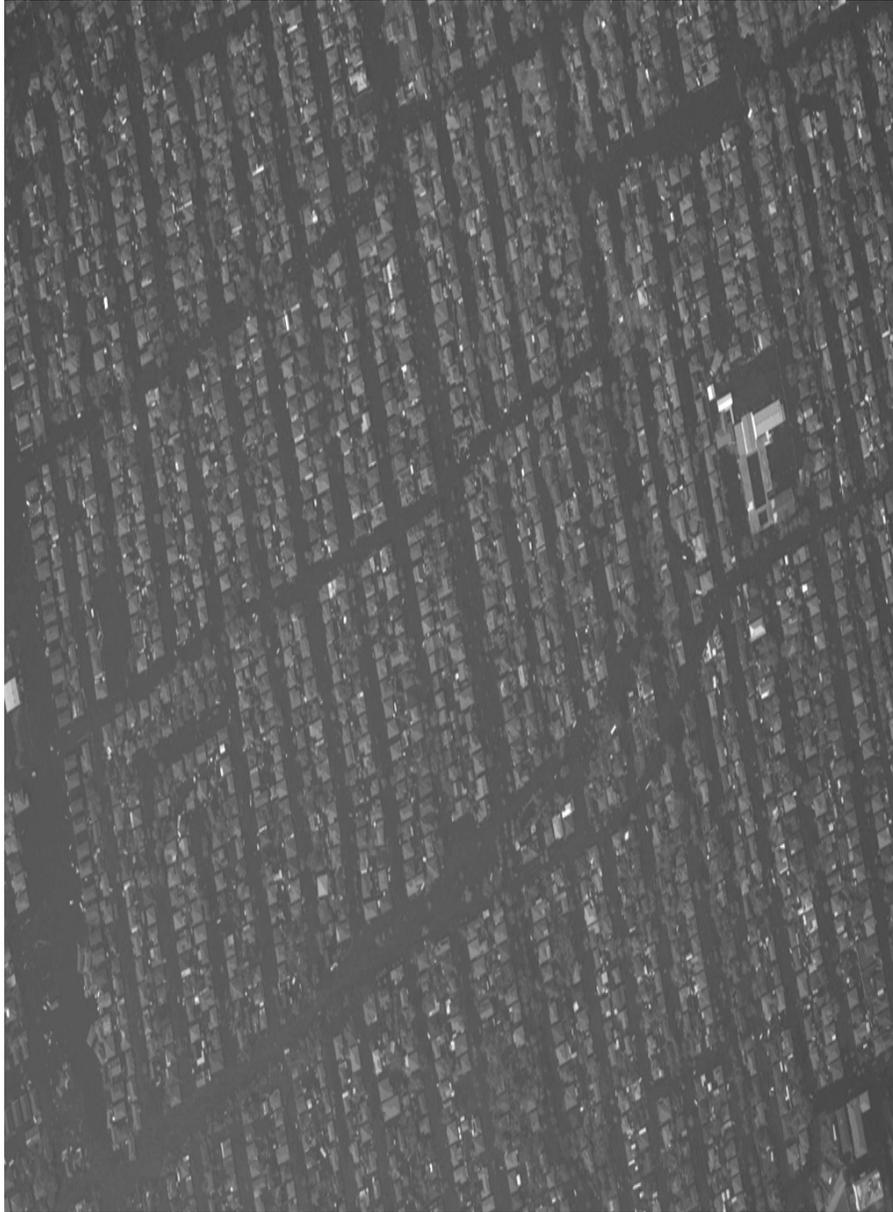
Figura 4. La mancha urbana de Nueva Orleans 1863. La ciudad está restringida en general a las áreas altas de esta zona naturalmente peligrosa.  
Fuente: [www.rootsweb.com/~usgenweb/maps/louisiana/](http://www.rootsweb.com/~usgenweb/maps/louisiana/)



**Figura 5** Densidad poblacional en varias ciudades mundiales versus emisiones de carbón generadas por medio del transporte, 1990. Fuente: J. Kenworthy et al., *An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities*. University Press of Colorado, 1999.



**Figura 6.** Área inundada de Nueva Orleans durante Katrina, 3 de Septiembre, 2005 (Fuente: sitio web NOAA Hurricane Katrina Flooding and Spill Maps [<http://www.katrina.noaa.gov/maps.html>], 9 de Julio 2009). La ciudad de Nueva Orleans ocupa el área al norte del Río Mississippi, dentro de las líneas negras. Toda la zona no incluida dentro de las líneas blancas fue sujeta a inundación severa. Las líneas blancas representan una zona no- o poco- inundada durante Katrina. Los 34 kilómetros cuadrados de esta zona podrían acomodar a la población entera pre-Katrina de Nueva Orleans (~450,000 personas) a una densidad de ~5,000 personas por km<sup>2</sup>, menos que la densidad del muy vivible French Quarter (Barrio Francés), con ~6,000 personas por km<sup>2</sup>. La densidad de la mayor parte de Nueva Orleans es ~1,200 personas por km<sup>2</sup>. Mayor densidad podría hacer de Nueva Orleans una ciudad más vivible y mucho más resiliente.



**Figura 7. Fotografía aérea de una colonia residencial en Nueva Orleans inmediatamente después del huracán Katrina (30 Agosto, 2005), con todas las calles inundadas. Nótese la ausencia de zonas comerciales en esta zona vasta. No existía refugio de la inundación cerca de estas casas. Fuente (NOAA).**

## 6. REFERENCIAS

Alberti, M., 2005. The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review* 28 (2), 168-192

Allenby, B., y J. Fink, 2005. Toward inherently secure and resilient cities. *Science*. 309:1034-1036.

Ascher, F., 2004. Los nuevos principios del urbanismo: El fin de las ciudades no está a la orden del día. Alianza Editorial, Barcelona. 96 pp.

Benedict, M.A., y E. T. McMahon, 2006. Green infrastructure: Linking landscapes and communities. Island Press, Washington, D.C.

Bettencourt, L. M. A., J. Lobo, D. Helbing, C. Kühnert y G. B. West, 2007. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (17): 7301-7306.

Cavallo, A. J., 2002. Predicting the peak in world oil production. *Natural Resources Research*, 11(2):187-195.

Committee on New Orleans Regional Hurricane Protection Projects, 2009. The New Orleans Hurricane Protection System. National Academy of Engineering and National Research Council. The National Academies Press. Washington, D.C.

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.

Crossett, K. M., T.J. Culliton. P. C. Wiley y T. R. Goodspeed, 2005. Population trends along the coastal United States. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Ocean Service. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C.

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.

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., C. A. Hall, A. Yáñez-Arancibia, D. Pimentel, C. Ibáñez Marti y W. J. Mitsch, 2009. Ecology in time of scarcity. *BioScience*, 59 (94): 321-331.

Duany, A., E. Plater-Zybeck y J. Speck, 2000. *Suburban nation: The rise of sprawl and the decline of the American dream*. North Point Press. 256 pp.

Estado de México (website 1 de Julio de 2009). Indicadores sociodemográficos de la Región IX, Nezahualcóyotl, 1970-2005.  
<http://www.edomex.gob.mx/desarrollosocial/doc/pdf/regionixnezahuacoyotl2.pdf>

Ewing, R., T. Schmid, R. Killingsworth, A. Zlot y S. Raudenbush, 2003. Relationship between urban sprawl and physical activity, obesity, and morbidity. *American Journal of Health Promotion*, 18 (1):47-57

Ewing, R., K. Bartholomew, S. Winkelman, J. Walters y D. Chen, 2007. *Growing Cooler: Evidence on Urban Development and Climate Change*. Urban Land Institute. Chicago, Il. 60 pp.

Godschalk, D. R., 2003. Urban hazard mitigation: Creating resilient cities. *Natural Hazards Review*, 4: 136-143.

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.

IAIA, 2001. *Impact Assessment in the Urban Context (Coastal Zone)*. 21<sup>st</sup> Annual Conference Event of the International Association for Impact Assessment. Cartagena, Colombia. Abstracts Volume, 104 pp.

Islam, M. S. y M. Tanaka, 2004. Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 48 (7-8): 624-649.

Jacob, J. S. y R. López, 2009. Is denser greener? An evaluation of higher density development as an urban storm water-quality best management practice. *Journal of the American Water Resources Association*, 45 (3): 687-701.

Jacob, J. S. y S. Showalter, 2007. The resilient coast: Policy frameworks for adapting the built environment to climate change and growth in coastal areas of the U.S. Gulf of Mexico. TAMU-SG-07-7401R. Texas Sea Grant Program. Texas A&M University. College Station, TX.

Kenworthy, J., 1999. An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities. University Press of Colorado, USA.

Levin, S. A. y J. Lubshenko, 2008. Resilience, robustness, and marine ecosystem based management. *BioScience*, 58 (1): 27-32.

Levina, E. J. S. Jacob, L. E. Ramos y I. Ortiz, 2007. Policy Framework for Adaptation to Climate Change in Coastal Zones: The Case of the Gulf of Mexico. Organization for Economic Co-operation and Development OECD; International Energy Agency IEA, Paris, 69 pp.

Manzo, L. C. y D.D. Perkins, 2004. Finding common ground: The importance of place attachment to community participation and planning. *Journal of Planning Literature*, 20 (4) 335-350.

Mileti, D.S. 1999. Disasters by design: A reassessment of natural hazards in the United States. Joseph Henry Press.

NOAA Nacional Marine Fishery Service. (web site 2 de Julio de 2009). Habitat Connections: Wetlands, Fisheries, and Economics. Part 4: Wetlands, Fisheries, and Economics in the Gulf of Mexico. <http://www.nmfs.noaa.gov/habitat/habitatconservation/publications/habitatconnections/num4.htm>.

Norman, J., H.L. MacLean y C.A. Kennedy, 2006. Comparing high and low residential density: Life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, 132 (1): 10-21.

Parmesan, C. y G. Yohe, 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421: 37-42.

Pfeffer, 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.

Richards, L., 2006. Water and the density debate. *Planning*, 72 (6): 30-35.

Smith, K.D. 2004. *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*. Routledge. London UK.

Titus, J.G., 1998. Rising sea levels, coastal erosion, and the takings clause: How to save wetlands and beaches without hurting property owners. *Maryland Law Review*, 57:1279-1399

UNFPA-Fondo de Población de las Naciones Unidas, 2007. *Estado de la Población Mundial 2007. Liberar el potencial del crecimiento urbano*. New York. (disponible en [www.unfpa.org](http://www.unfpa.org)).

World Resources Institute, 2009. *Herat trends Environmental Information*. <http://earthtrends.wri.org>. (Web site2 de Julio de 2009).

Yáñez-Arancibia, A. y J. W. Day, 2010. La zona costera frente al cambio climático: Vulnerabilidad de un sistema biocomplejo e implicaciones en manejo costero. *In*: A. Yáñez-Arancibia (Ed.), *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*. INECOL, Texas Sea Grant Program, INE-SEMARNAT, México DF, 2010. (Este Volumen).

Yáñez-Arancibia, A, J. J. Ramírez-Gordillo, J. W. Day y D. Yoskowitz, 2009. 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 pp.

In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010

## **LOS MANGLARES FRENTE AL CAMBIO CLIMATICO ¿TROPICALIZACION GLOBAL DEL GOLFO DE MEXICO?**

**ALEJANDRO YÁÑEZ-ARANCIBIA**

Instituto de Ecología A. C. (CPI-CONACYT), Unidad de Ecosistemas Costeros  
Km 2.5 Carretera antigua Coatepec No. 351, El Haya, Xalapa 91070, Veracruz, México.  
*alejandro.yanez@inecol.edu.mx*

**JOHN W. DAY**

Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton  
Rouge, 70803 Louisiana, USA. *johneday@lsu.edu*

**ROBERT R. TWILLEY**

Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton  
Rouge, 70803 Louisiana, USA. *rtwilley@lsu.edu*

**RICHARD H. DAY**

United States Geological Survey USGS, 700 Cajundome Boulevard, Lafayette,  
70506 Louisiana, USA. *dayr@usgs.gov*

### **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 muestran un patrón ampliado y consistente de distribución

colonizando hacia el norte, incluyendo la costa Atlántica de la Península de Florida, ante la oportunidad de la “*tropicalización global del Golfo de México*”.

## 1. INTRODUCCION

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 como 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. 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, p. ej., 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 geomorfológico 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).

## 2. ¿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 súper húmeda. 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, p. ej., 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 3000 mm/año. El promedio de las lluvias varía entre 1500 y 2000 mm/año en la porción centro-norte del Golfo desde Pensacola, FL, 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 1000 y 1500 mm/año. Zonas áridas con menos de 1000 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, TX. 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-USA en la región 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 toda la zona costera del Golfo será tropical en el siglo-21. Conjuntamente con esto, se aprecia una mayor descarga de aguas fluviales en la vertiente global del Golfo, p. ej., en el norte del Golfo por efecto de lluvias torrenciales y deshielos en las cuencas altas (Missouri, Ohio, Mississippi), y en el sur por efecto de mayor intensidad de lluvias en las altas montañas (p. ej., 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). 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?

### 3. 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, 1990; 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 21, con una mejor estimación entre 40 y 45 centímetros. Esto es mucho más elevado que el ascenso del siglo-20 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 (p. ej., 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-21. En el delta del Mississippi, el ARNM se incrementará de 1 a 1.7 cm/año en el siglo-21, lo cual significa de 30 a 70% de incremento desde el siglo-20. 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 USA (Salinas et al., 1986;

Conner y Day, 1989; Day et al., 2000), como en México (Ortiz-Pérez and 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-20 es 2 a 9 veces más bajo que el proyectado para fines del siglo-21 (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, FL, el delta del Mississippi, LA y MS, el sistema lagunar-estuarino de Alvarado, Ver, el gran sistema Laguna de Términos delta Grijalva-Usumacinta, Cam y Tab, el sistema Chetumal, QR, 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-20, 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 (Mendelssohn 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 hierro que provoca precipitación tóxica de “sulfitos” (DeLaune y Pezeshki, 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).

#### 4. EL ECOSISTEMA DE MANGLAR EN ESTE PLANTEAMIENTO

Los manglares constituyen un importante recurso forestal en toda la banda intertropical del planeta (aproximadamente  $240 \times 10^3$  km<sup>2</sup>, Yáñez-Arancibia y Lara-Domínguez, 1999). Recientemente la FAO (2007) ha estimado 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 70's 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. Las últimas cifras para México señalan la existencia de 882,032 hectáreas en el año 2002 (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 inter-dependientes) 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 (p. ej., 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 dulceacuícola 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, p. ej., ribereño, de borde, de cuenca, de hamacas, o enanos). Aunque existen relativamente pocas especies de árboles costeros en ecosistemas de manglar (p. ej., 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, p. ej., huracanes, deslizamientos de tierras, subsidencia, diapiroismo de lodo, aumento acelerado del nivel medio del mar, y el cambio climático global (Kjerfve et al., 1991; Snedaker, 1993). En este siglo-21, 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 todavía 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.

#### **4.1 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-20 (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 valuación 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 tropicales. 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, p. ej., 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), 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 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 bosques 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, el 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, 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 (p. ej., *Uca*, *Sesarma*, *Chiromanthes*, *Cardisoma*, *Goniopsis*, *Ucides*, *Aratus*), existe poca información cuantitativa sobre estructura de la comunidad, dinámica de las poblaciones, 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 el 9% y el 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 un 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 macro fitas 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 (p. ej., 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 acuacultura, 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 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 acuacultura 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 reflujos 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 ha 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 U\$ ha/año los siguientes valores para 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).

#### 4.2 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 CO<sub>2</sub> 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-19, aumentando la temperatura superficial del planeta de 2 a 5 grados Centígrados. 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 (p. ej., como se ha observado en Belice, Jamaica, 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 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 (p. ej., 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* (R. H. 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 R. H. 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, LA, y Harbord Island, TX, 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, FL. 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 (R. H. 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 (p. ej., 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 (Ariel Lugo, Robert Twilley, comunicación personal), aunado al papel que juega la dinámica del suelo controlando el crecimiento y desarrollo de los árboles.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1 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 de 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 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 CO<sub>2</sub> 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*”.

## 5.2 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-USA 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-21 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: ¿Cuál 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?

**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.
-

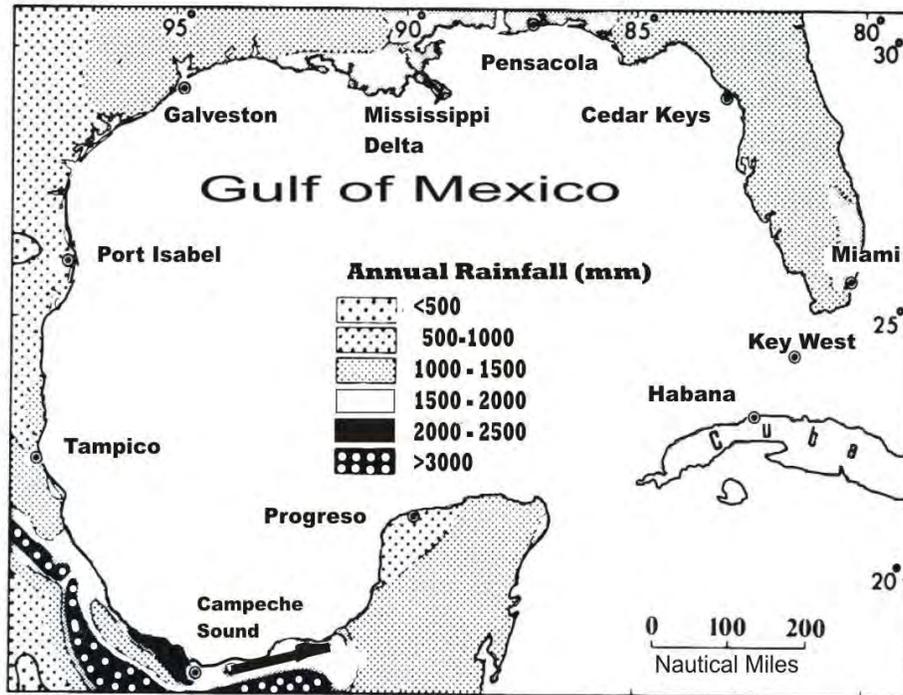


Figura 1. La región del Golfo de México se extiende desde el trópico en la costa de la Península de Yucatán (Estados de Yucatán y Campeche) ca. 18 grados Latitud Sur, hasta la zona templada en el norte (Estados de Alabama, Mississippi, Louisiana) ca. 30 grados Latitud Norte, incluyendo gran variación en temperatura media anual y lluvias, las cuales son la principal determinante de la distribución de humedales costeros. Modificado de Day et al. (1989).

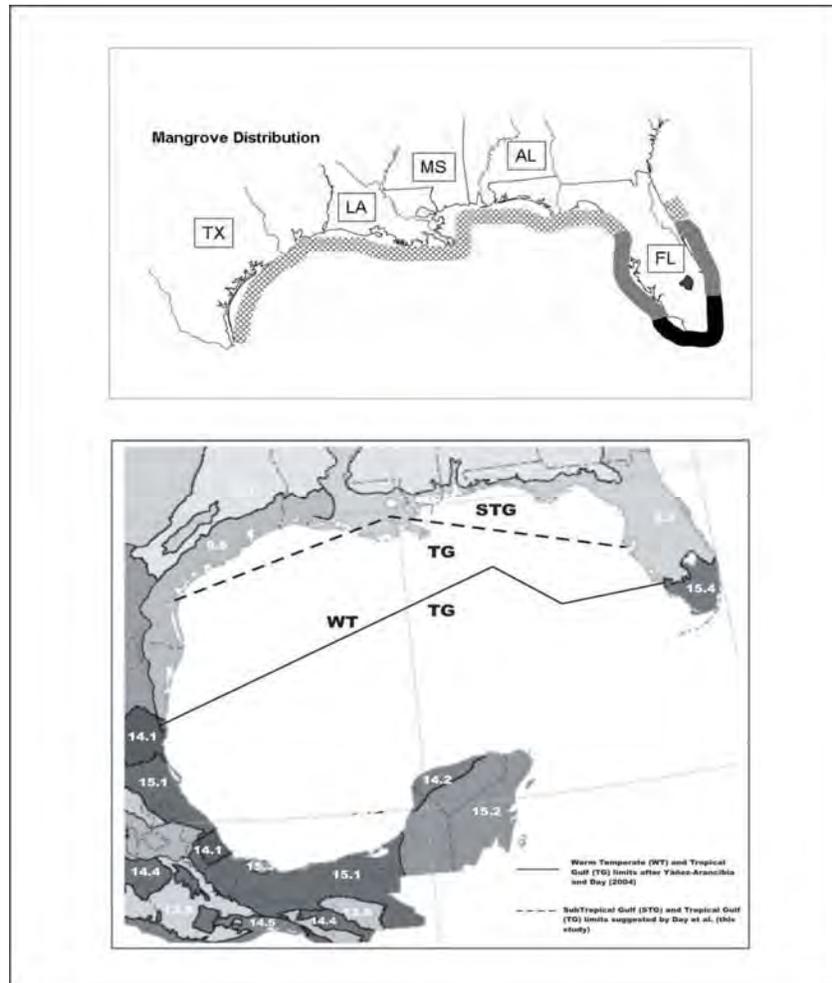


Figura 2. **Cuadro Superior:** *Avicennia germinans* y *Rhizophora mangle* distribuidos en el Norte del Golfo de México. Area Negra: *Avicennia* no dañada por escarcha invernal; *Rhizophora* escasamente dañado. Area Gris: *Avicennia* escasamente dañada; *Rhizophora* frecuentemente dañado por escarcha. Area 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).

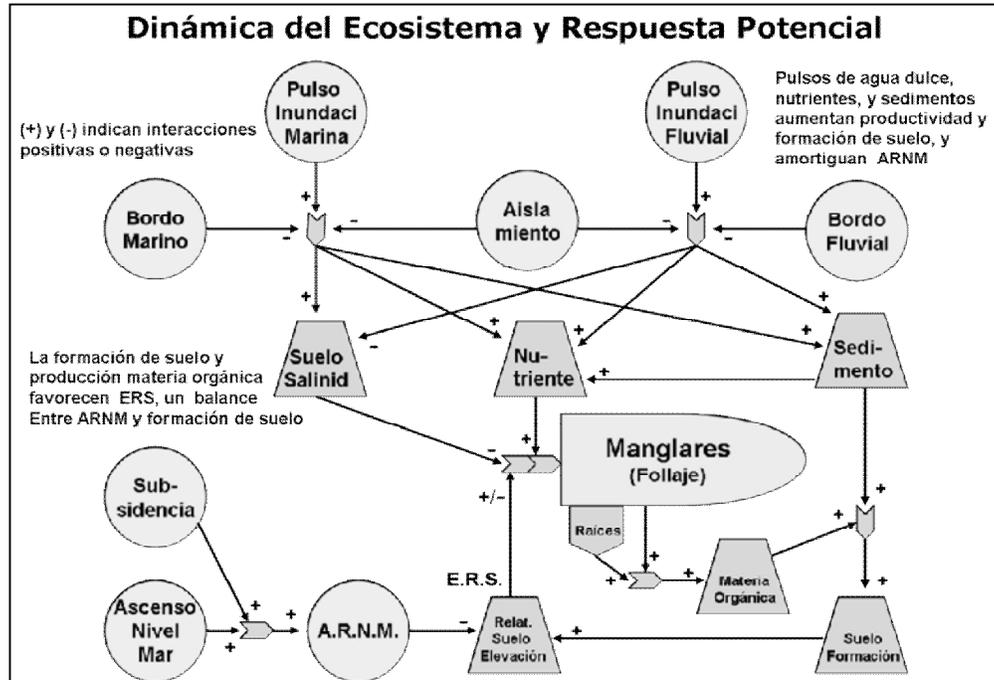


Figura 3. Modelo conceptual del funcionamiento deltáico como ocurre en el Golfo de México. El modelo muestra como los pulsos naturales de agua dulce, nutrientes y sedimentos, favorecen la productividad y la formación de suelo, y amortiguan el Ascenso Relativo del Nivel del Mar (ARNM). La formación de 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).

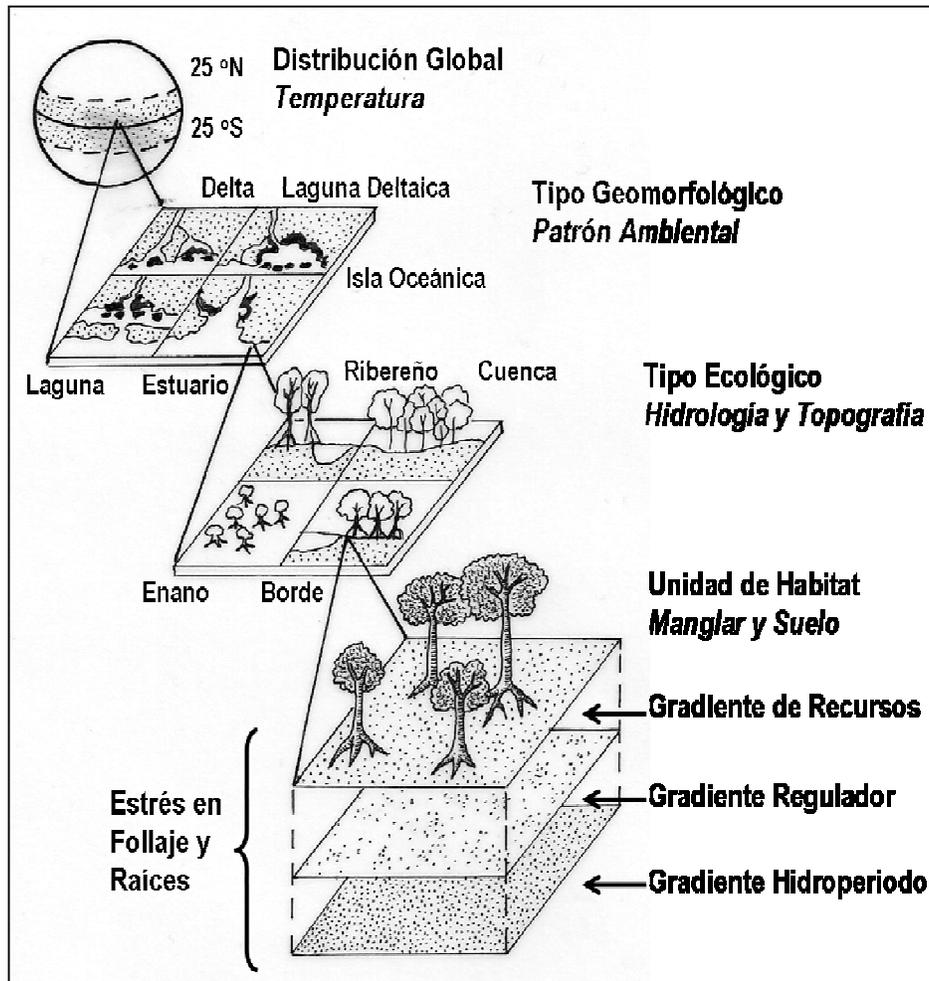


Figura 4. Sistema de clasificación jerárquica para describir diversos patrones de estructura y funcionamiento de los manglares, basado sobre factores que controlan la fisiografía, la concentración de recursos de nutrientes y tensores en el suelo. Por ejemplo, global (temperatura), regional (geomorfológico), local (ecológico) y los tensores en el follaje y raíces. Adaptado de Twilley, Snedaker, Yáñez-Arancibia y Medina (1996).

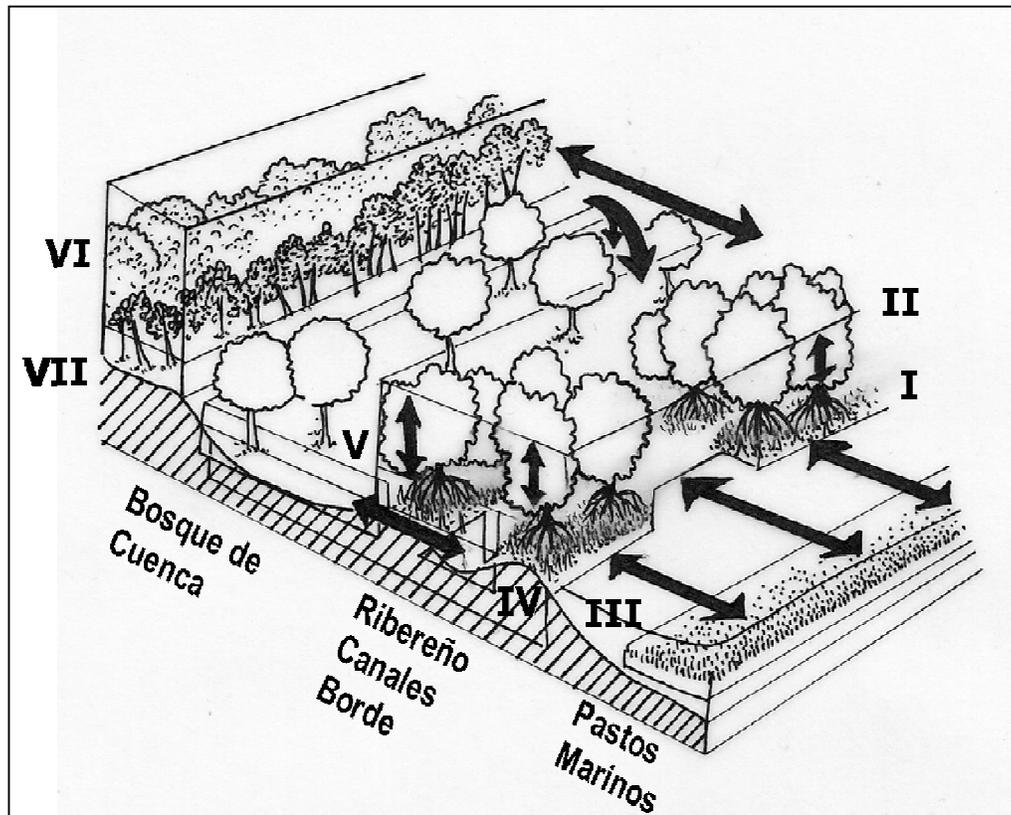


Figura 5. Tipos ecológicos de manglares y su distribución espacial dentro de la zona intermareal. Las flechas y los números romanos definen la ubicación y el movimiento de siete unidades específicas (ver Figura 4) por asociación de hábitats principales en los tipos de manglares. (I) Litoral/sub litoral, (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, Snedaker, Yáñez-Arancibia y Medina (1996).

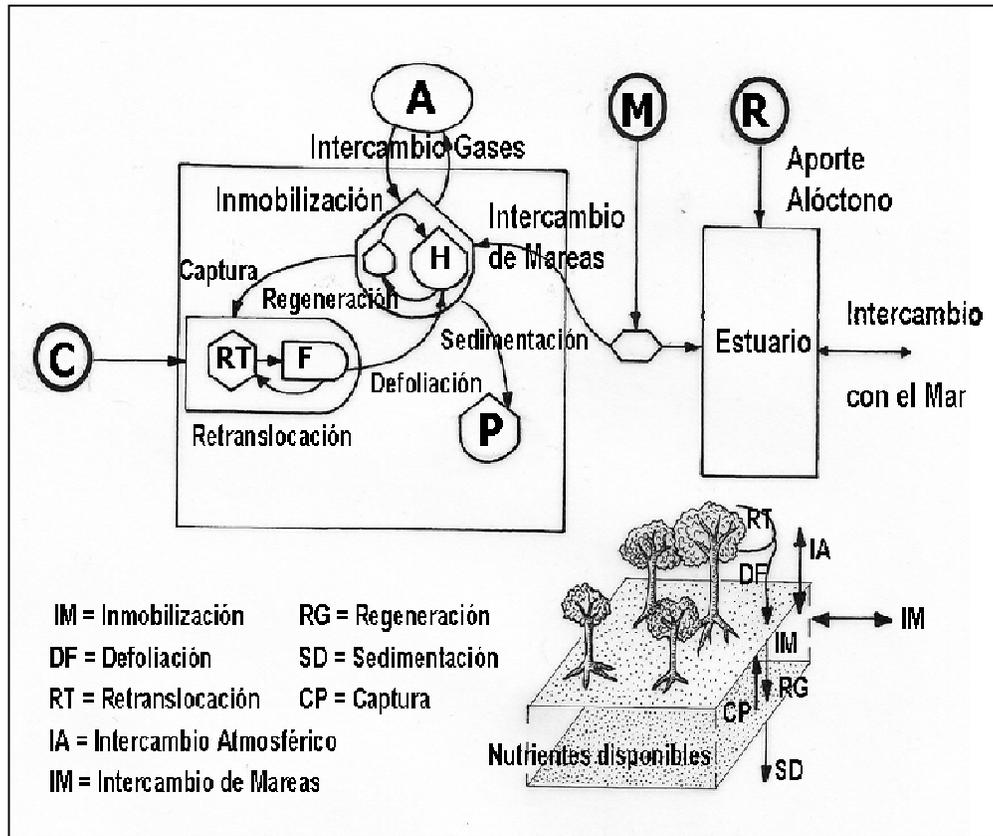
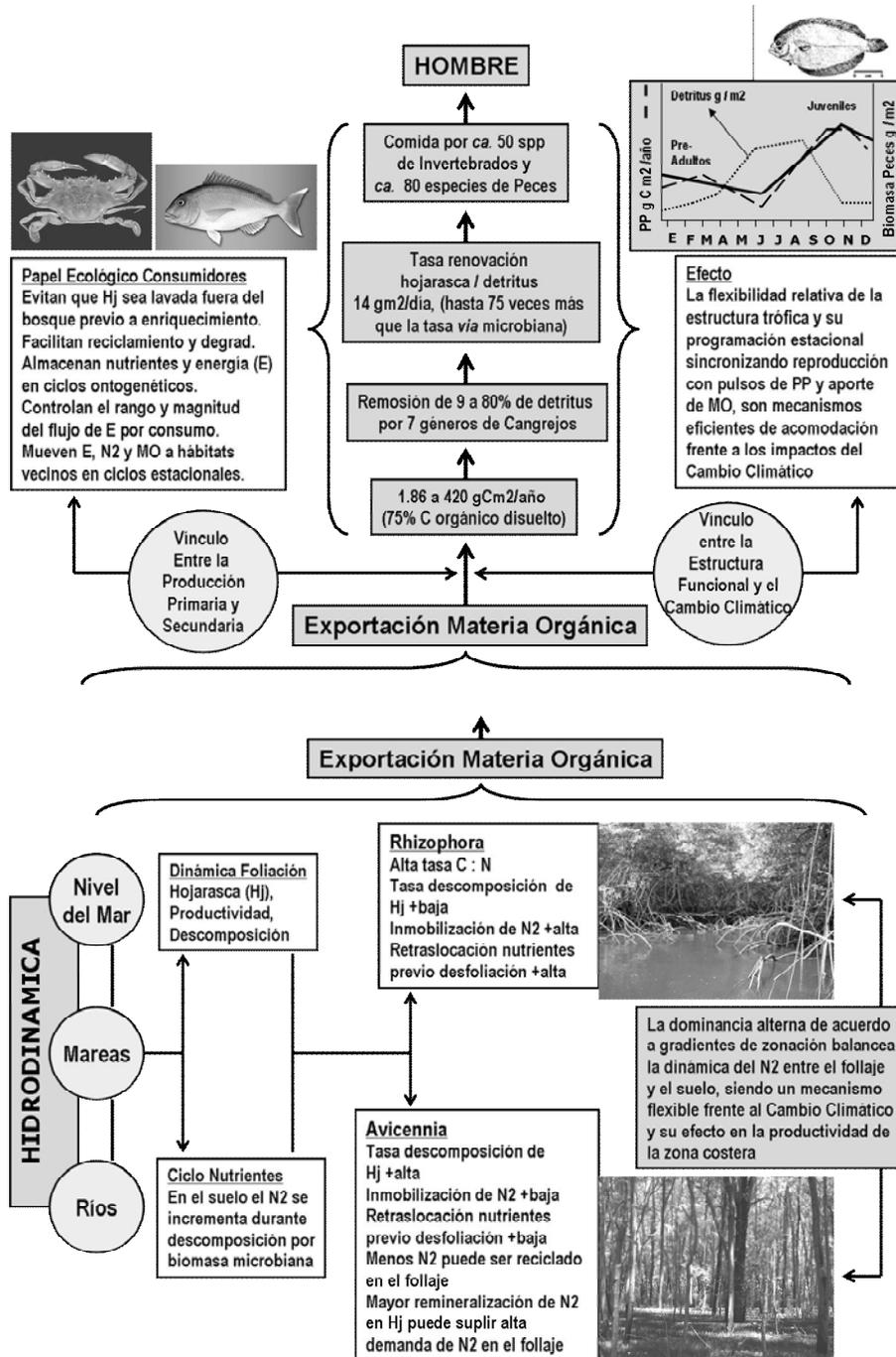


Figura 6. Flujos de materia orgánica y nutriente en el ecosistema de manglar, incluyendo intercambio con el Estuario. Se presenta un diagrama del bosque de manglar con los recursos de nutrientes del suelo, describiéndose el acoplamiento espacial en estos procesos ecológicos. A) Atmósfera, N<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, M) Mareas, R) Ríos, C) Anhídrido carbónico CO<sub>2</sub>, P) Peat, H) Hojarasca con regeneración e inmovilización de nutrientes inorgánicos, RT) Raíces y tallos, F) Follaje. Adaptado de Twilley, Snedaker, Yáñez-Arancibia y Medina (1996).

Figura 7. Página 116. 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.



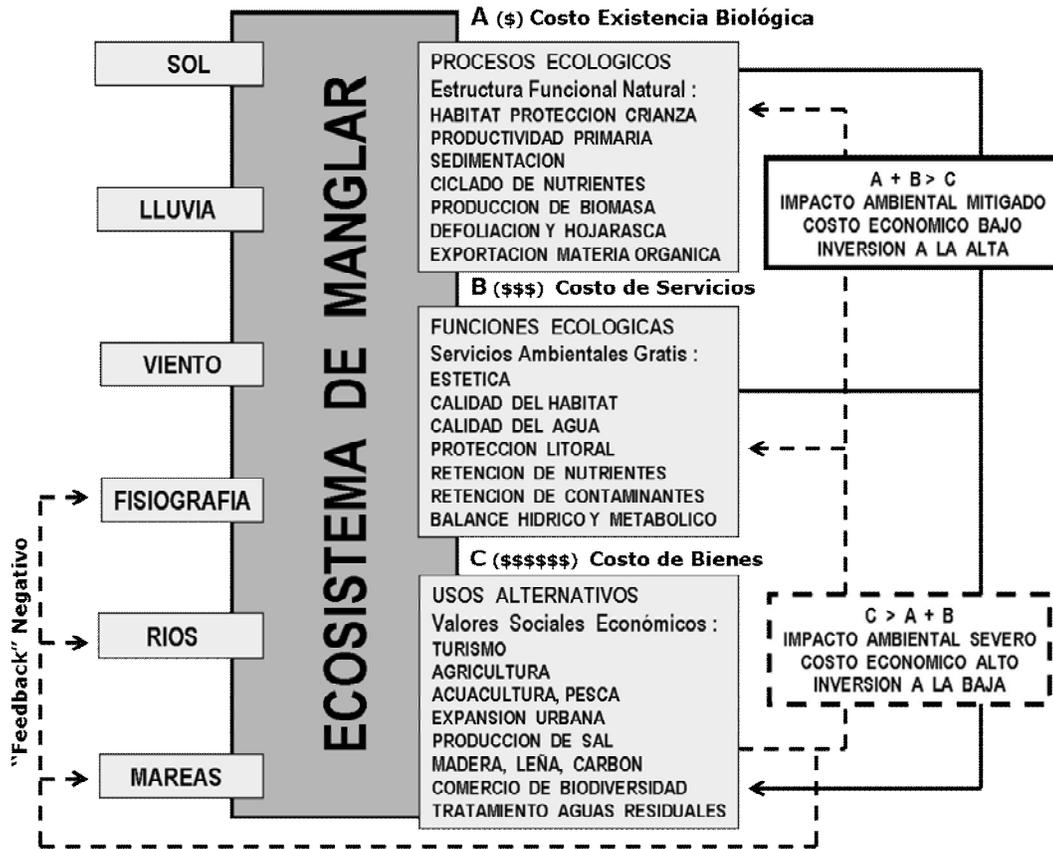


Figura 8. El concepto de "Ecosistema de Manglar" integrando los procesos ecológicos que definen su estructura funcional, las funciones ecológicas que definen sus servicios ambientales, y los usos alternativos que determinan su valor social y económico. Tradicionalmente el costo de existencia biológica (A) es sub-valorado frente al costo de servicios ambientales (B) y al costo de bienes (C). El diagrama muestra las consecuencias negativas de sobre valorar (C) induciendo insustentabilidad en el manejo de estos recursos. Adaptado de Yáñez-Arancibia y Agüero (2000).

## 6. REFERENCIAS

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 pp.

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, 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 geomorphology 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 pp.

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 pp.

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 pp.

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 pp.

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 pp.

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 pp.

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. *In: Benítez Díaz, H., E. Vega López, A. Peña Jiménez y S. Ávila Foucat (Eds.), Aspectos Económicos sobre la Biodiversidad de México. CONABIO, INE, SEMARNAT, México DF, 204 pp.*
- 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, Chapter 4: 17-38. *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, 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. *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.*
- 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 pp.*
- 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 pp.

Ning, Z. H., R. E. Turner, T. Doyle and 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 pp.

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 UNAM*, 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, College Station, TX (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 pp.

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 pp.

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 pp.

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 U.S. 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 pp.

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 pp.

Thieler, R.R. y E.S. Hammar-Klose, 2001. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Gulf of Mexico Coast. U.S. 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. *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, 380.

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, and 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 pp.

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 pp.

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*: Schwartz, M. L. (Ed.), The Encyclopedia of Coastal Sciences, Springer, Dordrecht, The Netherlands. 1211 pp.

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 pp.

Yáñez-Arancibia, A. y M. Agüero, 2000. Integridad de ecosistemas y valor económico. *In: Seminario de Valoración Económica del Medio Ambiente. INE-SEMARNAP. México DF, p. 1-23.*

URL:[http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/consultaPublicacion.html?id\\_public=340&id\\_tema=5&dir=Consultas](http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_public=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. URL: <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. *Hidrobiología, 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 pp.*

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. Tejeda 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 pp.

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 pp.*

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 pp.

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.

*In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010*

# **IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON MEDITERRANEAN COASTAL WETLANDS AND LAGOONS**

**CARLES IBÁÑEZ MARTÍ**

IRTA, Coordinador Programa d'Ecosistemes Aquàtics, Carretera Poble Nou Km 5.5,  
Apartat de Correus 200, 43540 Sant Carles de la Ràpita, Catalunya, Spanya  
*carles.ibanez@irta.cat*

## **ABSTRACT**

The coastal areas most threatened by climate change will be the deltas, low-lying coasts, islands and barrier islands, beaches, wetlands and estuaries. Climate change will produce a series of direct and indirect impacts on coastal zones, but the magnitude of these impacts is not well known in most of cases. The existing literature aiming to evaluate the environmental impacts of climate change on Mediterranean coastal wetlands is scarce, and most of the few existing studies are quite speculative. In relation to the deltas, most of the research has been carried out in the Ebro, Po and Rhône, and focuses primarily on the effects of rising sea-level, which is one of the most important direct effects of climate change. Regarding the coastal lagoons, the existing studies focus on the impacts on hydrology and salinity. The impacts of factors such as higher temperature, changes in rainfall and higher ultraviolet radiation can only be qualitatively evaluated from existing studies of other coastal systems out of the Mediterranean basin. Much more research is needed to quantify and predict the effects of climate change on Mediterranean coastal wetlands, where the expected impacts are thought to be strong in many cases.

## **1. INTRODUCTION**

In the Mediterranean basin, both sea level changes and rainfall, two fundamental factors affecting coastal wetlands, are highly variable in space and time. This area is micro tidal with astronomical tide ranging generally from 20-30 cm. Only near the Strait of Gibraltar and in the northern Adriatic are there higher tidal ranges. Maximum meteorological tides are higher than astronomical tides. For instance, monthly maximum surge height due to meteorological tides is about 1 m in the Ebro delta, and water surges up to 2 m have been recorded in Venice Lagoon (Ibáñez et al., 2000). Many Mediterranean coastal wetlands

are only flooded during these high tides. Minimum sea level is usually recorded in winter or in summer, especially under atmospheric high pressures. Maximum sea level and rainfall occur in fall, with a secondary maximum in spring. In many coastal wetlands, there is a hyper saline aquifer few decimeters under the soil surface, and sea level variations may force this saline water towards the surface. It is accepted that micro tidal coastal wetlands will be more affected by climate change than macro tidal ones, especially due to sea level rise (Simas and Ferreira, 2001).

To understand the impacts of climate change on Mediterranean estuarine systems, it is important to contrast the differences of these micro tidal systems with macro tidal coastal systems ([Table 1](#)). Major portion of Mediterranean coastal wetlands are located in deltaic areas, which in many senses have opposite features to the classical estuaries. Mediterranean deltas protrude into the sea and their estuaries are river-dominated, whereas typical estuaries are coastal indentations more dominated by tides. Tidal marshes often occur in coastal plain estuaries (not present in the Mediterranean) and along the shores of bays, where there is both tidal activity and fluvial influence, leading to close coupling between wetlands and adjacent water bodies. In the Mediterranean, coastal wetlands are most often dominated by coastal lagoons with little influence from rivers. Micro tidal river mouths in the Mediterranean are typically salt-wedge estuaries (Ibáñez et al., 1997), and they are associated to deltas.

It is considered that the coastal areas most threatened by climate change will be the deltas, low-lying coasts, islands and barrier islands, beaches, wetlands and estuaries. Climate change will produce a series of direct and indirect impacts on coastal zones (Day et al., 2008; Scavia et al., 2002; Morris et al., 2002), but the magnitude of these impacts is not well known in most of cases. Direct impacts include those produced by the increase in temperature and sea level, as well as by changes in frequency and/or intensity of extreme events such as marine storms and floods, which may adversely affect wetlands and coastal lagoons, exacerbating the coastal erosion, increasing salinity of estuaries and coastal aquifers. Indirect impacts include changes in the distribution of sediments and changes in the structure and function of coastal ecosystems. Climate change will also cause a wide range of socio-economic impacts on human activities. For example, the increase in air temperature can cause significant changes in the seasonality and location of tourism and fisheries, aquaculture and recreation. Furthermore, these changes can also affect water quality by increasing algal blooms, which in turn can have adverse effects on tourism and public health. The purpose of this paper is to carry out a synthesis of the effects of climate change on Mediterranean coastal ecosystems, with emphasis in the coastal lagoons and deltas. However, the potential socioeconomic effects are not analyzed, only the environmental impacts, especially those related to sea level rise and temperature increase.

The Mediterranean region is expected to be highly impacted by climate change and recent work on future trends is increasing the quality of predictions (Lionello et al., 2008). The last report of the International Panel of Experts on Climate Change (IPCC, 2007) summarizes the main effects of climate change in southern Europe as follows:

- Higher temperatures and more intense droughts.
- Reduced hydropower production.

- Decrease in crop yield and negative effects on tourism.
- Increased heat waves and higher frequency of forest fires.
- Impacts on coastal systems due to sea level rise.

Only a relatively limited number of studies have analyzed the vulnerability of coastal zones in the light of global climate change and only some coastal systems, such as deltas, wetlands or sea grass meadows have been subject of particular attention (Lloret et al., 2008). The existing literature aiming to evaluate the environmental impacts of climate change on Mediterranean coastal wetlands and deltas is scarce, and most of the few existing studies are quite speculative (Jeftic et al., 1994; Hoepffner, 2006). In relation to the Mediterranean deltas, most of the research has been carried out in the Ebro, Po (including Venice Lagoon) and Rhône, and focuses primarily on the effects of rising sea-level, which is one of the most important direct effects of climate change (Ibáñez et al., 1997, 1999; Sánchez-Arcilla et al., 1996, 2007, 2008; Day et al. 1995, 1999; Carbognin and Tosi, 2002; Pont et al., 2002).

Studies concerning the impacts of climate change on Mediterranean coastal lagoons are very scarce; Lloret et al. (2008) have recently published the first data-based evaluation of the vulnerability of a Mediterranean coastal lagoon to eutrophication due to future climate change. Mediterranean coastal lagoons will be the first to react to consequences of changes in climatic trends. Trends may include temperature elevation, precipitation distribution patterns, weather extremes, sea level raise (SLR) and UV radiation increase. However, it may be difficult to distinguish between these, already existing anthropogenic, and climate change effects. Assessments are further hampered by lack of historical time series, the Venice Lagoon being probably the only Mediterranean lagoon where this analysis has been attempted (Eisenreich, 2005).

## 2. IMPACTS OF SEA LEVEL RISE

In this section we will analyze the impacts of sea level rise at Mediterranean scale and then we will go into more detail looking at the impacts on the Ebro delta as a representative and relatively well studied case.

### 2.1 Mediterranean Deltas and Coastal Wetlands

The predictions of the last IPCC report (2007) indicate that by the year 2100 there will be an average increase in sea level between 18 and 59 cm, depending on different emission scenarios of greenhouse gases. In the Mediterranean, a spatially averaged positive trend of  $2.1 \pm 0.6$  mm/year has been observed for the period 1992-2005 using altimetry data (Criado-Aldeanueva et al., 2008). Similar results (2.2 mm/yr) for the period 1992-2000 were obtained in a similar study combining data from altimetry and tidal gauges

(Fenoglio-Marc, 2002). The effects of sea-level rise will vary from one place to another and depend on the magnitude of the relative increase in sea level, the coastal morphology and human interventions, among other factors. However, these impacts can be particularly serious in regions where the tidal range is small, like in the Mediterranean. In general, the smaller the intertidal zone the greater the susceptibility to sea level rise. In this sense, the Mediterranean coasts have a low amplitude of the tidal variations (<1m), and that factor suggests that these regions are highly vulnerable to sea level rise. The results of a study carried out in the Tagus estuary (Simas et al., 2001) indicate that the salt marshes of the mesotidal estuaries are susceptible to sea-level rise only in a worst case scenario, which is more likely to occur if the terms set out by the Kyoto Protocol are not met by several industrialized nations. The low vulnerability of tidal salt marshes supports the suggestion that areas with high tidal ranges are less vulnerable to sea level change, due to greater sediment transport and accretion.

In deltas sea level rise is more critical than in other coastal areas, for several reasons:

- Its low elevation (often between 0 and 5 m) makes the risk of flooding high.
- The loss of land elevation due to sediment compaction (subsidence), which must be added to the eustatic sea level rise. The sum of these two variables is called relative sea level rise (RSLR).
- The strong dependence of the water and sediments inputs from the basin, whose decline due to irrigation, dams and other uses accentuate subsidence, coastal regression and salt stress of the delta plain (Day et al., 1995).

In coastal lagoons the expected impacts of rising sea level are summarized as follows (Eisenreich, 2005):

- Increasing the depth of the lagoon.
- Alteration of the water fluxes and salinity.
- Changes in sediment transport and erosion-sedimentation balance.
- Increased flooding of coastal wetlands with salt water.

The rising sea levels will tend to flood Mediterranean coastal lagoons and marshes gradually, unless enough sediment supply exists to compensate the increasing deficit (Ibáñez et al., 1997, Day et al., 1999, Pont et al., 2002). The coastal wetlands could potentially migrate inland, but most of the Mediterranean coast is occupied by infrastructures that prevent it. Even a limited increase can partly submerge sand barriers that separate lagoons and sea. The first result may be an increase in hydrodynamic exchange with the sea. If the rate of RSLR is accelerating the accretion may not be sufficient to maintain the equilibrium with sea level rise, and certain wetlands may disappear. However, for estuaries and deltas with high sediment loading, the limiting rate of RSLR is predicted to be at most 1.2 cm/yr, which is quite greater than the current, long-term rate of RSLR (Morris et al., 2002). This fact stresses the importance of maintaining and restoring the sediment fluxes from the rivers to the sea, that have been strongly reduced in most of watersheds due to dam construction (Rovira and Ibáñez, 2007).

Most of the coastal lagoons and wetlands of the Mediterranean area (especially the deltas) are influenced by natural subsidence, which has been accelerated by wetland reclamation, groundwater and natural gas extraction, and salt intrusion, among other

causes. For example, in the Po delta areas below sea level down to 3 m can be found up to 40 km inland, due to compaction cause by extraction of water with methane, which induced sinking rates up to 30 cm/yr in the 50's (Gambolati et al., 2002). The energetic and economic cost of maintaining these areas dried (*via* pumps) increases with sea level rise and subsidence, so we can expect changes of land use in coastal areas (e.g., recovery of wetlands and lagoons in agricultural areas) as part of an strategy of adaptation to climate change. The construction of dikes and barriers to protect the coastline from the sea level rise can itself be a cause of alteration of coastal ecosystems. Changes in sea level and river flooding can cause increased flooding of the areas affected by subsidence and surrounded by dikes, especially during extreme events. The construction of dikes in river levees and the coastlines as a protection measure against floods and marine storms is widespread in the Mediterranean low-lying coasts (e.g. Po, Rhône, and Nile deltas), but there is increasing evidence that this strategy is not sustainable under an scenario of climate change and energy scarcity (Day et al., 2005).

## 2.2 The Ebro Delta Case

A study commissioned by the European Union, entitled Climate Change and the European Dimension of Water (Eisenreich et al., 2005), devotes a section to analyze the effects of climate change on the Ebro basin and its delta. The main conclusions of this study are:

- The applied models show that the Ebro basin will increase the temperature 2-3 ° C during this century (Alcamo et al., 1996). This will cause water loss through evaporation and water demand for crops and natural vegetation.
- Rainfall will likely decrease 5-20% according to the Spanish government scenarios (PHN, 2003). Ayala-Carcedo and Iglesias (2000) estimate for 2050 a 16% reduction in the availability of water resources in the basin.
- Most likely there will be a higher frequency of extreme events (droughts, floods and heat waves).
- The reduction of river flow will involve less dilution of pollutants and increased salinity.
- In the delta, sea level rise and subsidence will cause a loss of 0.2-0.82 m of elevation in 2100, threatening crops and wetlands.

In the case of the Ebro delta ([Figure 1](#)) the existing scientific and technical literature on the impacts of RSLR reports the following estimates (Ibáñez et al., 1997; Sánchez-Arcilla et al., 2008):

- The present rate of eustatic sea level rise is about 3 mm / yr, and will likely continue to accelerate during this century, according to the IPCC predictions.
- The rates of subsidence are 1-3 mm / yr, depending on local characteristics of the sediment column and the age of the deposits. Measured accretion rates range from 4 mm/yr in wetlands surrounding the river mouth to 0.1 mm/yr in

impounded salt marshes and rice fields. The annual sediment deficit in the delta plain to offset present RSLR is, at least, 1 million m<sup>3</sup>/yr.

- The rate of RSLR for the end of the twenty-first century is estimated between 0.6 and 1 m, so 50% of the delta will be below the mean sea level. When considering RSLR-induced inundation of deltaic areas below a given level (e.g., 0.5 m), although the deltaic surface below the projected level could be relatively large, impacts will be modulated by the “protection” offered by an active coastal zone that is able to react to the RSLR.
- The rate of retreat of the coast is 2-3 m / yr in most of areas, but up to 10 m/yr in the mouth area, mostly due to the deficit of fluvial sediments; the part attributable to RSLR is not well known, though it is likely an order of magnitude lower at present).
- Another direct result of sea-level rise will be a decrease in the return periods of maximum water levels, which due to the surge climate of the area will be very significant.

Proposed solutions to mitigate the impacts of climate change and RSLR in the Ebro delta range from hard engineering methods (e.g. levees, dikes and jetties), to soft engineering defenses (e.g., artificial dunes and drainage systems) and ecological engineering approaches (e.g. restoration of fluvial sediment fluxes, controlled diversions and wetland restoration). This last approach is the most sustainable in the long run, since the restoration of sediment delivery to the delta is the only solution to maintain land elevation. Preliminary studies (Rovira and Ibáñez, 2007) show that the by-pass of sediments in the reservoirs of the lower Ebro river can be feasible and could represent a significant amount of sediments to slow down RSLR of the delta plain and coastal retreat of the river mouth.

### 3. IMPACTS OF TEMPERATURE INCREASE

The rise in air and water temperature in the Mediterranean during the last decades is significant (Giorgi and Lionello, 2008, Vargas-Yáñez et al., 2008), though the real implications of this rise on coastal aquatic ecosystems are unknown. [Figure 2](#) shows the air temperature data from the Ebro Observatory (Catalonia, Spain), where a significant rise of mean temperature (about 2 °C), and especially the maximum mean temperature (about 3 °C) has been recorded during the last century.

The temperature at the surface of the Mediterranean increased 0.75 °C between 1993 and 2003, which is five times more than the average for other seas and oceans of the planet, according to a study carried out by the Space Geodesy Laboratory, University of Alicante, in collaboration with NASA (Vigo et al., 2005; García et al., 2006). The rise in temperature has been also recorded in the coastal waters, though the data series are scarce and limited in time. In the case of confined systems (lagoons and bays) where we can expect a greater impact of warming due to its little depth and volume, the existing data are

still more punctual in space and time, so there is insufficient information to assess the increase of water temperature in these ecosystems.

The main expected impacts on Mediterranean coastal ecosystems (wetlands, lagoons and bays) due to the increase of temperature are (Eisenreich, 2005):

- Changes in the metabolism of ecosystems: higher increase in respiration relative to photosynthesis (increased degree of heterotrophy), thereby reducing net primary production.
- Changes in the composition and diversity of biological communities: further development of the species adapted to high temperature.
- Mortality of species susceptible to extreme temperatures and increased hypoxia, especially fish and bivalves.
- Changes in the metabolism of organisms and the distribution of the ecological niche.
- Changes in the interactions between species and their distribution.
- Changes in the structure of food webs and biogeochemical cycles.
- Changes in hydrology and salinity of the lagoons and bays.

The increase in temperature can have different effects on biological communities. The species are adapted to specific temperature ranges. Temperatures exceeding these ranges will influence the life cycles, responses to nutrients, growth rates, cell division (bacteria, phytoplankton, etc.), predation rates (e.g. Ciliates, Copepods), the processes of reproduction and recruitment (e.g. zooplankton, mollusks), colonization of the habitat (e.g. sea grasses) and the primary and secondary production. A recent study (Lloret et al., 2008) carried out in the Mar Menor Lagoon (Spain) indicates that the expected increase of 3-5 °C in air temperature in the warmest months will probably cause a similar increase in the water temperature due to the high surface/volume ratio of this water body and the low water exchange with the adjacent Mediterranean sea. A rise in water temperature above 30 °C causes a decrease in *Caulerpa prolifera* photosynthesis and, therefore, critical values are expected to be reached more frequently. Thus, the increasing frequency of extreme temperatures can be an important stress factor for aquatic species, especially with temperatures above 30 °C.

The effects of temperature change may include changes in the structure of biological communities. For example, a species adapted to hot temperatures (e.g. imported as a commercial species) can take advantage of the rising temperature, while native species are at competitive disadvantage. Species that are unable to migrate or compete will increase your risk of extinction. Changes in the composition of the community (food web) can alter biogeochemical cycles and the transfer of energy (Viaroli et al., 2001). Furthermore, the alteration of biogeochemical processes can affect water quality and adaptability of the species. The expected increase in metabolic rate may also affect the mineralization rates of organic matter, while increasing nutrient availability and enhancing the oxygen deficit existing in many Mediterranean coastal lagoons. A greater availability of nutrients may enhance the blooms of macro algae, dystrophic crisis and the blooms of harmful microalgae in cooler periods. In the Mar Menor lagoon decreased

*Caulerpa prolifera* photosynthesis (or its death) in summer (due to global warming) and the consequent decrease in its nutrient uptake will probably originate phytoplankton proliferation in the lagoon, since higher nutrient concentrations would become available; as a result, critical values of light attenuation could easily be reached the following season and *Caulerpa prolifera* would be unable to recover after the impact (Lloret et al., 2008). With regard to commercial species (e.g. clams, oysters and mussels), increased water temperature and its duration will have effects on metabolism and recruitment, increasing the spread of pathogens (Troussellier et al., 1998), the risk of blooms of harmful microalgae that affect their commercial value, and an increase in oxygen demand and production of sulfide.

A relatively long data set of temperature in a semi-confined coastal system exists for the bays of the Ebro delta, which can be sufficiently representative of the trend in the coastal bays and lagoons. In the case of the Alfacs Bay an increase of almost 2 °C for the period 1990-1998 has been estimated in the deepest part (6 m) (De Pedro 2007). This increase is very pronounced, even though the data series is probably not long enough to draw definitive conclusions about the magnitude of the trend. The years 2003 and 2006 showed very high maximum temperatures in the Bays of the Ebro delta, up to 30 °C (Figure 3), which produced mortalities of bivalves (Fernández-Tejedor et al., 2008). In 2003 there was a total mortality of mussels in both bays likely due to the persistence of high water temperatures and low oxygen. In both bays the temperature was higher than 28 °C during 42 consecutive days (from 14 July to 25 August), with a maximum of 30.9 °C in the Alfacs bay and a maximum of 29.9 °C in the Fangar bay. In 2006 the Alfacs Bay underwent again a mussel mortality event during summer, likely related to high temperatures (Fernández et al., 2008). In 1994 a mortality episode of bivalves likely due high temperatures in the Alfacs Bay was also recorded. It is well known that the growth and mortality of *Mitilus galloprovincialis* in the Ebro Delta bays are strongly affected by high temperatures in July and August (Ramon et al., 2007).

#### 4. OTHER IMPACTS

Other expected impacts of climate change on coastal wetlands and lagoons can be consequence of changes in rainfall and in ultraviolet radiation (UV). The expected impacts due to rainfall changes are:

- Changes in the water balance of coastal ecosystems.
- Changes in the transport of dissolved nutrients from the watershed to coastal ecosystems.
- Changes in sediment transport from the watershed and from the sea.

The increase or reduction of rainfall and river flow may increase the risk of flooding of coastal areas or enhance the effects of drought. The extreme events can alter the balance of salinity and nutrients in the coastal lagoons, and affect the survival of seaweeds (Short and Neckles, 1999). Many commercial species (e.g. clams) can be affected negatively. The prolonged drought may cause a reduction in the supply of fresh

water and nutrients, which can diminish the phytoplankton production and have negative effects on growth of bivalves. For example, in the lagoons of the Po delta, the long drought of the spring-summer 2003 caused an estimated loss of 50% of cultured mussels, and an almost total loss of recruitment (Eisenreich, 2005).

It has been shown that the increase of UV has deleterious effects on many planktonic organisms and processes (Mostajir et al., 1999, Worrest, 1989), and can penetrate the water column of shallow coastal bodies due to its low depth. However, there are no specific studies on the effects of the increase of this radiation in Mediterranean coastal lagoons and wetlands. Macroalgae, sea grass and phytoplankton photosynthesis can be inhibited by the UV (Smith et al., 1992). In addition, the UV increases the mortality of phytoplankton and bacteria, particularly the first 5 m of the water column where there is little attenuation (Boelen et al., 2002). It has been also shown that the UV can change the structure and dynamics of the pelagic food web (Mostajir et al., 1999). As a result, the ecosystem shifts towards a microbial food web (smaller and less productive organisms), which may have important implications for the aquaculture in lagoons and bays.

Finally, another aspect to take into account is the combination of impacts due to climate change and human activities at local scale and at watershed level. The interaction of stressors due to climate change and anthropogenic impacts such as alteration of water and sediment fluxes, eutrophication and introduction of invasive species, can show non-linear and very complex dynamics, but in the end this is the most common case in ecosystems (and in coastal systems in particular). Actually, present human impacts at local and watershed scale which not related to climate change are almost always the main cause of environmental degradation of coastal systems. [Figures 4](#) and [5](#) show a summary of the existing and expected impacts of climate change and other anthropogenic impacts on the Ebro basin and delta, as a representative case of Mediterranean systems.

### **Aknowledgement**

To the Instituto de Ecology A. C., Xalapa, Ver., México, for inviting me as Visiting Professor during August 2007 in the graduate course on Integrated Coastal Zone Management, and as key note speaker in the First International Panel INECOL-2007 on Climate Change Impacts on the Coastal Zone.

**Table 1. Some differences between macro tidal temperate and micro tidal Mediterranean estuarine systems (Source: Ibáñez et al., 2000).**

<b>Macro tidal temperate systems</b>	<b>Micro tidal Mediterranean systems</b>
Tidal range 1-10 m	Tidal range 0.1 - 1 m
High astronomical tides /low meteorological tides	Low astronomical tides/high meteorological tides
High biological productivity	Medium to low biological productivity
Coastal plain estuaries	Deltas, lagoons
Partially and well mixed estuaries	Salt-wedge estuaries
Tide-dominated estuaries	River-dominated estuaries
Extensive tidal marshes	Small and localized tidal marshes
Presence of tidal freshwater marshes	Tidal freshwater marshes rare
Presence of wetlands along the shore of the estuary	Wetlands along the shore of the estuary rare
Wetlands with regular flooding	Wetlands with summer drought and salt stress
Wetland diversity gradient along the estuary	Wetland diversity gradient across the delta
Plant zonation mainly due to tidal flooding	Plant zonation mainly due to maximum summer salinity
Higher topographic gradient, lower patchiness	Lower topographic gradient, higher patchiness



**Figure 1. Picture showing some coastal wetlands in the Ebro delta (Catalonia, Spain), surrounding the Alfacs Bay. The delta plain is at sea level and protected by small dikes.**

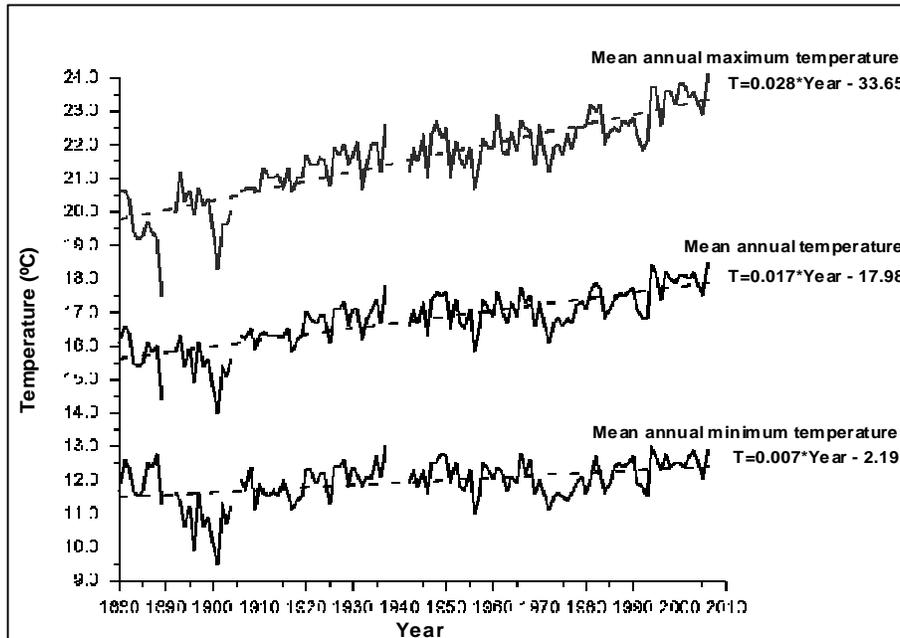


Figure 2. Air temperature trend in the Ebro Observatory, near the Ebro delta. Notice that the mean maximum temperature has increased about 3 °C.

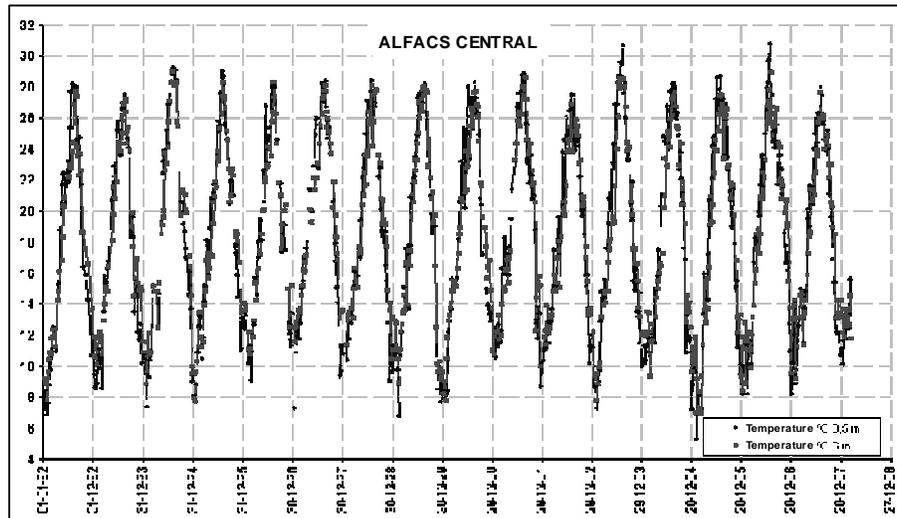


Figure 3. Water temperature record in the Alfacs bay (Ebro delta) from 1992 to 2007, at 0.5 m and 6 m of depth.

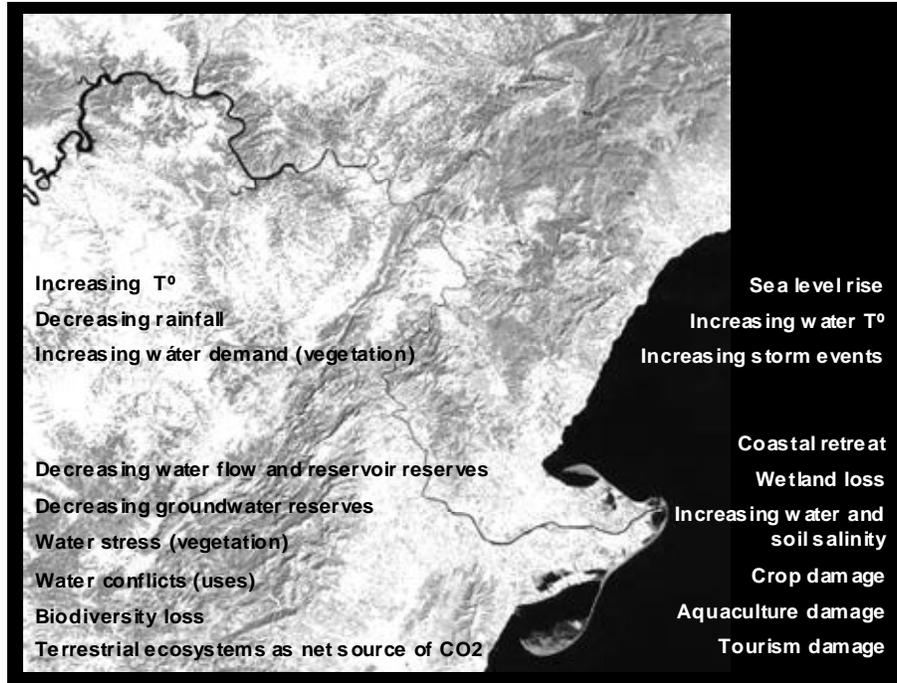


Figure 4. Summary of the expected impacts of climate change on the Ebro basin and delta.

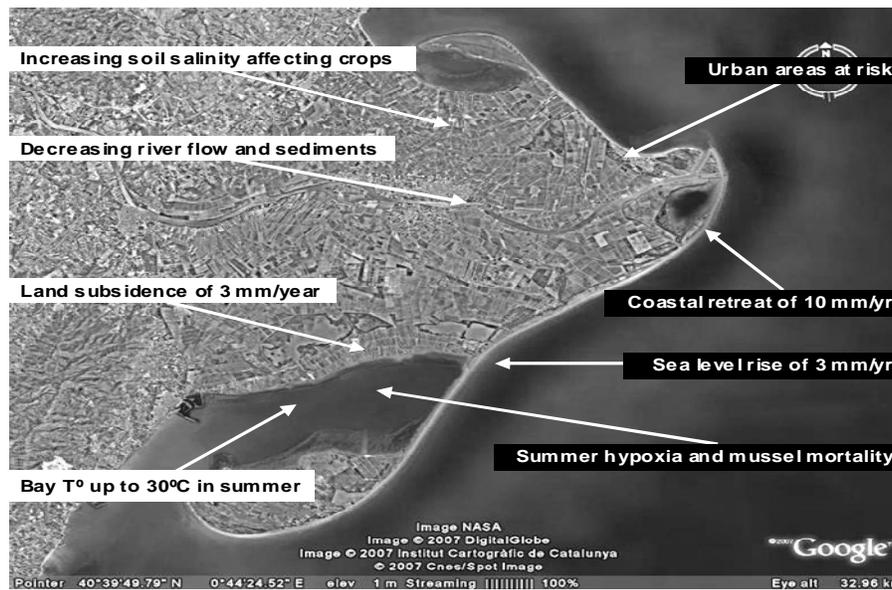


Figure 5. Summary of the combined impacts of climate change, sediment deficit and decreased runoff, already existing in the Ebro Delta.

## 5. REFERENCES

- Alcamo, J., G. J. J. Kreileman, J. C. Bollen, G. J. van den Born, R. Gerlagh, M. S. Krol, A. M. C. Toet and H. J. M. de Vries, 1996. Baseline scenarios of global environmental change. *Global Environmental Change*, 6: 261-303.
- Ayala-Carcedo, F.J. and A. Iglesias, 2000. Impactos del posible Cambio Climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España Peninsular. *In*: A. Balairón (Ed.), *El Cambio Climático, El Campo de las Ciencias y las Artes*, Servicio de Estudios del BBVA, Madrid, pp. 201-222.
- Boelen, P., A. F. Post, M. J. W. Veldhuis and A. G. J. Buma, 2002. Diel patterns of UVBR induced DNA damage in picoplankton size fractions from the Gulf of Aqaba, Red Sea. *Microbial Ecology*, 44: 164-174.
- Carbognin, L. and L. Tosi, 2002. Interaction between climate changes, eustacy and land subsidence in the North Adriatic Region, Italy. *Marine Ecology* 23, Supplement 1: 38-50.
- Criado-Aldeanueva, Del Río, J. and J. García-Lafuente, 2008. Steric and mass-induced Mediterranean sea level trends from 14 years of altimetry data. *Global and Planetary Change*, 60 (3-4): 563-575.
- 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 and 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., R. R. Christian, D. M. Boesch, A. Yáñez-Arancibia, J. Morris, R. R. Twilley, L. Naylor, L. Schaffner and C. Stevenson, 2008. Consequences of climate change on the ecogeomorphology of coastal wetlands. *Estuaries and Coasts*, 31: 477-491.
- Day, J.W., J. Rybczyk, F. Scarton, A. Rismondo, D. Are and G. Cecconi, 1999. Soil accretionary dynamics, sea-level rise and the survival of wetlands in Venice Lagoon: A field and modeling approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49: 607-628.
- Day, J.W., D. Pont, P. Hensel and Ibáñez, 1995. Impacts of sea-level rise on deltas in the Gulf of Mexico and the Mediterranean: the importance of pulsing events to sustainability. *Estuaries*, 18 (4): 636-647.
- De Pedro, X., 2007. Situacions d'anòxia en zones estuàriques sense forçament mareal: una aproximació als balanços producció/consum d'oxígen. Tesis Doctoral, Universidad

de Barcelona, 411 pp.

Eisenreich, S.J. (Ed.), 2005. Climate change and the European water dimension. Europe. European Commission- Joint Research Centre, Ispra, Italy, 253 pp.

Fenoglio-Marc, L., 2002. Long-term sea level change in the Mediterranean Sea from multi-satellite altimetry and tide gauges. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 27, (32-34): 1419-1431.

Fernández, M., M. Delgado, M. Vila, N. Sampedro, J. Camp, D. Furones and J. Diogene, 2008. Resultados del programa de seguimiento de fitoplancton tóxico y biotoxinas en las zonas de producción de bivalvos de Cataluña: años 2003-2006 y primer trimestre del 2007. *Actas de la IX Reunión Ibérica sobre Fitoplancton Tóxico y Biotoxinas Cartagena, 7-10 Mayo 2007*.

Fernández-Tejedor, L. M., E. Elandaloussi, E. Mallat, A. Cañete, P. Caillaud, B. Riobo, J. Paz, D. Franco, A. Ibarra, D. Cembella, J. Blasco and J. Diogene, 2008. The Ebro Delta coastal embayment, a GEOHAB pilot site for the study of HAB population dynamics. *Proceedings 12th Conference on Harmful Algae Copenhagen, Denmark, Sept 2006*.

Gambolati, G., P. Teatini and M. Gonella, 2002. GIS simulation of the inundation risk in the coastal lowlands of the Northern Adriatic Sea. *Mathematics and Computer Modelling* 35, 963-972.

García, D., B. F. Chao, J. Del Río, 2006. On the steric and mass-induced contributions to the annual sea level variations in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research Oceans* 111 (C9).

Giorgi, F. and P. Lionello, 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63 (2-3): 90-104.

Hoepffner, N. (Ed.), 2006. Marine and coastal dimension of climate change in Europe. European Commission- Joint Research Centre, Ispra, Italy, 107 pp.

Ibáñez, C., A. Curcó, J. W. Day and N. Prat, 2000. Structure and productivity of microtidal Mediterranean coastal marshes. *In: M. P. Weinstein and D.A. Kreeger (Eds.), Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology*, pp. 107-136, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

Ibáñez, C., J. W. Day and D. Pont, 1999. Primary Production and decomposition in wetlands of the Rhône Delta, France: interactive impacts of human modifications and relative sea level rise. *Journal of Coastal Research*, 15 (3): 717-731.

Ibáñez, C., A. Canicio and J. W. Day, 1997. Morphologic evolution, relative sea-level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebre Delta. *Journal of Coastal Conservation*, 3: 191-202.

Ibáñez, C., D. Pont and N. Prat, 1997. Characterization of the Ebre and Rhone Estuaries: a basis for defining and classifying salt wedge estuaries. *Limnology and Oceanography* 42(1): 89-101.

IPCC, 2007. *Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.

Jeftic, L., J. D. Milliman and G. Sestini (Eds.), 1994. *Climate change and the Mediterranean*. Edward Arnold, London UK, 673 pp.

Lionello, P., S. Planton and X. Rodó, 2008. Mediterranean climate: trends, variability and change. *Global and Planetary Change*, 63, Issues 2-3 (special issue).

Lloret, J., A. Marín and L. Marín-Guirao, 2008. Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change ? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78 (2): 403-412.

Mostajir, B., S. Demers, S. de Mora, C. Belzile, J. P. Chanut, M. Gosselin, S. Roy, P.Z. Villegas, J. Fauchot and J. Bouchard, 1999. Experimental test of the effect of ultraviolet-B radiation in a planktonic community. *Limnology and Oceanography*, 44: 586-596.

PHN (Plan Hidrológico Nacional), 2003. *Climate change effects*. Ministerio del Medio Ambiente, Madrid.

Pont, D., J. W. Day, P. Hensel, E. Franquet, F. Torre, P. Rioual, C. Ibáñez and E. Coulet, 2002. Response scenarios for the deltaic plain on the Rhône in the face of an acceleration in the rate of sea-level rise with special attention to *Salicornia* type environments. *Estuaries*, 25 (3): 337-358.

Ramón, M., M. Fernández and E. Galimany, 2007. Development of mussel (*Mytilus galloprovincialis*) seed from two different origins in a semi-enclosed Mediterranean Bay (N.E. Spain). *Aquaculture*, 264: 148-159.

Rovira, A. and C. Ibáñez, 2007. Sediment management options for the lower Ebro River and its Delta. *Journal of Soils and Sediments*, 7 (5): 285-295.

Sánchez-Arcilla, A., J. A. Jiménez, H. I. Valdemoro and V. Gracia, 2008. Implications of Climatic Change on Spanish Mediterranean Low-Lying Coasts: The Ebro Delta Case.

Journal of Coastal Research, 24: 306–316.

Sánchez-Arcilla, A., J. A. Jiménez and H. I. Valdemoro, 2007. The vulnerability and sustainability of deltaic coasts: the case of the Ebro Delta, Spain. *In: Managing Coastal Vulnerability*, pp. 79-95, Elsevier Science Ltd.

Sánchez-Arcilla, A., J. A. Jiménez, M. J. Stive, C. Ibáñez, N. Prat, J. W. Day and M. Capobianco, 1996. Impacts of sea-level rise on the Ebro Delta: a first approach. *Ocean and Coastal Management*, 30: 197-216.

Scavia, D., J. C. Field, D. Boesch, 2002. Climate change impacts on U.S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries*, 25 (2): 149-164.

Short, F.T. and H. A. Neckles, 1999. The effects of climate change on seagrasses. *Aquatic Botany*, 63: 169-196.

Simas, T., J. P. Nunes and J. G. Ferreira, 2001. Effects of global climate change on coastal salt marshes. *Ecological Modelling*, 139: 1-15.

Smith, R.C., B. B. Prezelin, K. S. Baker, R. R. Bidigare, N. P. Boucher, T. Coley, D. Karentz, S. MacIntyre, H. Matlick, D. Menzies, M. Ondrusek, Z. Wan and K. J. Waters, 1992. Ozone depletion: Ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science*, 255: 952-959.

Troussellier, M., J. L. Bonnefont, C. Courties, A. Derrien, E. Dupray, M. Gauthier, M. Gourmelon, F. Joux, P. Lebaron, Y. Martin and M. Pommepuy, 1998. Responses of enteric bacteria to environmental stresses in seawater. *Oceanologica Acta* 21: 965-981.

Vargas-Yáñez, M., J. García, J. Salat, M. C. García-Martínez, J. Pascual and F. Moya, 2008. Warming trends and decadal variability in the Western Mediterranean shelf. *Global and Planetary Change*, 63 (2-3): 177-184.

Viaroli, P., R. Azzoni, M. Bartoli, G. Giordani and L. Tajé, 2001. Evolution of the trophic conditions and dystrophic outbreaks in the Sacca di Goro lagoon (Northern Adriatic Sea). *In: F. M. Faranda, L. Guglielmo and G. Spezie (Eds), Structure and Processes in the Mediterranean Ecosystems*. 56: 443-451. Springer-Verlag, Milano.

Vigo, I, D. García and B. F. Chao, 2005. Change of sea level trend in the Mediterranean and Black seas. *Journal of Marine Research* 63(6): 1085-1100.

Worrest, R.C., 1989. What are the effects of UV-B radiation on marine organisms? *In: Schneider, T. et al. (Eds.), Atmospheric Ozone Research and its Policy Implications*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 269-278.

*In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera. Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010*

## **CAMBIO CLIMÁTICO Y POLÍTICAS PÚBLICAS AMBIENTALES EN ZONAS COSTERAS Y MARINAS**

**AMPARO MARTÍNEZ ARROYO**

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria UNAM, Delegación Coyoacán, 04510  
México DF, *marroyoampa@gmail.com*

### **RESUMEN**

La necesidad de considerar el cambio climático dentro de la planificación del desarrollo, manejo y estudio de los procesos que se llevan a cabo en la zona costera y marina, no sólo añade un ingrediente de complejidad a un tema ya de naturaleza transversal, multisectorial, multidisciplinario y multiescalar, sino que obliga a una revisión de los instrumentos de enlace entre ciencia y política ambiental con que se cuenta para realizarlo. Se presenta una reflexión acerca de las condiciones en que se encuentra México para hacer frente a los retos del cambio global en estas regiones, y se plantean algunas ideas para facilitar el que la investigación científica constituya un apoyo real y dinámico en la toma de decisiones para la gestión ambiental y el manejo integral de la zona costera.

### **1. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, a la compleja tarea de entender los procesos físicos (Schwartz, 2005), biogeoquímicos (Gregory et al., 2009) y socioeconómicos (Yáñez-Arancibia et al., 2009) que se desarrollan en la zona costera, y de diseñar estrategias para su manejo (Zárate Lomelí et al., 2007), se suma la necesidad de considerar el cambio climático global como el marco de referencia ineludible (Day et al., 2009), con el propósito de enfrentar la gestión ambiental y el manejo costero-marino de manera multisectorial, transdisciplinario e inter temporal. Al mismo tiempo, al plantearnos la construcción de políticas públicas en el ámbito costero y marino de México, de cara al cambio climático, es imposible soslayar el hecho de que las políticas públicas actuales, dirigidas directa o indirectamente a esta zona, son insuficientes, a menudo inadecuadas y por lo general no se llevan a cabo de

manera efectiva. Esto en gran parte debido a lo confuso del marco jurídico que norma a las costas de México (Zárate Lomelí et al., 1999).

Si bien tanto la investigación científica como la gestión ambiental han tenido avances considerables en México en las últimas décadas, la pregunta recurrente es: ¿Por qué no se ha logrado detener el deterioro de los ecosistemas costeros y marinos ni mejorar las condiciones ambientales en las que se desarrollan, entre otras, las actividades petroleras, pesqueras, turísticas, urbanísticas, habitacionales y de transporte en los litorales nacionales?

En ese contexto, elaborar propuestas para enfrentar de manera fundamentada, coordinada y continua, el mayor reto ambiental que ha enfrentado la humanidad, se nos presenta, a lo sumo, como un ejercicio intelectual de buena voluntad y pocas posibilidades de éxito.

Sin embargo, tanto a nivel nacional (SEMARNAT, 2007) como internacional existen los conocimientos científicos básicos y los instrumentos de gestión necesarios para abordar la problemática ambiental costera y marina con un enfoque ecosistémico, dinámico, integral y con probabilidades de ser implementado mediante políticas públicas elaboradas de común acuerdo entre los diversos actores y sectores involucrados. Aquí enfatizaremos en dos de ellos, el sector científico y el gubernamental, sin dejar de tomar en cuenta que cualquier medida que se proponga tendrá que ser construida y llevada a cabo con una amplia participación social.

## **2. LAS ESCALAS DEL PROBLEMA Y SUS DIFERENTES DIMENSIONES**

La zona costera, como zona de convergencia marina, terrestre y atmosférica, es vulnerable al cambio climático por diversos factores de impacto. Por ejemplo, aumento en el nivel del mar, asoleo de las lagunas costeras, erosión de la línea de costa, incremento en la frecuencia e intensidad de los huracanes, cambios en los patrones de lluvia y de vientos, inundaciones, acidificación del océano y estratificación térmica de los sistemas marinos (McLean et al., 2001; Easterling et al., 2007). El impacto que tenga cada una de estas variables en la integridad de los ecosistemas, la biodiversidad y la sociedad, dependerá de muchos factores que abarcan desde las características físicas y biogeográficas, hasta la organización social y tipo de actividades que se desarrollen en la región.

### **2.1 La Naturaleza Física y el Marco Socio Ambiental**

Una de las principales dificultades en la adopción de políticas generales para las costas mexicanas, radica en su gran heterogeneidad natural y socio ambiental, con marcadas tendencias regionales. Los mares mexicanos, incluyendo la zona económica exclusiva, tienen una extensión 1.5 veces mayor que la superficie terrestre. En la zona costera

habita el 15% de la población del país y es la zona con mayor tasa de crecimiento demográfico (2.8%) de acuerdo a INEGI (2005).

Alrededor del 80% de la producción pesquera nacional se lleva a cabo en el Pacífico y se concentra mayoritariamente en cuatro estados del norte. La plataforma continental del Golfo de México constituye la franja de producción petrolera más importante del país. En las costas del Caribe y del Pacífico Tropical se ha impulsado tradicionalmente la actividad turística y en las dos penínsulas, de Baja California y Yucatán-Quintana Roo, hay regiones que ameritan una especial protección de la biodiversidad. La zona sur del Pacífico mexicano, con temperaturas superficiales del mar por encima de los 27 °C y la región del Golfo de Tehuantepec, donde confluyen vientos y corrientes oceanográficas características, juegan un importante papel en la climatología. La actividad industrial y portuaria tiene desarrollos puntuales y desiguales, más determinados por vaivenes políticos y económicos que por planificación de largo plazo.

## **2.2 La Gestión Ambiental de Mares y Costas**

### ***El Panorama General***

El estado mexicano tiene la obligación de conservar y proteger el medio marino bajo su jurisdicción. En mares y costas se desarrolla una gama de actividades productivas, de transporte, servicio y recreativas, cuya gestión, normatividad y vigilancia compete a diversas instituciones gubernamentales (INE-SEMARNAT, 2000; SEMARNAT, 2007).

La aplicación de políticas públicas hacia estas zonas ha sido fragmentada y dispersa –incluso a veces contradictoria– lo que no permite un marco adecuado para el desarrollo sustentable y tampoco promueve la protección, el aprovechamiento, la valoración y el conocimiento de los recursos de la forma en que lo requiere esta porción fundamental y mayoritaria del territorio nacional.

Al mismo tiempo, numerosas actividades realizadas en tierra por diversos sectores (p. ej., agrícola, forestal, industrial) impactan a los ecosistemas costeros y marinos de manera cotidiana y, en su mayoría, descontrolada.

En el plano internacional México ha suscrito y adoptado los más importantes instrumentos referentes a la protección de los recursos marinos; sin embargo no se han aplicado en el país políticas públicas vinculadas y sostenidas para el desarrollo de costas y mares. En términos generales el tema de los ecosistemas acuáticos ha sido de los menos atendidos a nivel gubernamental; sólo algunas especies y cuerpos de agua en riesgo o relacionados con la producción acuícola, pesquera, eléctrica, petrolera y de descarga industrial, han tenido algún seguimiento, aunque no precisamente en su vertiente ecológica.

En años recientes, y en particular a partir de la cumbre de Johannesburgo en el 2002, todos los organismos internacionales para el desarrollo, el ambiente, la salud y la alimentación están haciendo llamados a adoptar de manera urgente medidas

multisectoriales coordinadas e integrales para detener el deterioro mundial de costas y mares. De un problema de contaminación, destrucción física y sobreexplotación de recursos, se ha trascendido a una amenaza ambiental de salud pública, socioeconómica, de seguridad alimentaria y de calidad de vida, con creciente vulnerabilidad frente a fenómenos naturales y al cambio climático global.

En México uno de los principales obstáculos para atacar adecuadamente esta problemática es institucional. La gestión de los ecosistemas costeros y marinos dirigida al aprovechamiento y protección de sus recursos naturales y a un desarrollo sustentable, implica una visión global e integradora, que no se ha logrado.

Históricamente, las dependencias que tienen competencia en temas relacionados con costas y mares están dispersas, no tienen coordinación entre sí, ni actúan con criterios comunes. Incluso las que operan dentro del mismo sector ambiental.

Si bien varias de las dependencias tienen una especialización hacia el tema marino y costero (Secretaría de Marina, Administración Portuaria, Dirección de la Zona Federal Marítimo Terrestre, secciones de CONAPESCA, CONANP, CONABIO, etc.) para muchas otras el tema está inmerso dentro de otros de muy diversa naturaleza (por ejemplo Energía, CNA, Salud Pública, Transporte, Turismo).

De cualquier forma ninguna de las estructuras actuales puede abarcar todos los aspectos que se requieren para una gestión adecuada y con horizonte de largo plazo, de los ambientes costeros y marinos, integrando las visiones académica, privada y social, para hacer frente a los impactos previsible del cambio climático.

### ***Los Avances y los Instrumentos***

Si bien el panorama parece desolador, sobre todo si se recorre la costa mexicana y se observa el incumplimiento de las normas más elementales de protección ambiental, desarrollo urbano, actividad industrial, turismo, etc., no carecemos a nivel federal, regional, estatal y municipal de Planes, Programas, Comisiones, Estrategias, Ordenamientos, Cartas, Manifestaciones, Normas, que han sido adecuadamente elaborados y enunciados (algunos hasta efectivamente puestos en marcha) y que constituyen valiosos instrumentos y experiencias de donde partir. Véase por ejemplo INE-SEMARNAP (2000), Day et al. (2004), León et al. (2004), SEMARNAT (2006, 2007), Córdova-Vásquez et al. (2006), Zarate Lomelí et al. (2007).

En un país en el que el tema marino había sido prácticamente ignorado en los planes de desarrollo, el establecimiento de áreas y especies protegidas, de comisiones intersecretariales, de programas de vigilancia y restauración ecológica de distinto tipo, el mejoramiento de la infraestructura de monitoreo ambiental, los ordenamientos ecológicos y territoriales, entre otros, constituyen avances innegables, aunque insuficientes.

## **2.3 La investigación Ambiental para el Manejo de Mares y Costas**

### ***Panorama General***

De diferente índole, pero con consecuencias similares, son los problemas en el sector académico y científico. Más de 40 instituciones de educación superior e investigación en los 17 estados costeros y en el Distrito Federal estudian algo relacionado con ambientes marinos y costeros, además de numerosos institutos tecnológicos y técnicos de nivel medio superior o pertenecientes a alguna secretaría o sector gubernamental.

Se podría afirmar que en conjunto, la comunidad científica sabe mucho más que el gobierno sobre el funcionamiento y los recursos costeros y marinos. Sin embargo, en general cada investigador o grupo de investigación realiza su investigación mediante proyectos aislados, de poco alcance espacial o temporal y, paradójicamente, muchas veces con financiamiento internacional y no del país. Hay una creciente conciencia de la importancia de la multidisciplinaria pero difícilmente se consiguen colaboradores o financiamiento nacional para investigaciones que realmente la incluyan, y mucho menos si las otras disciplinas son del área de las ciencias sociales o humanidades.

Sin embargo, biólogos, oceanólogos y ecólogos –principalmente-, pero también físicos, ingenieros ambientales, químicos, geólogos, geógrafos, así como muchos otros profesionistas, han ido acumulando experiencia y conocimientos que sólo pueden transformar en acciones de comunidad o de gobierno, si son empleados por éste directamente o en alguna consultoría, teniendo normalmente un campo restringido para la toma de decisiones. El resto se limita a entregar a la fuente de financiamiento los resultados de su trabajo, sin saber casi nunca si estos serán utilizados, ni cómo.

Diversas publicaciones institucionales, por ejemplo, del Instituto Nacional de Ecología (INE), CONABIO, CONAPESCA, dan cuenta también de los intentos de acercamiento entre el sector académico y gubernamental en el tema, con distintos grados de trascendencia.

No es el objetivo en este trabajo juzgar la calidad de la investigación que se realiza, sino hacer hincapié en la forma y condiciones en que se lleva a cabo, en términos de la capacidad científica instalada y del apoyo a la ciencia en México, de manera sumamente somera. En las siguientes tres tablas se da una idea de los recursos humanos en la comunidad científica y sus productos publicados como un indicador del trabajo en el tema. En la [Tabla 1](#) se considera el total de personas trabajando en algún área de Ciencia y Tecnología, definido de manera amplia en todos los sectores; se resalta a los que tienen grado de técnico o superior suponiendo que son los que realizarían la investigación.

Para darnos idea del tamaño de nuestra estructura científica en el plano internacional, el número de investigadores por cada 1000 personas económicamente activas en Estados Unidos es de 9.7, en Canadá 7.7, en España 5.7 y en Argentina 2.3, mientras que en México es de 1.07. En 2006 el porcentaje del PIB, reportado como gasto en Ciencia y Tecnología globalmente fue de 0.36 mientras que en 1998 era de 0.46.

En las [Tablas 2 y 3](#) se incluyeron los artículos publicados por científicos mexicanos de las áreas de Ciencias de la Tierra y Ciencias Ambientales, suponiendo que de ahí vienen los científicos que trabajarían en el tema de cambio climático y zonas costeras, considerando algunos subtemas.

En términos de producción científica global en el área, España publica casi 5 veces más que México, Brasil 2.5 veces más y Estados Unidos 43 veces más. El ejercicio comparativo con Chile o Argentina, que ya no se incluye aquí, muestra también indicadores ligeramente mejor que México, según tema y año.

La intención de presentar estos pocos datos es llamar la atención sobre los recursos con que se cuenta, calculados muy *grosso modo* y suponiendo que todos participarían en la tarea de generar conocimientos sobre la zona costera y marina, utilizables en la elaboración de políticas públicas para enfrentar el cambio climático.

A pesar del reducido tamaño del aparato científico en el país y en el tema marino-costero en particular, este sector tiene una mayor inclinación al trabajo en equipo y a contribuir con los conocimientos de su especialidad para conformar el cuadro de conocimientos general. En distintas épocas se han logrado publicaciones conjuntas sobre los mares de México, conformado redes sobre pesquerías, lagunas costeras, mareas rojas, nivel del mar, etc. Se da también en muchos casos una especie de fidelidad al área de estudio y existen grupos o investigadores en lo personal, que llevan décadas de seguimiento sobre algunas regiones, ecosistemas, o especies, lo cual es bien reconocido internacionalmente.

La comunidad científica, si se logra organizar de manera integrada y continua, requerirá de reevaluar el conocimiento acumulado, generando los enlaces metodológicos necesarios para transitar entre distintas escalas de aproximación y construyendo los protocolos comunes que permitan dar seguimiento a procesos cambiantes.

### 3. CIENCIA, AMBIENTE Y CAMBIO CLIMÁTICO

La ciencia, en “la era del cambio climático”, es un argumento político. La complejidad de los problemas ambientales cada vez hace más crítica la necesidad de generar conocimiento aplicable al manejo de los recursos. Sin embargo en el sector académico no estamos acostumbrados a ejercer colectivamente esa responsabilidad, que además requiere de nuevas formas de interacción entre científicos de distintas disciplinas y de éstos con la sociedad. En el sector gubernamental no siempre se entiende que la investigación científica es un proceso que requiere infraestructura adecuada, presupuesto, respaldo y continuidad.

#### 3.1 Los Instrumentos

La comunidad científica marina ya ha expresado en diversas ocasiones la necesidad de contar con sistemas de observación permanente y coordinada (véase por ejemplo la propuesta GOOS-México en <http://goosmx.cicese.mx>) que posibilite a nivel nacional, el contar con datos de calidad. El reto es producir evaluaciones cuantitativas científicamente creíbles sobre el estado de los ecosistemas costeros y marinos a escalas

regionales y alcanzar la capacidad a nivel nacional para obtener los datos requeridos para producir tales evaluaciones en una forma continua y repetible (Ehler et al. 1997).

Si el objetivo de una acción conjunta academia-gobierno-sociedad es reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático, restaurar o conservar ecosistemas y generar alternativas de adaptación, un prerequisite básico es contar con sistemas confiables de información y obtención de datos ambientales, que posibilite contar con alertas tempranas para la intervención y dar seguimiento a las medidas que se adopten (Day et al., 2007). Un sistema integrado a la vigilancia global es parte además de los compromisos adquiridos como país a nivel internacional.

Otro punto crucial es la adopción de un enfoque común (SEMARNAT, 2007). Hay numerosos trabajos académicos nacionales e internacionales que fundamentan la conveniencia de un enfoque integral para el manejo de la zona costera (Forst, 2009; Rosete et al., 2006; Laffoley Dd A, et al. 2004; Mass, 2004; Yáñez-Arancibia, 2000; Yáñez-Arancibia et al. 2006, 2007, 2009b; Zarate Lomelí et al., 2007; Sorensen, 1997; Christensen, 1996; Stanford, y Poole 1996). A su vez, la administración pública cuenta con numerosos programas y documentos sobre el manejo integral, pero carece de la fuerza política, social y económica para implementarlos adecuadamente, así como del aparato científico con apoyo continuo para darle seguimiento.

La creación de consorcios de investigación por regiones y ecosistemas no es nuevo para la comunidad científica, pero puede fortalecerse al incluir a tomadores de decisiones y a la población local de manera sistemática. La mayor dificultad de elaborar políticas públicas para enfrentar los distintos retos que presenta el cambio climático es la necesidad de tomar decisiones bajo condiciones de incertidumbre. Es necesario que tomadores de decisiones y científicos aprendan juntos este camino.

El decidir juntos que información es necesario generar para enfrentar, por ejemplo un cambio en las corrientes costeras, una estratificación térmica, un desfase en los periodos de reproducción de ciertas especies, una subsidencia de humedales costeros, etc., es necesariamente una labor multi institucional y transdisciplinaria. Ese fue el enfoque que tuvo el Panel sobre Manejo Costero Integrado en el Golfo de México y Caribe en 2003 (Zarate Lomelí y Yáñez-Arancibia, 2003), cuyos resultados quedaron en el olvido.

El impulso a la modelación es otra de las tareas necesarias en la ciencia para apoyar la generación de políticas. El manejo ambiental es por naturaleza transversal, decisiones tomadas en sectores de una actividad, tienen repercusiones en otros a veces de manera desfasada. Los escenarios de cambio climático proyectados por modelos globales necesitan ser convertidos a escalas nacional y regional y ser continuamente actualizados. El decidir juntos que información es necesario generar para enfrentar, por ejemplo un cambio en las corrientes costeras, una estratificación térmica, un desfase en los periodos de reproducción de ciertas especies, una subsidencia de humedales costeros, etc., es necesariamente una labor multi institucional y transdisciplinaria.

Es necesario recalcar que la investigación interdisciplinaria puede hacer la diferencia de que los resultados sean utilizables o no. Incluir con las medidas de restauración o

adaptación, consideraciones como qué personal se requiere para cada etapa del proceso, cuánto costaría construir o adecuar la infraestructura, cómo cambiar patrones de consumo, etc. son aspectos que no son contemplados. El ampliar el concepto de la investigación ambiental a disciplinas socioeconómicas y humanistas será la garantía de su viabilidad y está relacionado con lo que diversos autores refieren en términos más amplios como manejo adaptativo (Mee, 2008; Holling, 1978).

El panorama bosquejado, por otra parte, no deja lugar a duda sobre la importancia de la formación de recursos humanos con este enfoque, tanto en el ámbito académico como en el administrativo. Para ello será necesario crear las estrategias necesarias para que la visión integral y de largo plazo se adquiera mediante un entrenamiento continuo a través de los diversos niveles de estudios y se incluya a los estudiantes dentro de los consorcios de investigación multidisciplinaria.

El cambio climático muy probablemente implicará transformaciones en todos los ámbitos de actividad a nivel global, brindando la oportunidad de crear nuevos esquemas de desarrollo regional. El grado de éxito que alcance cada país en conocer y reducir sus áreas de vulnerabilidad, dar seguimiento a los procesos naturales y sociales cambiantes y generar alternativas de adaptación viables ética, ambiental y económicamente, dependerá en gran medida de la aplicación de políticas públicas formuladas mediante la combinación de conocimiento científico y tecnológico con el interés social.

En una zona donde confluyen diversas condiciones naturales con una gama de actividades humanas y en el contexto de un proceso de cambio global del que no sabemos con certeza sus efectos, esta forma de elaboración de políticas públicas requiere además de evaluación continua que armonice las estrategias de corto, mediano y largo plazo. Para ello, no basta un acto de gobierno o un descubrimiento científico aislado. En países como México, en donde la ciencia generada en el país no ha tenido un papel fundamental en el desarrollo social y económico, es necesario no sólo ampliar y fortalecer a las instituciones científicas, culturales, tecnológicas y de gestión, sino crear la infraestructura que permita un ajuste dinámico y continuado de las políticas públicas y la gestión ambiental en concordancia con los avances en el conocimiento. Las reflexiones y conclusiones de los Paneles realizados en el INECOL en 2007 y 2008 proporcionan elementos muy útiles para ello (ver capítulos 9 y 10, este Volumen).

#### 4. CONCLUSIONES

- Las políticas públicas que se requieren para hacer frente a las condiciones de cambio climático implican nuevas formas de hacer ciencia, otra visión de hacer política y de llevar a cabo la gestión.
- El cambio climático está en marcha y las zonas costeras son muy vulnerables a sus impactos. Para enfrentarlos con éxito es necesaria una asociación creativa y

reiterativa entre generación de conocimientos, aplicación de medidas, seguimiento y evaluación.

- Muchas de las medidas básicas para el manejo integral de las zonas costeras se conocen ya y son técnicamente posibles. Su puesta en marcha depende de decisiones políticas, económicas y de participación social.
- El involucramiento de los científicos en la formulación de medidas de reducción de la vulnerabilidad y de adaptación al cambio climático, en su seguimiento, evaluación y reformulación ante nuevas realidades, requiere de un cambio de actitud, de reformulación de agendas, y de reorganización de la actividad científica.
- La participación de los científicos en apoyo a la creación de políticas públicas, requiere a su vez de un cambio de actitud en el apoyo gubernamental a la ciencia, favoreciendo los proyectos y la infraestructura de largo alcance, el impulso a consorcios interdisciplinarios que den seguimiento a ecosistemas o áreas geográficas específicas, con seguimiento de sus resultados.
- La inclusión de disciplinas tecnológicas y socioeconómicas en proyectos de investigación costera y marina con enfoque integral y de cara a la construcción de alternativas de manejo, constituye una de las características que tanto el sector académico como el gubernamental deben de estar dispuestos a impulsar para reforzar la viabilidad de su aplicación.
- Las políticas públicas dirigidas a costas y mares en el contexto de cambio climático sólo pueden ser exitosas si están basadas en el mejor conocimiento disponible, son revisadas de acuerdo a los cambios en las condiciones, y su aplicación es vigilada y apoyada por una amplia participación social.

**Tabla 1. Consideración total de personas trabajando en el área de Ciencia y Tecnología, y aquellos con algún grado de estudio. PEA=Población Económicamente Activa. PIB=Producto Interno Bruto. (Fuente: CONACYT, 2009)**

<b>Recursos Humanos en Ciencia y Tecnología en México</b>					
<b>% del total de la población &gt;18 años</b>	<b>Postgrado</b>	<b>Licenciatura</b>	<b>Técnico</b>	<b>No. Invest. X 1000 PEA</b>	<b>Gasto 2006/PIB</b>
<b>13.23</b>	<b>0.78</b>	<b>8.26</b>	<b>1.66</b>	<b>1.07</b>	<b>0.36</b>

**Tabla 2. Número de Artículos publicados por País en el Tema. (Datos de SCImago Research Group, 2007)**

<i>Artículos Ciencias Ambientales (Misceláneos)</i>				
<b>Año</b>	<b>Brasil</b>	<b>España</b>	<b>Canadá</b>	<b>México</b>
2005	414	771	1,379	<b>301</b>
2006	514	963	1,519	<b>364</b>
2007	605	1,085	1,649	<b>366</b>
<i>Ciencias de la Tierra y Planetarias (Oceanografía)</i>				
2005	113	320	469	<b>100</b>
2006	140	332	493	<b>80</b>
2007	104	282	580	<b>57</b>
<i>Ciencias Ambientales (Cambio Global)</i>				
2005	11	21	72	<b>4</b>
2006	9	33	46	<b>4</b>
2007	54	51	68	<b>9</b>
<i>Ciencias Ambientales (Manejo, Monitoreo, Política, Leyes)</i>				
2005	22	30	87	<b>20</b>
2006	31	38	108	<b>9</b>
2007	35	56	192	<b>13</b>
<b>Total</b>	<b>2052</b>	<b>3982</b>	<b>6662</b>	<b>1327</b>

**Tabla 3. Contribución de Científicos Mexicanos en Revistas Internacionales. Por ciento del total Publicado en el Tema, por Región y Mundial. (Datos de SCImago Research Group, 2007)**

<b>Artículos publicados, tema</b>	<b>% Región</b>	<b>% Nacional</b>	<b>% Mundial</b>
<i>Ciencias de la Tierra</i>	20.8		0.94
Oceanografía		7	
<i>Ciencias Ambientales</i>	23.2		1.1
Cambio Global y Planetario		<1	
Manejo, Monitoreo, Política y Leyes		<1	
Ecología General		25.5	
Ambiental (varios)		37	

## 5. REFERENCIAS

Christensen, N L., A. N. Bartuska, J. H. Brown, S. Carpenter, C. D'Antonio, R. Francis, J. F. Franklin, J. A. MacMahon, R. F. Noss, D. J. Parsons, C. H. Peterson, M. G. Turner y R. G. Woodmansee, 1996. The Report of the Ecological Society of America Committee on the Scientific Basis for Ecosystem Management. *Ecological Applications*, 6 (3): 665-691.

CONACYT, 2009. Indicadores Científicos y Tecnológicos, el Estado de la Ciencia y la Tecnología (2006). [http://www.siiicyt.gob.mx/siiicyt/referencias/datos\\_estadisticos.do](http://www.siiicyt.gob.mx/siiicyt/referencias/datos_estadisticos.do)

Córdova y Vázquez, A., F. Rosete Verges, G. Henríquez Hernández y B. Fernández de la Torre (Comp.), 2006. Ordenamiento Ecológico Marino, Visión Temática de la Regionalización. INE-SEMARNAT, Serie Planeación Territorial, México DF, 226 pp.

Day, J. W., A. Díaz de León, G. González Sansón, P. Moreno-Casasola y A. Yáñez-Arancibia (Coord.), 2004. Diagnóstico Ambiental del Golfo de México: Resumen Ejecutivo, p. 15-44. *In*: M. Caso-Chávez, I. Pisanty y E. Ezcurra (Eds.), Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. INE-SEMARNAT, Instituto de Ecología A. C., Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A&M University Corpus Christi. Mexico DF, Vol. 1, 626 pp.

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.

Day, J. W., C. A. Hall, A. Yáñez-Arancibia, D. Pimentel, C. Ibáñez Marti y W. J. Mitsch, 2009. Ecology in time of scarcity. *BioScience*, 59 (94): 321-331.

Easterling, W. E., P. K. Aggarwal, P. Batima, K. M. Brander, L. Erda, S. M. Howden, A. Kirilenko, J. Morton, J. F. Soussana, J. Schmidhuber y F.N. Tubiello, 2007: Food, fibre and forest products. *Climate Change 2007*, p. 273-313. *In*: M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden y C.E. Hanson (Eds.), *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II, Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Ehler, C. N., B. Cicin-Sain, R. Knecht, R. South y R. Weiher, 1997. Guidelines to assist policy makers and managers of coastal areas in the integration of coastal management

programs and national climate-change action plans. *Ocean & Coastal Management*, 37 (1): 7 – 27.

Forst, M. F., 2009. The convergence of integrated coastal management and the ecosystems approach. *Ocean & Coastal Management*, 52: 294-306.

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 pp.

Holling, C.S. (Ed) 1978. *Adaptive Environmental Assessment and Management*. Wiley, London UK.

INE-SEMARNAT, 2000. *Estrategia Ambiental para la Gestión Integrada de la Zona Costera de México: Propuesta*. Instituto Nacional de Ecología – Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, INE-SEMARNAT, México DF, 40 pp.

IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: The Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

León, C., I. Espejel, L. C. Bravo, J. L. Férman, B. Graizbord, L. J. Sobrino y J. Sosa, 2004. El ordenamiento ecológico como un instrumento de política pública para impulsar el desarrollo sustentable: Caso del noroeste de México. *In: E. Rivera-Arriaga, G. Villalobos Zapata, I. Azuz Adeath y F. Rosado May (Eds.), El Manejo Costero en México*. Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. Centro EPOMEX, Campeche, Pp. 341-352.

Laffoley, D. A, 2004. *The ecosystem approach: Coherent actions for marine and coastal environments. A Report to the UK Government*. English. Nature p. 65

Mass, J. M., 2004. La investigación de procesos ecológicos y el manejo integrado de cuencas hidrográficas: Un análisis del problema de escala. *In: Cotler, H. (Comp.), El Manejo Integral de Cuencas en México. Estudios y Reflexiones para Orientar la Política Ambiental*. INE-SEMARNAT, México.

McLean, R.F., A. Tsyban, V. Burkett, J. O.Codignotto, D. L. Forbes, N. Mimura, R. J. Beamish y V. Ittekkot, 2001. Coastal zones and marine ecosystems. *In: J. T. Houghton, Y. Ding y D. J. Griggs (Eds.), Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Mee, L. D., R. L. Jefferson, D. Laffoley y M. Elliott, 2008. How good is good? Human values and Europe's proposed Marine Strategy Directive. *Marine Pollution Bulletin*, 56 (2): 187-204

Rosete, F., Enríquez, G., Córdova y A. Vázquez, 2006. El ordenamiento marino ecológico y costero: tendencias y perspectivas. *Gaceta Ecológica* 78. INE- SEMARNAT. <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/gacetitas/486/rosete.html>

SCImago. (2007). SJR — SCImago Journal & Country Rank. July 09, 2009, <http://www.scimagojr.com>

Schwartz, M. (Ed.), 2005. *The Encyclopedia of Coastal Sciences*, Springer, Dordrecht, The Netherlands. 1211 pp.

SEMARNAT, 2006. *Política Ambiental Nacional para el Desarrollo Sustentable de Océanos y Costas de México*. DGPAIRS-SEMARNAT, México DF.

SEMARNAT, 2007. *Estrategia Nacional para el Ordenamiento Ecológico del Territorio en Mares y Costas*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx), Colección Legal, 28 pp.

Sorensen, J., 1997. National and International efforts at integrated coastal management: Definitions, achievements and lessons. *Coastal Management*, 25: 3-41.

Stanford, J.A. y G.C. Poole, 1996. A protocol for ecosystem management. *Ecological Applications*, 6 (3): 741-744.

Yáñez-Arancibia, A., 2000. Coastal management in Latin America. In: C. Sheppard (Ed.). *Seas at the Millennium: An Environmental Evaluation*. Elsevier Science. Pp. 457-466.

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, R. R. Twilley y W. J. Mitsch, 2007. Enfoque de ecosistema para restaurar humedales costeros ante los cambios globales. *Ambientico*, 165: 35-39.

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*. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A & M University Press, College Station, TX, 110 pp.

Yáñez-Arancibia, A, J. W. Day y B. Currie-Alder, 2009b. The Grijalva-Usumacinta river delta functioning: challenge for coastal management. *Ocean Yearbook*, 23: 473-501.

Zárate Lomelí, D., T. Saavedra, J. L. Rojas, A Yáñez-Arancibia y E. Rivera Arriaga, 1999. Terms of reference towards an integrated management policy in the coastal zone of the Gulf of Mexico and the Caribbean. *Ocean & Coastal Management*, 42 (2-4): 345-368.

Zarate Lomelí, D. y A. Yáñez-Arancibia (Coord.), 2003. *Necesidades para la Gestión y el Manejo Integrado de la Zona Costera del Golfo de México y Mar Caribe*. Instituto de Ecología A. C., SEMARNAT Coordinación de Asesores del C. Secretario, Louisiana State University USA. INECOL, Xalapa, Ver., 16 pp.

Zarate Lomelí, D., A. Yáñez-Arancibia, J. W. Day, M. A. Ortiz, A. L. Lara-Domínguez, C. Ojeda de la Fuente, L. J. Morales Arjona y S. Guevara, 2007. Guidelines for the regional integrated coastal management program of the Gulf of Mexico and the Caribbean, p. 570-597. *In*: K. Withers y M. Nipper (Eds), *Environmental Analysis of the Gulf of Mexico*. Harte Research Institute for the Gulf of Mexico Studies, Special Publications Series No. 1. Texas A&M University Corpus Christi, 700 pp.

*In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 20010*

## **EL MAPA CLIMÁTICO COMO ESTRATEGIA HACIA POLÍTICAS PÚBLICAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE VERACRUZ**

**SAÚL MIRANDA ALONSO**

Centro Estatal de Estudios del Clima, Sub Coordinación en Investigación sobre Cambio  
Climático, Secretaría de Protección Civil, Gobierno del Estado de Veracruz,  
Calle 1ro de Septiembre No 1, Colonia Isleta, 91090 Xalapa, Xalapa, Ver., México  
*saul.malo@gmail.com*

### **RESUMEN**

El Estado de Veracruz está expuesto a diferentes hidrometeoros que vienen del mar y otros locales. Las variaciones esperadas con el cambio climático pueden tener repercusiones graves sobre el clima y los procesos marinos en la costa del estado. Un análisis de los datos climatológicos de los últimos 45 años, muestra cambios en los patrones climáticos al comparar el grupo de datos que comprende del 1976 hacia el pasado contra el grupo de datos del 1977 hacia el presente. La diferencia entre los dos grupos de datos resalta un aumento en el potencial para inundaciones en el sur de Veracruz a causa del aumento de la precipitación en la sierra de Oaxaca en las últimas dos décadas. Esto produce un aumento de los escurrimientos hacia las cuencas del Coatzacoalcos y el Papaloapan. En la cuenca del Pánuco y norte de Veracruz en general, también aumentó el peligro de inundaciones en las décadas recientes debido a un aumento de la precipitación exclusivamente en los meses de septiembre y octubre. En los demás meses la lluvia ha disminuido. La disminución de la precipitación y el aumento de la temperatura es un fuerte estrés para la zona norte de Veracruz. En todo el Estado llueve menos que hace dos décadas pero es especialmente notorio en el norte del Estado donde actualmente se registran sequías más acentuadas especialmente para los meses de junio y julio. Adicionalmente, un análisis de tendencias del clima muestra que la disminución de la precipitación y el aumento de temperatura continuarán para casi todo el estado. De las estrategias que está siguiendo el Gobierno de Veracruz, preparándose para el reto del cambio climático, es el proceso de asimilación del “Programa Veracruzano ante el Cambio Climático” como una base para la elaboración de políticas públicas para el Estado. También se creó el Centro Estatal de Estudios del Clima dentro de la Secretaría

de Protección Civil para pronosticar el tiempo y para monitorear, hacer investigación y educar a la población sobre los cambios que se avecinan para el clima.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Estado de Veracruz se encuentra situado en el Golfo de México y está expuesto al paso de huracanes, frentes fríos y ondas del este. Además cuenta con 745 kilómetros de costa con peligro de mareas de tormenta y trombas. No de menor importancia son sus granizadas en zonas de montaña, sistemas convectivos locales y las “suradas” en la zona de Córdoba y Orizaba. Con el cambio climático se espera el incremento del nivel del mar y el incremento en la potencia de las tormentas y sequías. Estamos inmersos en un cambio de patrones climáticos a nivel global que se irá intensificando y cada vez más moldeará a las civilizaciones futuras. El monitoreo de las condiciones climáticas regionales es esencial para armar el cuadro global de evolución del clima y para elaborar estrategias locales de adaptación que desemboquen en políticas públicas. Se presenta un análisis de las variables climatológicas que más afectan a la población y sus bienes, estas son: la temperatura máxima con su carácter enajenante y hasta inhibidor en el desempeño de las actividades humanas y el costo de reducir sus efectos consumiendo energía además del efecto en la salud de la población; la precipitación, fuente de la vida, pero cuyos extremos pueden ser devastadores, las sequías y las inundaciones. La temperatura mínima que generalmente asociamos con enfermedades respiratorias en el invierno pero que puede ser un alivio durante la noche después de un día con calor intenso. Este último parámetro no mostró mayor variación en los análisis y no se comenta (Flores-Zamudio, 2009). Se discuten estrategias que se están planeando para reducir los efectos del cambio climático a nivel regional. Los datos se analizaron en dos grupos, del 1976 hacia atrás y del 1977 hacia delante.

## 2. METODOLOGÍA Y DATOS

La Unidad del Servicio Meteorológico Nacional (USMN) tiene bajo su responsabilidad la base nacional de datos climatológicos. Son mediciones diarias efectuadas a las ocho de la mañana de temperatura máxima y mínima de las últimas 24 horas, y el acumulado de 24 horas de precipitación entre otras variables. La calidad de los datos es variable, así como la continuidad de los mismos. Esta base de datos climatológicos es el único registro de mediciones con que cuenta México que se remonta a más de 60 años en varias de sus estaciones. Actualmente funcionan más de 3200 estaciones en todo el país. Se utilizó la versión de marzo de 2008 de los datos climatológicos que opera la USMN. Se seleccionaron las estaciones que contaban con un 85% mínimo de datos por año y una continuidad mínimo de 45 años en su serie de datos. Se calcularon las tendencias lineales

en base a promedios mensuales para cada estación escogida. Se seleccionaron únicamente las estaciones con datos recientes que incluyeran al año 2000.

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), menciona que entre los años de 1976 y 1977 se inició un incremento en la pendiente de la temperatura para el planeta. Siguiendo este cambio en tendencia global, se dividieron las series de tiempo en dos, un primer grupo de datos con 21 años hasta el 1976 y un segundo grupo con 24 años desde el 1977 hacia el presente. El objetivo es observar si este cambio de tendencia también se refleja en las series de datos para Veracruz. La mayor parte de los datos van del año 1956 al 2000. Los datos usados cubren al estado de Veracruz más una franja de 100 kilómetros a partir de sus límites.

### **3. CAMBIOS EN EL PATRÓN DEL CLIMA**

#### **3.1 Precipitación**

##### **3.1.1 Las Inundaciones**

La temporada de lluvia empieza en junio para el sur del Estado y las zonas altas. La figura 1 muestra la diferencia de precipitación entre los dos grupos de datos para los meses de julio y agosto. Se observa una notoria variación en precipitación para la sierra de Oaxaca, especialmente en agosto con más de 200 mm, con un aumento en la precipitación en las últimas décadas aumentando el escurrimiento y el potencial para inundaciones en las cuencas de los ríos Coatzacoalcos y Papaloapan. En general, el incremento de precipitación en la sierra de Oaxaca va desde marzo a noviembre. Una gran cantidad de población vive en estas llanuras de inundación de las cuencas bajas y se encuentran en peligro durante cada temporada de lluvias (Tejeda-Martínez et al., 2006).

En los últimos 24 años y para el norte del Estado, está lloviendo más en los meses de septiembre y octubre que antes del 1976, figura 2. Este incremento de precipitación en los meses en que el suelo ya se encuentra húmedo por lluvias previas, dificultando las infiltraciones y favoreciendo los escurrimientos, aumenta el peligro de desbordes en la cuenca del río Pánuco. En general, aunque el norte de Veracruz presenta sequías cada vez más fuertes, estos dos meses presentan intensa lluvia.

##### **3.1.2 Las Sequías**

El análisis comparativo de los dos grupos de datos muestra que en los últimos años, excepto por septiembre y octubre, en los meses restantes la precipitación ha disminuido. En el norte, la disminución de precipitación es muy notoria en las décadas recientes, alcanzando los mayores valores de disminución en el mes de junio, Figura 4, el inicio de

la temporada de lluvias, y en menor grado para julio, Figura 1. Para el sur del estado, desde el mes de junio a octubre se muestra una disminución de precipitación para los años recientes en la zona costera para las cuencas del Pánuco y Papaloapan. Comparando contra los meses de abril y mayo que muestran variaciones positivas y negativas del orden de 20 mm como muestra la Figura 3 se observa el contraste de disminución de precipitación en los meses de junio y julio de más de 100 mm en algunos casos.

Abril, mayo y junio son los meses más calientes para Veracruz, pero mientras en junio empieza a llover en el sur y refresca, para el norte las lluvias se generalizan hasta septiembre con un intervalo de disminución de precipitación en julio y agosto denominado sequía intraestival o canícula. En los últimos años se observa un incremento en la temperatura máxima para el norte del Estado sobre todo para el mes de julio, y permanece igual o disminuye en el sur, figuras 5 y 6. Esto incrementa la magnitud de la sequía en la zona norte con un aumento de más de dos grados Celsius.

#### **4. TENDENCIA DEL CLIMA**

##### **4.1 Tendencia de la Precipitación**

La tendencia de la precipitación se calculó usando el método de Pearson (Wilks, 1995). Para el norte de Veracruz la tendencia actual general es a disminuir la precipitación aunque del 1976 hacia atrás fue una tendencia en todo Veracruz a más precipitación, excepto en el centro del Estado. Es notoria la tendencia positiva a más lluvia en la zona norte para las décadas anteriores a 1976 y ahora una tendencia negativa a menos lluvia para las décadas actuales. Esto mismo ocurre para las cuencas del Coatzacoalcos y Papaloapan aunque menos marcado.

##### **4.2 Tendencia de la Temperatura Máxima**

La tendencia actual de la temperatura máxima es a incrementarse en todo el estado. Antes del 1976 la tendencia era a disminuir sobre todo en el norte de Veracruz, con tendencia a incrementarse tan sólo en la cuenca del Coatzacoalcos.

#### **5. POLÍTICAS PÚBLICAS**

El Gobierno del Estado de Veracruz toma muy en serio la amenaza que representa el cambio climático y está tomando precauciones para coadyuvar a la defensa contra los

efectos nocivos de un cambio drástico en los patrones climáticos que se pronostica para las décadas y siglos próximos.

Para mantener una estrecha vigilancia de los fenómenos meteorológicos a corto y largo plazo, se ha creado un Centro Estatal de Estudios del Clima dentro del seno de la Secretaría de Protección Civil con una sección dedicada exclusivamente al monitoreo y estudio del cambio climático. Esta sección atiende al monitoreo del clima y a los avances científicos en el tema, realiza investigación en climatología y difunde a la población la información sobre cambio climático por conferencias, publicaciones de divulgación y boletines diarios.

La Universidad Veracruzana ha coordinado un esfuerzo de varios años, para crear el “Programa Veracruzano ante el Cambio Climático” junto con el auxilio del Instituto de Ecología A.C., el Instituto Nacional de Ecología, el Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM y con el patrocinio de la Embajada Británica (Tejeda-Martínez, 2009). Este programa se ha complementado con una serie de consultas públicas que se realizaron con la colaboración de la Secretaría de Protección Civil en las cinco ciudades más importantes del Estado. El trabajo final será entregado al Gobierno del Estado de Veracruz para su canalización a los cuerpos legislativos quienes analizarán las propuestas y decidirán sobre su implementación como políticas públicas.

## 6. CONCLUSIONES

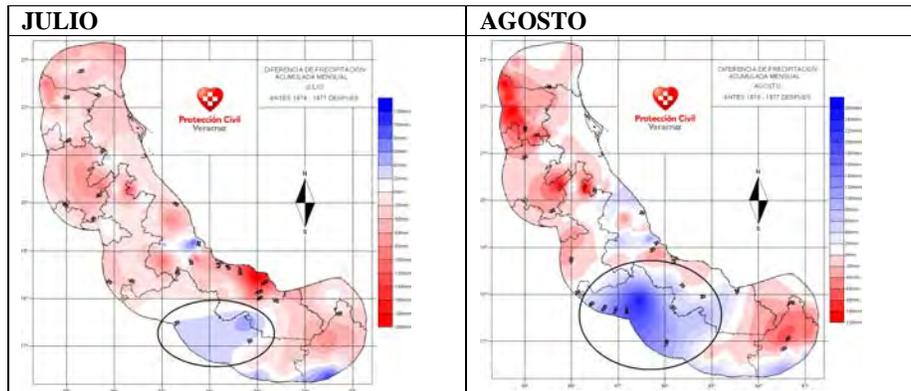
Estos resultados basados en datos medidos indican cambios en los patrones del clima y tendencias climáticas actuales para el estado de Veracruz. El decremento en la precipitación e incremento de la temperatura máxima es crucial para el norte del Estado. Se deben programar medidas más fuertes contra sequías más largas y frecuentes en el futuro. Sistemas adicionales para almacenaje de agua, rehabilitación de cuerpos de agua contaminados, cambio de cultivos y cría de ganado. El potencial de desbordes de ríos en prácticamente todo el Estado se ha incrementado. El manejo hidráulico de estas avenidas se debe mejorar científicamente. Se deben fortalecer los mecanismos de protección civil. Estos resultados dan la pauta para definir estrategias inmediatas a seguir y políticas públicas a establecer.

Dentro del Gobierno del Estado de Veracruz, en la Secretaría de Protección Civil, se ha creado una sección de Investigación en Cambio Climático para dar monitoreo a los avances y resultados nacionales e internacionales en el tema y contar con información actualizada para tomar decisiones más educadas.

El análisis de tendencias concuerda en general con las predicciones de algunos modelos globales como es el aumento de la temperatura y disminución de precipitación para zonas tropicales, aunque la incertidumbre de los modelos es muy apreciable y actualmente se encuentran bajo escrutinio por la comunidad científica.

### Agradecimientos

Se agradece el apoyo para la realización de este trabajo del Secretario de Protección Civil, Lic. Ranulfo Márquez Hernández. Las gráficas fueron elaboradas por el LCA Rodrigo H. Flores Zamudio. Los comentarios del LCA Federico Acevedo Rosas sobre la interpretación de los datos, siempre fueron atinados. Al Instituto de Ecología A. C. la invitación para participar en el Panel Internacional sobre Cambio Climático INECOL-2007 e INECOL-2008, coordinado por el Dr. Alejandro Yáñez-Arancibia.



**Figura 1.** Diferencia de precipitación para julio y agosto. Las elipses muestran aumento de lluvia en la sierra de Oaxaca. En esta sierra, desde mayo a noviembre la precipitación es mayor en las últimas dos décadas que en las dos décadas anteriores al 1976 (elipses en la parte sur). Para el mes de agosto la precipitación ha aumentado en más de 200 mm.

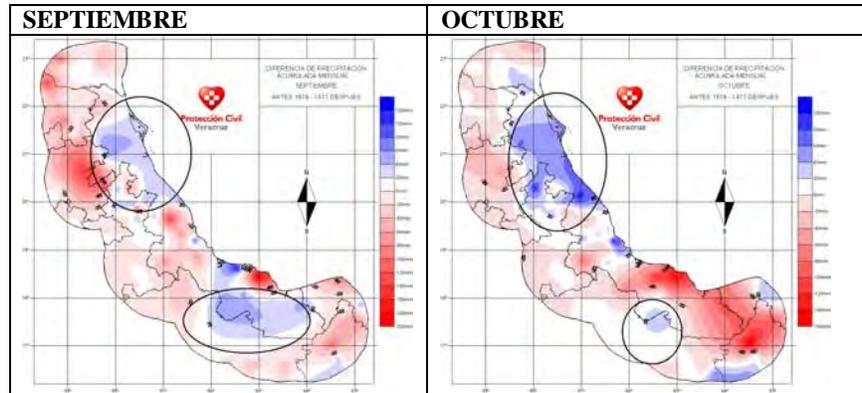


Figura 2. En el norte, en septiembre y octubre de los últimos 24 años llueve más que en los 21 años previos. La lluvia en el norte en estos dos meses aumenta el peligro de desbordes del río Pánuco (elipses en la parte superior). En octubre ha aumentado del orden de 80 mm.

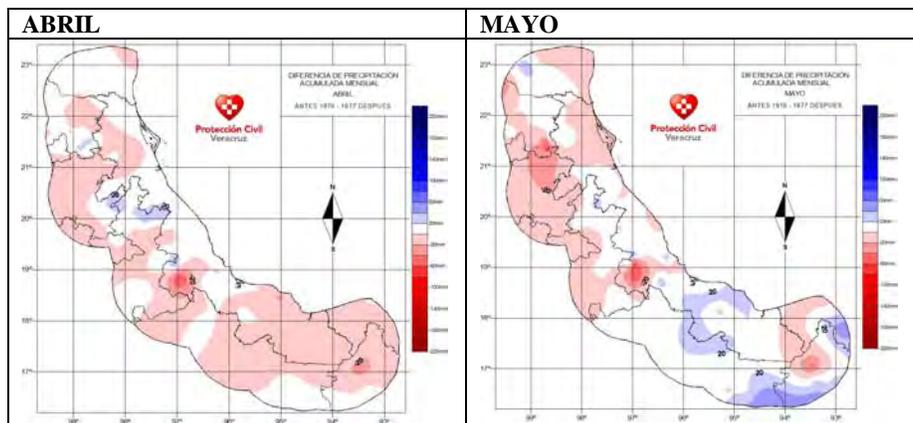


Figura 3. Diferencia de precipitación en los meses de abril y mayo. Las diferencias en los patrones son menores, pero la mayor parte es disminución de precipitación del orden de 20 mm (o sin cambio).

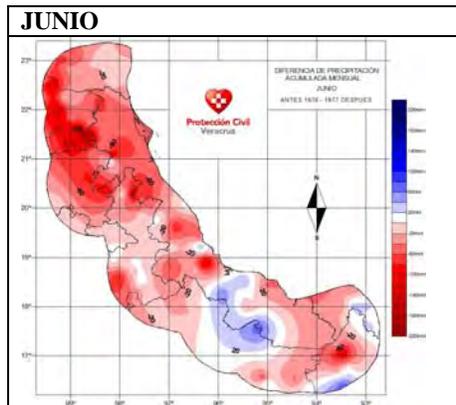


Figura 4. Diferencia de precipitación para los dos grupos de datos para el mes de junio mostrando disminución de precipitación de hasta 60 mm para la zona norte. 3.2 Temperatura máxima.

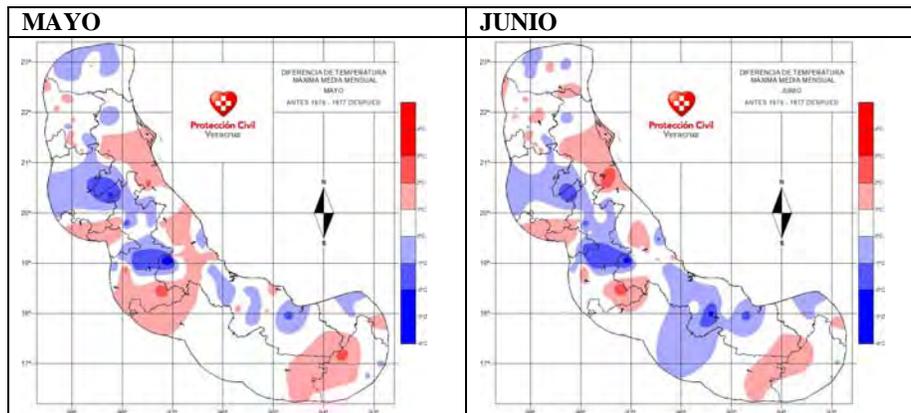


Figura 5. Gráficas de temperatura máxima para la temporada de calor. Se observa ligero calentamiento en el norte y centro de Veracruz. En el sur se mantiene estable o ligero enfriamiento.

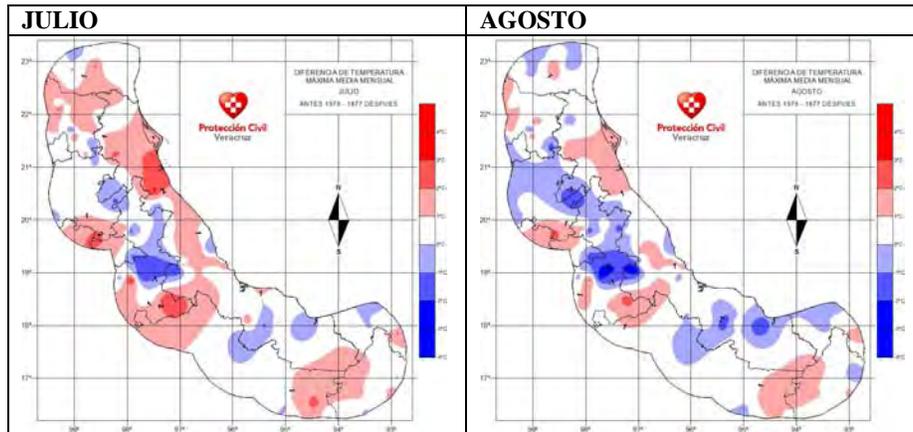


Figura 6. Gráficos de temperatura máxima para la temporada de calor. Aunque la diferencia no es muy grande, se observa el calentamiento en el norte y centro de Veracruz. Para las décadas actuales el calentamiento es de más de dos grados Celsius en el norte del Estado en julio.

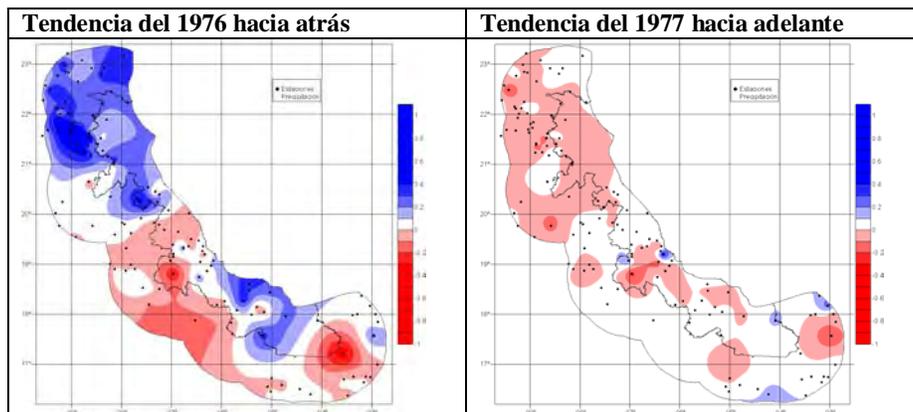
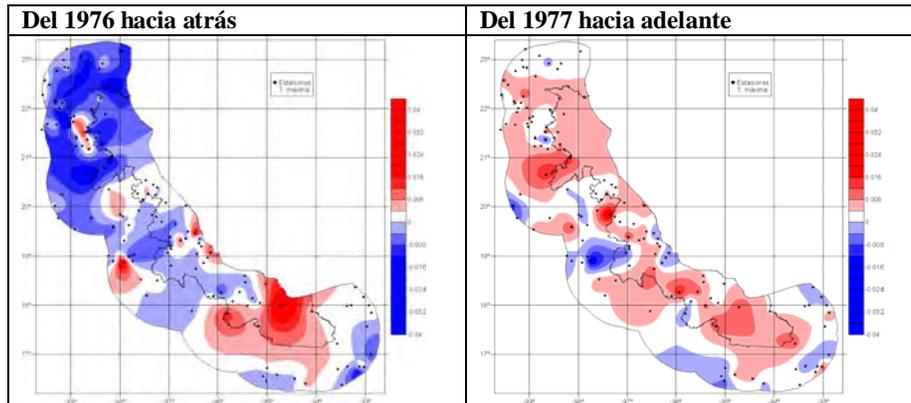


Figura 7. La tendencia en los años previos al 1976 era al aumento de la precipitación en la zona norte de Veracruz y en parte de las cuencas del Papaloapan y Coatzacoalcos. En los últimos años la tendencia es a decrecer de la lluvia o permanecer estable sobre todo en el sur del estado.



**Figura 8. La tendencia de la temperatura máxima era a disminuir para el norte y centro de Veracruz. Actualmente es a incrementarse en casi todo el estado.**

## 7. REFERENCIAS

Flores Zamudio, R, 2009. Atlas Climático Digital Actualizado del Estado de Veracruz, Tesis de licenciatura de la Universidad Veracruzana, Universidad Veracruzana, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, CP 91000

Tejeda-Martínez, A. (Coordinador de Proyecto), 2009. Programa Veracruzano ante el Cambio Climático, versión corregida y aumentada a partir de una consulta pública. Universidad Veracruzana, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, CP 91000

Tejeda-Martínez, A. y C. Welsh Rodríguez, 2006. Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, CP 91000

Wilks, D., 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press Inc., ISBN 0-12-751965-3

*In: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010*

**PANEL INECOL 2007 – CONCLUSIONES –  
LA ZONA COSTERA EN CRISIS EN EL GOLFO  
DE MEXICO, EL CARIBE Y EL MEDITERRANEO  
(Auditorio UNIRA, Instituto de Ecología A. C., 30 Agosto 2007)**

**ALEJANDRO YÁÑEZ-ARANCIBIA (Coordinador), JOHN W. DAY,  
JOHN S. JABOB, CARLES IBÁÑEZ MARTÍ,  
AMPARO MARTÍNEZ ARROYO, SAÚL MIRANDA ALONSO,  
ADALBERTO TEJEDA-MARTÍNEZ, CARLOS M. WELSH-RODRÍGUEZ,  
ARTURO CARRANZA-EDWARDS**



- El debate internacional sobre el cambio climático necesita un *enfoque totalmente nuevo*. En la comunidad científica el debate ya no es sobre si existe ó no el cambio climático, sino sobre los mecanismos específicos que inducen el cambio y cuales serán las magnitudes en el futuro.
- Se ha perdido mucho tiempo discutiendo sobre *responsabilidades históricas* en el calentamiento global. *Lo crítico es que el IPCC 2007* muestra que está habiendo un incremento dramático en la temperatura del aire y del agua del planeta, un ascenso en el nivel medio del mar, y cambios en los patrones de lluvias y sequías.
- Como medida de mitigación frente al cambio climático, la *planificación ambiental estratégica* es la piedra angular para hacer sustentable el desarrollo social, económico y ecológico de la zona costera.
- Desde las últimas décadas, existen evidencias contundentes que sugieren que la trayectoria exponencial del crecimiento, que muchos refieren como *el progreso*, no puede continuar indefinidamente, o por mucho tiempo más, sin enfrentar a la sociedad al umbral de una *nueva era de dramáticas consecuencias*.
- Las *actividades humanas están acelerando el cambio climático* y afectando el medio ambiente en escalas regional, continental y global. Esto es especialmente importante en las cuencas de los grandes ríos, donde se presenta pérdida de humedales a gran escala, deforestación exacerbada, y deterioro alarmante de la calidad del agua. *El principal disturbio sobre los ciclos naturales lo ha causado el impacto humano del desarrollo social y económico*.
- Este escenario, continúa *sin ser comprendido cabalmente en México* y abre una agenda prioritaria para la ecología de ecosistemas costeros en el siglo 21.
- Lluvias, sequías, vientos, huracanes y oleaje, están mostrando patrones atípicos, casi impredecible y teniendo como el principal insumo el calentamiento del océano especialmente en el Atlántico norte occidental, induciendo un *túnel térmico* que atraviesa el gran Caribe y llega con valores máximos al Golfo de México. *Estos eventos impactarán cada vez más los litorales en su costa Atlántica de México y los Estados Unidos*.
- El Siglo 21 *será un siglo de cambios para las costas del mundo*. Las grandes concentraciones urbanas expondrán a más y más gente a los peligros naturales de la costa, en particular a las tormentas severas y a las inundaciones, y destruirán además más y más hábitat natural.

- Para adaptarnos a estos cambios inevitables tendremos que *construir un nuevo paradigma urbano: la ciudad resiliente*. Pero hay *poca cultura de planificación* y aún *menos voluntad política* para hacer planes efectivos de largo plazo. La planificación ambiental estratégica puede reducir los efectos nocivos del crecimiento urbano no-controlado y del cambio climático.
- Adicionalmente, el escenario de crisis energética se deriva de la previsión de la *Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas Natural (ASPO)* de que la producción mundial de estos combustibles fósiles llegará en breve a su máximo y después entrará en declive hasta su *agotamiento definitivo* lo cual *será dramático antes de 25 años*.
- El análisis de los *impactos sobre las cuencas fluviales y zonas costeras* se debe concentrar en los siguientes aspectos: Recursos hídricos regulados. Impactos en la producción de energía hidroeléctrica y nuclear. Impactos en el regadío y la producción agrícola. Aumento considerable de la superficie de cultivos energéticos. Impactos en los sistemas costeros: ascenso del nivel del mar, déficit de sedimentos y subsidencia. Reducción de caudales en la cuenca y sus consecuencias en los ecosistemas fluvial y deltáico. Erosión de playas.
- En las costas del Golfo de México, el Caribe y el Mediterráneo, *los humedales costeros constituyen el principal testigo de los cambios globales*, p. ej., cambio de uso de suelo, colapso de recursos naturales, expansión urbana e industrial, degradación ambiental, cambio climático, costo y disponibilidad de energía, presión económica y social, incertidumbre metodológica de restauración, e incomprensión del manejo-ecosistémico de los humedales costeros.
- Para contender con estos problemas en diferentes latitudes en el siglo 21, aparecen *nuevos componentes en la ecuación de restaurar hábitat costeros*, p. ej.: cambio climático global, ascenso relativo del nivel medio del mar, subsidencia, acreción, derivación de los ríos, disponibilidad y costo de la energía, ecosistemas en auto-diseño, y unidades ambientales costeras regionales y sub regionales.
- Los *esfuerzos de restauración/rehabilitación, deberán ser mucho más intensos e incorporados en la planificación ambiental estratégica de la zona costera*, sobre todo para atenuar y mitigar los impactos del cambio climático, incluyendo el acelerado ascenso relativo del nivel medio del mar (en el Golfo de México p. ej., de 40 a 100 centímetros para fines de siglo), cambios en los patrones de precipitación (p. ej., más de 20% en altas montañas para fines de siglo), e

intensidad de tormentas severas (p. ej., más de 80% de huracanes de categoría 3, 4 y 5).

- Con la premisa que *sólo es sustentable el manejo basado en el funcionamiento del sistema ecológico*, la restauración/rehabilitación de humedales costeros hacia el futuro, debe ser colocada en un contexto social, político, económico y ecológico, entendiendo el enfoque-ecosistémico como primer paso en el proceso de rehabilitación.
- La alternativa ecosistémica de *rehabilitación de los humedales costeros es recuperar servicios ambientales esenciales*, como metabolismo de materia orgánica para mantener producción de biomasa útil, depuración de aguas residuales, dilución de la contaminación, retención de sedimentos y nutrientes, acreción sedimentaria para proteger la línea de costa fortaleciendo la vegetación costera y amortiguando la subsidencia para prevenir intrusión salina, control de inundaciones y protección de tormentas, regulación del clima, provisión de agua dulce limpia, recarga de agua subterráneas, suelo fértil, vida silvestre, asimilación de basura, otros.
- *Los humedales están siendo utilizados para tratar las aguas residuales municipales*. Esto es un método efectivo de costo/beneficio que resulta en incrementar la calidad del agua, fortalecer la productividad de los humedales, vigorizar el paisaje, y favorecer la acreción sedimentaria. Se debe fortalecer esta ruta tecnológica.
- El aprendizaje científico de los últimos 25 años ha sido enorme para *fortalecer las iniciativas de manejo integrado de la zona costera*, evaluando riesgos ecológicos y sugiriendo racionalidad en la toma de decisiones.
- *El manejo adaptativo es un proceso central en la rehabilitación de humedales costeros* y debe encausarse hacia: 1) actividades científicas que orienten soluciones requeridas para la rehabilitación, 2) construir puentes de conexión que aproximen las barreras científicas y de gestión para hacer más efectiva la ciencia integrada al manejo, 3) poner más atención para comprender los resultados y productos que fortalezcan la resiliencia del ecosistema frente a los cambios globales, 4) fortalecer la capacidad de la ciencia para caracterizar la incertidumbre y comunicarla con eficiencia y, 5) integrar modelos con base de datos, observaciones e investigación, para facilitar un manejo adaptativo eficaz.
- *Los huracanes severos se están intensificando desde los últimos 20 años*, provocando pérdidas humanas, destrucción de ecosistemas y daño económico en infraestructura, de enorme magnitud, induciendo incertidumbre para el desarrollo sustentable.

- La mayoría de las costas del Golfo de México -bajas, arenosas, con extensos humedales adyacentes, a menos de un metro sobre el nivel del mar- *representan la fracción de territorio Veracruzano más vulnerable al ascenso del nivel del mar*. Serán afectados poblados, el agua salina se infiltrará hasta los mantos freáticos, y las centrales eléctricas costeras (Tuxpan y Laguna Verde) serán afectadas directamente si aún siguen en operación dentro de medio siglo.
- En *cifras gruesas, en Veracruz se perderían* más de 600 kilómetros de playas, junto con más de 200 kilómetros de caminos y alrededor de 20 kilómetros de puertos marítimos actuales. Más de 3000 hectáreas urbanas se volverán francamente inundables al igual que cerca de 200 mil hectáreas de pastizales y agricultura.
- Se tiene por objeto que el *Estado de Veracruz cuente con un plan de acción ante efectos de variabilidad y cambio climático*. Este plan será transferido a tomadores de decisiones del gobierno estatal y difundido entre productores, empresarios, industriales y población en general.
- Debemos *enfrentar esto como una oportunidad para el desarrollo costero planificado*, como un enorme desafío de ajustar estrategias de sustentabilidad ambiental para el desarrollo económico, y aceptando también que la heterogeneidad ambiental y la biodiversidad, co-existen con el cambio climático y la vulnerabilidad costera del Golfo de México, del Caribe y del Mediterráneo, en una integridad ecológica que todavía no acabamos de comprender.
- Nos parece que *ahora el papel más importante de los ecólogos*, será cuantificar científicamente las conexiones entre el mundo natural y la sociedad humana, y ayudar a definir futuros patrones sustentables, donde nuevamente fluya la energía natural para sostener el funcionamiento de los ecosistemas.
- Los horizontes social, político, económico, ambiental, climático, energético, jurídico-normativo, y transfronterizo, son los insumos fundamentales para implementar urgentemente una *planificación ambiental estratégica para la zona costera* del Golfo de México y Caribe.
- Esta urgencia no puede esperar más.



*In:* A. Yáñez-Arancibia (Ed.) Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera.  
Instituto de Ecología A. C (INECOL), Texas Sea Grant Program,  
Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010

**PANEL INECOL 2008 – CONCLUSIONES –  
LA ZONA COSTERA Y SUS IMPACTOS  
ECOLÓGICOS, ECONÓMICOS Y SOCIALES  
(Auditorio UNIRA, Instituto de Ecología A. C., 16 Octubre 2008)**

**ALEJANDRO YÁÑEZ-ARANCIBIA (Coordinador), JOHN W. DAY,  
JOHN S. JABOB, CARLES IBÁÑEZ MARTÍ,  
AMPARO MARTÍNEZ ARROYO, SAÚL MIRANDA ALONSO,  
ADALBERTO TEJEDA-MARTÍNEZ, CARLOS M. WELSH-RODRÍGUEZ,  
ARTURO CARRANZA-EDWARDS**



- El cambio climático es un proceso en marcha. Esa discusión ya está terminada. El enfoque ahora es sobre las magnitudes de los parámetros indicativos y los impactos esperados sobre la zona costera. Los problemas son múltiples y el desafío principal es sobre mitigación y adaptación del escenario ambiental, económico y social, con el respaldo sólido de políticas públicas eficientes.
- El cambio climático es real. El calentamiento global es real. El ascenso del nivel del mar es real. Lluvias torrenciales catastróficas en un corto periodo de tiempo son reales. La mayor frecuencia de huracanes es real. La erosión de los litorales es real. La pérdida de suelo fértil es real. La marginación social es real. La incertidumbre económica es real. Y como sinergia, la crisis energética es real, cada vez más cara y disponibilidad en descenso.
- Ante este panorama, no habrá solución posible sin una relación integrada entre los sectores público, social, privado y académico. Políticas públicas no coyunturales, participación ciudadana, toma de decisiones sobre bases científicas y tecnológicas, planificación ambiental estratégica, uso de ingeniería ecológica y tecnologías ambientales que incorporen las entradas naturales de energía en los sistemas ecológicos costero, forman parte de la ecuación que busca soluciones sustentables.
- Todavía sigue pendiente las políticas públicas para orientar y normar la planificación ambiental estratégica de la zona costera del Golfo de México y Caribe. El 1er Panel Internacional sobre Cambio Climático: La Zona Costera en Crisis en el Golfo de México, el Caribe y el Mediterráneo INECOL 2007, marcó esa conclusión como de prioridad urgente. Esto sigue pendiente en México.
- Cada huracán causa un disturbio en un área mucho más amplia de donde arriba al continente, y eso causa un impacto económico mucho mayor, tanto por los preparativos de protección de la población, como por el posterior balance económico y social de damnificación, además del colapso de infraestructura urbana, agropecuaria, pesquera y turística.
- Si este patrón, de una o dos tormentas severas por año continúa, la costa de Texas, Louisiana, Veracruz, Tabasco y Campeche será fuertemente impactada en lo económico, en la calidad de vida, y en las perspectivas futuras de incorporar la costa al desarrollo sustentable.
- Las ciudades costeras no están preparadas para estas tormentas y huracanes y significa que estarán en un estado casi perpetuo de disturbio. La costa deberá enfrentarse a una nueva visión de planificación estratégica ambiental, a cambios en el modo de vivir, a distintas normas de construcción, y a nuevas políticas públicas con visión de sustentabilidad de mediano y largo plazo.

- En el corto plazo, no habrá presupuesto municipal, ni estatal, ni federal que soporte los gastos de emergencia anual, para mitigar los efectos ambientales, económicos y energéticos, que está causando el cambio climático en las costas del Golfo de México.
- La resiliencia urbana tiene que ser la “*nueva sustentabilidad*”. El cambio climático está empeorando los peligros costeros. El urbanismo está poniendo de manera irresponsable, más y más personas e infraestructura en vías de peligro. La resiliencia va más allá e incluye la habilidad de la población de recuperarse ante el impacto climático en un tiempo razonable y eso dependerá de nuevas políticas públicas, y construcciones fuertes y en mejores lugares.
- El crecimiento debe obedecer a un ordenamiento territorial -un ordenamiento hecho por científicos pero con amplia participación pública-. Esta participación pública tiene que extenderse desde la planificación.
- El Gobierno necesita ejercer liderazgo para exigir que los planes tengan elementos para la mitigación de peligros costeros, pero a la vez deberá permitir máxima autonomía local o municipal para el desarrollo de estos planes.
- Los planes para la mitigación deben incluir una evaluación detallada de la vulnerabilidad de diferentes poblaciones e instalaciones costeras. El cambio climático exige que se añada un estudio del “*máximo tirante de agua esperado en condiciones extremas*”, para cada elemento de infraestructura en riesgo de estos planes. Y esto se vincula directamente con la Evaluación Ambiental Estratégica que debe ser exigida a cualquier proyecto de desarrollo costero.
- La crisis global actual es en realidad el resultado de por lo menos cuatro crisis interrelacionadas: climática, energética, económica y ambiental.
- Esto implica un cambio de paradigmas, enfrentando el problema de manera trans disciplinar, porque la ciencia compartimentada no permite abordar la complejidad de los problemas y fracciona los esfuerzos.
- Se requiere una nueva forma de relación entre científicos de distintas disciplinas y de éstos con la sociedad para poder generar alternativas viables.
- Las políticas públicas requieren basarse en el conocimiento para poder adoptar un enfoque trans escalar (de lo local a lo global) y la visión que incluya el corto, el mediano y el largo plazo.
- El Golfo de México es el final del túnel de un embudo térmico que se inicia en el Atlántico Norte, incrementa su potencial en el Mar Caribe y arriba al Golfo con su máxima carga energética.

- Esto le otorga al Golfo de México y la costa Caribe altos niveles de vulnerabilidad, por erosión litoral, inundaciones persistentes de la planicie costera, gran descarga de ríos por lluvias torrenciales, destrucción expansiva de los asentamientos humanos, colapso de la agricultura de tierras bajas, incertidumbre pesquera, insustentabilidad del turismo, e incertidumbre para la expansión industrial.
- La zona templada del Golfo de México se está reduciendo dramáticamente y la zona tropical avanza hasta el litoral norte del Golfo. Algunos parámetros típicos de áreas tropicales como gran descarga de ríos, gran aporte sedimentario, mayores concentraciones de nutrientes, metabolismo de intensa producción/respiración de la columna de agua, se manifiestan prácticamente en todo el litoral del Golfo, siendo más evidente en la sonda del Mississippi y la sonda de Campeche.
- La tropicalización global del Golfo de México parece ser un mecanismo de adaptación ecosistémica de la zona costera al cambio climático. El caso de la expansión latitudinal de los Manglares es un buen indicador.
- Los Manglares como hábitat forestado crítico de la zona costera presentan respuestas de acomodación frente a la variabilidad ambiental que induce el cambio climático, desarrollando un papel estructural y funcional clave en la estabilidad de la línea de costa, la persistencia de hábitat y biodiversidad, el metabolismo y productividad del ecosistema, reduciendo riesgos e incertidumbre para el desarrollo sustentable del uso de sus recursos. Su distribución está siendo consistente en todo el Golfo de México. Esto es importante porque los manglares son típicos de costas tropicales y se presentan como un buen indicador de esta anomalía climática.
- Estamos inmersos en un cambio de patrones climáticos a nivel global que se irá intensificando y cada vez más moldeará a las civilizaciones futuras y a la expansión urbana costera.
- El monitoreo de las condiciones climáticas regionales en Veracruz es esencial para armar el cuadro global de evolución del cambio climático y para elaborar estrategias locales de mitigación que desemboquen en políticas públicas, para cada región Veracruzana.
- El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), señala que entre los años de 1976 y 1977 se inició un incremento en la pendiente de la temperatura para el planeta. De manera que para los estudios en el Estado de Veracruz se dividen las series de tiempo en dos, hasta el año 1976 y desde el año 1977 hacia adelante. Esto resulta práctico para observar si este

cambio también es claro en las series de datos veracruzanos. El periodo total de análisis para presentar el mapa climático de Veracruz es del año 1956 al 2000.

- Para los primeros 21 años, del 1956 al 1976, se observa una pendiente positiva en la precipitación. Esto es un incremento de precipitación con el tiempo para la zona norte y sur. Para la zona centro la pendiente es negativa, una tendencia a disminuir la precipitación.
- Para la segunda parte 1977-2000, cambia el panorama y tenemos una pendiente negativa o nula para todo el estado. Esto es, un decremento generalizado en la precipitación para los últimos 24 años.
- Sin embargo, la principal anomalía son las lluvias torrenciales de gran volumen en un periodo muy corto de tiempo. También parece evidente que el gran caudal de los ríos no se debe a lluvias sobre la zona costera, sino a las lluvias torrenciales en la sierra (*efecto montaña*) que descargan su impacto hacia los litorales. Esto es evidente en el caso del Río Mississippi (que nace en Canadá), el Usumacinta (que nace en Guatemala), el Papaloapan que nace en Puebla y Oaxaca, el Tuxpan que nace en Hidalgo y Puebla, y el Pánuco que nace en el valle de México.
- Para la temperatura máxima, la primera parte de los datos, 1956-1976, la pendiente es negativa en el norte y centro y positiva en el sur, indicando que existió una tendencia a tener temperaturas máximas menores. Para la parte más reciente de los datos, la pendiente es en su mayoría positiva, esto es, incremento general en temperaturas máximas para todo el estado.
- Para la temperatura mínima, durante el periodo 1956-1976 la pendiente es neutra o ligeramente negativa para el centro de Veracruz y el resto nulo. La tendencia era a disminuir las temperaturas mínimas en todo el estado o mantenerse invariable. Para el periodo más reciente, 1977-2000, el patrón se mantiene con ligeras modificaciones.
- Estos resultados dan la pauta para definir estrategias inmediatas a seguir y políticas públicas a establecer. El Gobierno del Estado de Veracruz, en la Secretaría de Protección Civil, ha creado una Sub Coordinación de Investigación en Cambio Climático para dar monitoreo a los avances y resultados nacionales e internacionales en el tema y contar con información actualizada para tomar decisiones más educadas.
- Con financiamiento del Gobierno Británico y apoyo del Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), de abril 2006 a marzo 2008, se está integrando un

documento para que el Estado de Veracruz cuente con un plan de acción ante efectos de variabilidad y cambio climático.

- Las bases de datos de calidad y análisis de variabilidad climática; tanto para escenarios climáticos regionales (décadas de 2020, 2050 y 2080), como para escenarios de vulnerabilidad y medidas de adaptación y mitigación, disponibilidad de agua, biodiversidad, agricultura, pesca, ganadería, salud humana, asentamientos humanos y vivienda; permiten visualizar el impacto futuro del cambio climático sobre las costas y su infraestructura en Veracruz.
- La mayoría de las costas del Golfo de México –bajas, arenosas, con extensos humedales adyacentes, a menos de un metro sobre el nivel del mar-, representan la fracción de territorio Veracruzano más vulnerable al ascenso del nivel del mar. Serán afectados poblados, el agua salina se infiltrará hasta los mantos freáticos y las centrales eléctricas costeras (Tuxpan y Laguna Verde) serán afectadas directamente si aún siguen en operación a mediados de siglo. En cifras gruesas, se perderán más de 600 kilómetros de playas, junto con más de 200 kilómetros de caminos y alrededor de 20 kilómetros de puertos marítimos actuales. Más de 3000 hectáreas urbanas se volverán inundables al igual que cerca de 200,000 hectáreas de pastizales y agricultura costera.
- El Golfo de México y la costa Caribe de la Península de Yucatán, están considerados entre los litorales más vulnerables al Cambio Climático. El proceso es irreversible y el drama de un círculo vicioso se repetirá cada año, cada vez más severo, y cada vez más caro, casi incosteable. El círculo vicioso de acciones coyunturales, esta eludiendo la responsabilidad gubernamental de establecer cuanto antes una política de planificación ambiental estratégica para la zona costera de la porción mexicana del Golfo de México y Mar Caribe.
- Sin una planificación ambiental estratégica, incluido en ella la evaluación ambiental estratégica con enfoque de ecosistema para la Zona Costera, no se vislumbra la interrupción de la ruta insustentable que prevalece. Para esto se requiere la integración metodológica de las normas de política ambiental, las variables del marco ecológico, el soporte del marco jurídico, los parámetros sociales, y el horizonte económico, para el desarrollo sustentable de las costas mexicanas.

**Enlaces bibliográficos recientes:**

- 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. URL: <http://www.ine.gob.mx/download/huracanes2005.pdf>
- Galindo Paliza, L. M., 2009. La Economía del Cambio Climático en México – Síntesis. Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP), Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México DF, 67 pp.
- SEGOB, 2009. Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la Republica Mexicana en el Año 2007. Serie Impactos Volumen 9, Secretaria de Gobernación, Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED, México DF, 619 pp.
- Programa Veracruzano de Acción ante el Cambio Climático, 2009. URL: <http://www.semarnat.gob.mx/estados/veracruz/noticias/eventos/Pages/PVCC.aspx>

