

Ortíz-Pérez, M.A., J.R. Hernández-Santana, J.M. Figueroa Mah Eng, y L. Gama Campillo, 2010. Tasas del avance transgresivo y regresivo en el frente deltaico tabasqueño: en el periodo comprendido del año 1995 al 2008, p. 305-324. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMVL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Tasas del avance transgresivo y regresivo en el frente deltaico tabasqueño: en el periodo comprendido del año 1995 al 2008

*M. A. Ortíz-Pérez, J.R. Hernández-Santana,
J. M. Figueroa Mah Eng y L. Gama Campillo*

RESUMEN

La investigación se enfoca en los impactos de erosión y acumulación debido al ascenso del nivel medio del mar. Se divide la costa de Tabasco en sectores homogéneos en función de la geomorfología, midiendo las modificaciones de la línea de costa, a través de la pérdida o ganancia de nuevos terrenos; el análisis comparativo se lleva a cabo con las bases cartográficas del año 1995, a escala 1: 50 000 y las imágenes aéreas del año 2008. Se calculan las tasas de retroceso *versus* avance de la línea de costa, reconociendo a los sectores más frágiles.

Palabras clave: erosión, ascenso del nivel medio del mar, línea de costa

INTRODUCCIÓN

El planteamiento del problema que anima para llevar a cabo este estudio, es con el fin de conocer e identificar qué sectores de la línea de costa presentan cambios espaciales extremos, los de mayor transformación, debido a la destrucción de tierras en el frente deltaico tabasqueño. En este momento este estudio representa el análisis comparativo de las líneas de costa del período temporal 1995-2008, visto desde el enfoque espacio-temporal, identificando y estimando los cambios en las fechas más recientes. El estudio forma parte de una serie de trabajos realizados dentro del programa del estudio de cambio climático de Semarnat, coordinado por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, además de los realizados con anterioridad en el complejo deltaico y en la costa del Golfo de México (Hernández, *et al.* 2008; Ortiz, 1992; Ortiz

y Benítez, 1996; Ortiz *et al.*, 1996b; Psuty, 1965, 1967), todos los cuales confirman, de forma reiterada, los estragos en la destrucción de la costa. Como parte del estudio de esta misma problemática se continua evaluando los cambios recientes en las entradas consideradas como vías de agua (bocas, esteros, brazos), debido a la modificación que puede resultar en la circulación del drenaje, para luego relacionarla con las nuevas áreas de inundación en la franja costera de tierras bajas, y seguir más adelante con el hilo conductor del fenómeno de la salinización de suelos y aguas, que representa a nuestro juicio, la transformación de mayor repercusión ambiental y, por ende, con importantes consecuencias críticas en los ecosistemas y actividades económicas de la población.

OBJETIVO GENERAL

Medir las tasas de retroceso y avance de la línea de costa, que nos permita conocer la velocidad de erosión y de acumulación rápida, ocurrida en los últimos trece años, (desde 1995 a 2008), como producto del ascenso del nivel medio del mar y ligarla también a la subsidencia de la cuenca geológica marginal, hecho que es propiciado por la compactación

de los sedimentos y la extracción de aceites y gas. Sin embargo, junto con esto y en contraposición, se tiene al proceso de sedimentación del sistema deltaico Grijalva, Mezcalapa y Usumacinta (figura 1), zona de tierras bajas, sobre las cuales, reconoce el 35% del volumen del escurrimiento total de los ríos del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la base cartográfica digital de INEGI, a escala 1: 50 000 de marzo del año de 1995,

la cual cuenta con las propiedades métricas siguientes: Esferoide GRS 80, Datum ITRF 92,

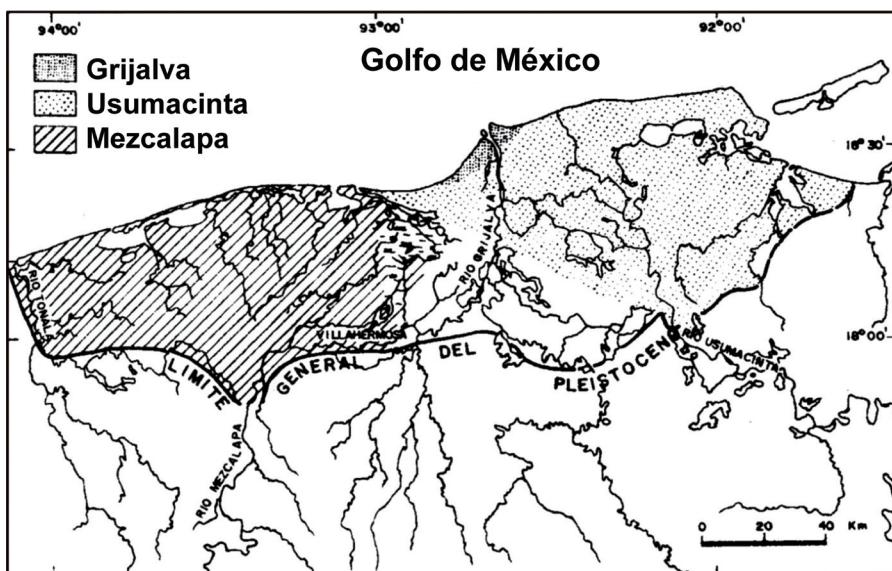


Figura 1. Área de estudio del complejo deltaico tabasqueño, figura tomada de West *et al.* (1969).

Proyección UTM; sobre la cual se hizo la restauración fotogramétrica de las imágenes aéreas a color de INEGI, a escala 1: 40 000, con fecha de vuelo obtenida en marzo del año 2008.

Se escanearon 35 fotografías con una resolución de 600 dpi y se procedió a identificar y colocar puntos de control establecidos con la ayuda del Sistema de Información Geográfica, permitiendo armar el mosaico que cubre el litoral del estado de Tabasco. El rango de error calculado en el SIG para las mediciones realizadas en la fotografía fue de ± 1 metro.

Los procesos descritos se llevaron a cabo en el modulo de ArcMap del sistema ArcGis

versión 9.2. Con la base topográfica digital, obtenida a partir de fotografías aéreas de marzo de 1995, se sobrepuso la configuración geo-referenciada de la línea de costa, obtenida de las imágenes del 2008. Con la confección de esta base cartográfica se efectuaron las medidas métricas, midiendo la diferencia del tamaño, de una con respecto a la otra, para estimar la pérdida y ganancia de tierras y, de esta manera, medir los cambios mediante la diferenciación espacial y temporal de la línea de costa durante el lapso en cuestión.

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA ESPACIAL

Con el fin de establecer un análisis comparativo, primero se seleccionó y se identificó a las costas de tipo de barrera y deltaica, en función de su fisonomía y geomorfología semejante,

con el objetivo de definir las áreas con sectores relativamente homogéneos o análogos, a fin de identificarlos y diferenciarlos. Hay que mencionar, que todos los tramos guardan su

sello distintivo, además de estar delimitadas por fronteras naturales como son las bocanas que limitan en los extremos de la barrera o en las desembocaduras de cursos de ríos estuarinos (figura 2). También hay tramos de costa que se separaron en función del dominio, ya sea de procesos sedimentarios acumulativos o los de destrucción erosiva.

Posteriormente, como se explicó, se georeferencian ambas líneas de costa, referidas a las dos fechas distintas y se miden las superficies y la distancia media del retroceso y avance de cada sector seleccionado (figura 3), graficando los valores y describiendo los cambios geomorfológicos sobresalientes.

Sectorización de la costa:

- **Sector 1.** Boca del río Tonalá a boca Santa Ana Bocana de la laguna del Carmen” Sánchez Magallanes”.
- **Sector 2.** Boca Santa Ana a boca Panteones (isla barrera de las lagunas Carmen y Machona).

- **Sector 3.** Boca Panteones a la boca de la barra Tupilco.
- **Sector 4.** Barra Tupilco a Puerto Dos Bocas (al espigón occidental).
- **Sector 5.** Trecho del puerto Dos Bocas (comprende desde el espigón occidental hasta el último espigón oriental del puerto).
- **Sector 6.** Desde el espigón oriental del puerto Dos Bocas - al estuario del río González (Barra Chiltepec).
- **Sector 7.** Estuario del río González (Barra Chiltepec) hasta el brazo occidental del delta del río Grijalva.
- **Sector 8.** El primer brazo del delta del río Grijalva hasta el límite del flanco oriental del delta.
- **Sector 9.** Límite del flanco oriental del delta del Grijalva hasta Campeche, a 16 km al oriente de la desembocadura del río San Pedro- San Pablo.



Figura 2. Sectores en los que se dividió la costa deltaica, en función de la homogeneidad de su fisonomía.

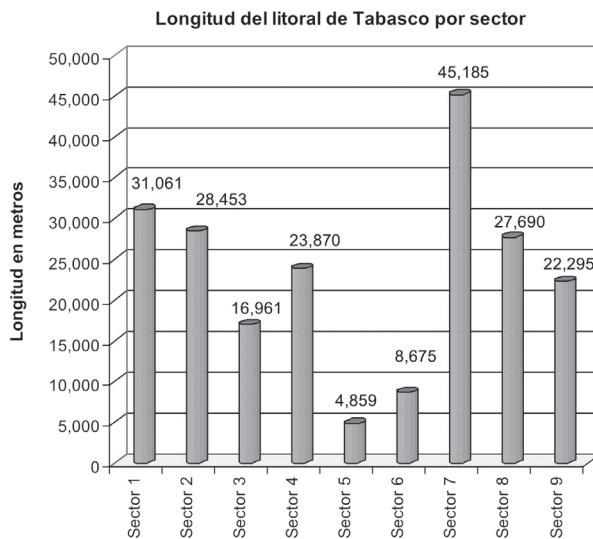


Figura 3. Extensión longitudinal de la línea de costa (en km), dividida en sectores en función de las características geomorfológicas.

RESULTADOS

El comportamiento transgresivo de la costa se identifica cuando hay un avance de la línea de costa tierra adentro, sobre la porción continental, y hay regresión, cuando ocurre un avance de la línea de costa sobre el mar, como acontece en los deltas activos. Precisamente estos fenómenos tienen semejante ocurrencia en el caso del complejo deltaico en análisis, tales cambios de la línea de costa, son expuestos atendiendo en el orden de la magnitud potencial de mayor a menor modificación.

COMPORTAMIENTO REGRESIVO

El delta del río Grijalva es el más reciente del complejo deltaico, se ha formado cuando menos en los últimos 2 000 años, es decir el último lapso del Holoceno, se le identifica con el sector 8, en donde se ha estado edificando la porción frontal del delta que sale en

dirección al mar, fuera de la traza general de la línea de costa de manera conspicua (figuras 1 y 4). Los valores de avance en el periodo de referencia en dirección al mar, cubren una extensión de poco más de un km^2 es decir, una superficie de, 1 105 858 m^2 valor que se reparte al dividirlo por los 27 690 metros de longitud de costa en el trecho del sector 8, (tabla 1, figura 5), así se obtiene el desarrollo de una franja hipotética representativa de todo el trecho en cuestión que se agrega a la línea de costa que en este caso, es de cerca de 40m de ancho en promedio, magnitud que se divide por los trece años del periodo de análisis para arrojar una tasa de avance 3 m en promedio al año. Si consideramos el valor local extremo de máximo avance en el ápice del delta, se tendría un avance de 818 m, cantidad que al ser dividida entre el periodo de análisis se establece una tasa media al año que

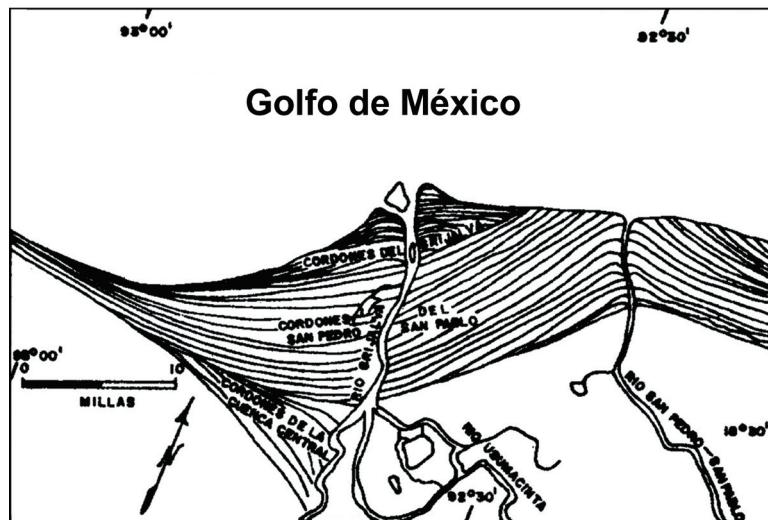


Figura 4. Delta del Grijalva mostrando la configuración asimétrica de los flancos. Se ilustra la disposición truncada de cordones de playa antiguas del anterior delta del Usumacinta (Figura tomada de West *et al.*, 1969).

Tabla 1. Áreas del avance y retroceso de la franja costera de Tabasco.

No	Nombre del sector	Avance m ²	Retroceso m ²
Sector 1	Desde el río Tonalá hasta la barra de Santa Ana (Boca del Carmen)	273 181.37	249 325.89
Sector 2	Desde barra de Santa Ana (Boca del Carmen) hasta boca Panteones	115 273.15	506 637.68
Sector 3	Desde boca Panteones hasta barra Tupilco	211 962.97	449 997.58
Sector 4	Desde barra Tupilco hasta el 1er espigón occidental del puerto de Dos Bocas	114 449.53	534 288.05
Sector 5	Entre el 1er espigón occidental hasta el último espigón oriental del puerto de Dos Bocas	19 082.57	81 276.42
Sector 6	Desde el espigón oriental del puerto dos Bocas hasta boca González (Barra Chiltepec)	177 042.89	667 324.41
Sector 7	Boca González hasta el brazo occidental del delta del río Grijalva	1 174 569.55	558 046.92
Sector 8	Desde el brazo occidental del delta del río Grijalva hasta el límite del flanco oriental del delta del río Grijalva	1 105 858.06	1 044 954.06
Sector 9	Límite del flanco oriental hasta 16 km después al oriente de la boca del río San Pedro – San Pablo	128 699.47	1 012 718.96
Totales		3 320 119.57	5 104 569.97

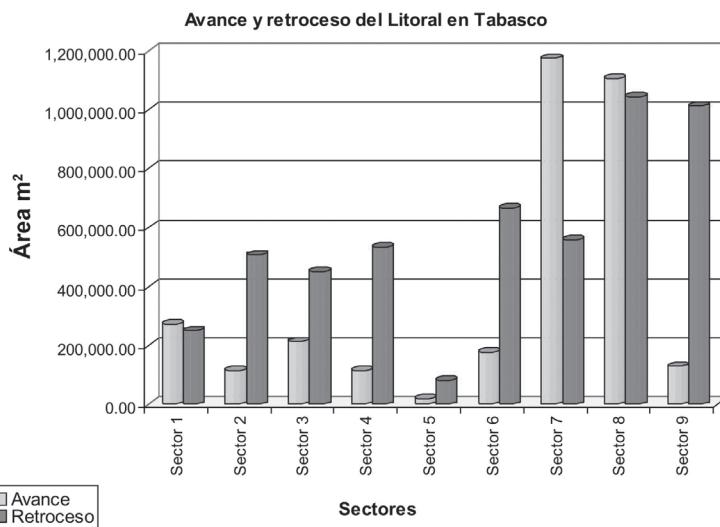


Figura 5. Balance entre la erosión y la acumulación, y su expresión en la distribución de las superficies de tierras ganadas y perdidas.

se aproxima muy cerca de los 63 m. Son valores que evidencian una fuerte actividad de los procesos de sedimentación y acrecentamiento en el frente del delta, mismo que se extiende en su ápice o punta y flancos adyacentes por una longitud de costa poco más de 16.5 km. Ahora si tomamos en consideración a todo el frente deltaico con sus flancos respectivos, observamos que en una vista en planta, adquiere una configuración similar a una punta de flecha o de forma de cúspide o “cuspada”, pero con el trazo notoriamente asimétrico (figura 4), toda vez que el flanco oriental que se extiende hasta cerca de la desembocadura del río San Pedro y San Pablo, no presenta el embalamiento formado por el arco de concavidad expuesto hacia el mar, tal como se exhibe con el trazo arqueado del flanco occidental.

Por otro lado, la disimetría no solo es debido a la configuración, pues también se relaciona con la diferencia de valor en la longitud de los flancos, el occidental es mucho más

extenso, superando en unos 18 km al flanco oriental, estos cambios se reflejan en las diferencias de velocidad de sedimentación, superando la tasa en un metro de avance al año, con respecto al sector 7 del flanco occidental del delta, ya que el sector 8 centro-oriental representa al depocentro de mayor acrecentamiento. Si bien, en ambos flancos del delta se presentan claras evidencias de avance, mismos que han superado a los valores de retroceso de la línea de costa. De este modo, en el flanco occidental correspondiente al sector 7 se genera un avance territorial de un km ciento sesenta y cuatro mil metros cuadrados, que dividido entre los 45 km de longitud, se desarrolla una franja nueva de playa continua de más de 26 metros de ancho, dimensión que una vez dividida entre los 13 años del periodo de análisis, se obtiene una tasa de dos metros por año.

El sector 1, es tercer tramo que presenta un avance aunque con un superávit mínimo de



Figura 6. Detalle de la destrucción del manglar, ausencia del perfil de playa arenosa, el impacto tiene lugar sobre afloramientos de roca de playa “caprock”. Foto obtenida en las cercanías de la barra de Túpilco.

terreno ganado al mar de poco más de dos hectáreas, que al distribuirla con la extensión lineal de 31 km la costa equivaldría a tener un cinturón de solo 76 cm de ancho y por ende en el periodo de análisis se tendría una acreción media de 5.9 cm por año. Dada la magnitud de valores promedios, estos no son nada significativos, toda vez que nos indicarían más bien, una estabilidad y equilibrio de la barrera. Empero aceptar esta condición sería inaceptable, ya que a lo largo del sector existe una clara diferenciación de comportamiento desigual en términos de erosión y acumulación. El trecho oriental “Sánchez Magallanes” hay evidencias claras de erosión acelerada de la costa, con los resultados siguientes, se registra un punto de la línea de costa distante a 19192 m de la escollera de Sánchez Magallanes, sitio sobre el que se limita el contacto entre

ambos trechos, el occidental y el oriental, de este último con evidencias de inestabilidad por retroceso del litoral, del cual, en el periodo de análisis de trece años perdió un área de 192 909.47m² extensión que una vez dividida por la longitud del tramo oriental aparecería como una remoción equivalente a una franja de diez metros de ancho, es decir, con una cadencia de unos 0.77 m o alrededor de tres cuartas partes de un metro de retroceso al año. Mientras en el trecho occidental con 11 870 m de extensión, existe un dominio de la acumulación sedimentaria, ganando terreno al mar en 206 674 m² que puede expresarse convencionalmente como una faja de 17.41 m de ancho que se traduce en un incremento del avance hacia el mar en 1.34 m por año. Cambios de la costa que se explican al contar en el extremo occidental del sector, con

una fuente cercana de sedimentos que es la del río Tonalá y a la que, se agrega la corriente de deriva playera que fluye siempre y casi todo el año de oriente a poniente, incluso en invierno, en la época de nortes se establece un patrón de circulación de corrientes litorales encontradas que derivan hacia el mar en el tramo comprendido entre el río Coatzacoalcos y el río Tonalá, sin llegar a influir sensiblemente en este sector. En cambio en el trecho oriental afectado por la erosión, se explica por la operación de un extenso espigón que tiene como objetivo reducir el transporte de sedimentos de la corriente longitudinal de playa que proviene del oriente y que fue instalado en la ribera este de la boca de Santana a un lado de la localidad de Sánchez Magallanes, a fin de contener la deriva playera y de salvaguardar la entrada de los azolves. De este modo, podemos concluir que a pesar de la evidente regularidad de la estructura espacial de la barrera, hay una diferenciación de categorías inferiores operando en sentido contrario, a la manera de procesos antípodos que tienen lugar dentro del marco de la unicidad del paisaje de barrera, pero que solo, son observables en escalas de detalle.

COMPORTAMIENTO TRANSGRESIVO

Se observa y se evidencia con la existencia de nuevas superficies inundadas de la zona costera y por supuesto en la destrucción de playas y el registro de forma numérica del retroceso franco de la línea de costa debida a la erosión. Es evidente el ingreso de agua de mar con el oleaje modelando el perfil de la playa de mayor altura, identificado ahora, como la zona de postplaya, conocida también por

(tras-playa o “backshore”) (figuras 6 y 7), la cual junto con el viento, acarrean material sedimentario re-movilizado en las mareas de tormenta o de viento, aportando además de arenas, escombros y una fracción de fragmentos de conchas en los primeros metros de la franja litoral de la postplaya (figura 8).

Los resultados arrojan que el impacto del ascenso del nivel medio del mar se manifiesta en seis de los nueve sectores en los que se dividió la costa de Tabasco (figura 2).

Considerando los registros extremos con los valores más contrastantes, se tiene al Sector 6, que cubre el flanco occidental del delta del Mezcalapa, en el cual se establece, desde el puerto de Dos Bocas hasta la barra de Chil-



Figura 7. Imagen de la destrucción en plantaciones de palmeras, en terrenos que corresponden a los campos arenosos de cordones de playas antiguas. Barra de Chiltepec, Tabasco.



Figura 8. Proceso de acumulación sedimentaria de un ambiente relictico de marisma, sepultando a la comunidad de mangle rojo. A partir de la remoción eólica de arenas de la postplaya. Barra de La Laguna Redonda.

tepec en la desembocadura del río González. La costa de barrera se extiende por 8 675 m de longitud, protege y limita a la laguna de Dos Bocas, conocida así por contener en la entrada de la bocana una barra amplia que divide la entrada en dos bocas, es aquí donde los cambios de los últimos trece años (1995-2008) han modificando, de forma significativa, la configuración de la línea de costa, el proceso de remoción se traduce en una disminución de la superficie de barra en más de medio km^2 667 324 m^2 , extensión que una vez que se divide por el largo de la barrera de Chiltepec de 8 675 m, con el fin de distribuir y homogeneizar pérdida de terreno o de playa en una franja de 77 m ancho a lo largo del sector. De este modo la velocidad de retroceso en promedio es de una tasa de 6 m/ año (figura 9). Representa la cifra record más extrema de carácter alarmante, y la pregunta obligada

en este caso es responder el por qué ocurre en el sector de la barrera en cuestión, habría que pensar en una concentración de mayor energía física en el medio y si no, en una elevada fragilidad de la isla barrera ante los procesos costeros de erosión. No hay duda, de la influencia que pueda ejercer la configuración geomorfológica de la amplia bocana que luego, es dividida en dos accesos de esteros de dirección divergente, en donde dicho arreglo fisiográfico y con el perfil de fondo somero adyacente, existirán las condiciones para la ocurrencia y reconocimiento de los patrones de difracción del oleaje que rotan y se entrecruzan modelando y removiendo las orillas arenosas, catalizadas por la concentración de la energía del oleaje erosivo, tanto las márgenes externas como las internas de la barrera. Desde luego, otro argumento accesorio del mismo impacto, se debe a el emplazamiento



Figura 9. Tasa anual de retroceso y avance potencial registrado en los diferentes sectores de la línea de costa en el período de 1995 y 2008.

espacial de la línea de costa, localizado como un trecho de barrera que se inflexiona, debido a que se ubica en la transición entre la saliente arqueada del antiguo delta del Mezcalapa y el embalse formado a partir de la configuración cóncava del flanco occidental del delta del río Grijalva. Tramo que contrasta entre las orillas de ambos deltas, al haber un cambio de rumbo o inflexión de la línea de costa, en la cual además, tienen salida o acceso, el estuario del río González y el mismo sistema de Dos Bocas. Con tal arreglo fisiográfico de la costa estarán a merced de los cambios de los patrones estacionales de oleaje, principalmente de los que provienen de los rumbos noreste, este y el de los nortes. Siendo este tramo clave, como urgencia estratégica para la restauración y la protección, dada la vulnerabilidad espacial de su localización.

Sector 9, se ordena en una categoría inferior por la magnitud de los cambios espaciales de la línea de costa. Corresponde al único tramo, en donde no existe prácticamente una barrera

en sentido estricto, toda vez que se trata de la planicie del delta extinto del río Usumacinta, en donde el arreglo de cordones se disponen de manera oblicua con respecto a la línea de costa (figura 4), es decir, con una disposición que facilita el ingreso de agua marina, a través de los cortes truncados de los caños que quedan en el entretejido de los cordones y, obviamente, a la falta de una fuente importante de sedimentos, pues basta recordar que el curso actual del San Pedro es del orden de 5 millones $m^3/año$ de escurreimiento medio, siendo insignificante si se le compara con la magnitud de la descarga del río Usumacinta, que es de alrededor de 80 millones $m^3/año$. Actualmente, este río deriva como delta distributivo hacia el río Grijalva y al río Palizada, a fin de ser más eficiente desde el punto de vista hidráulico, al reconocer tres niveles base. El río San Pedro o antiguo curso del río Usumacinta perduró por lapsos amplios con el mismo trazo y descarga continua de sedimentos, perdiendo declive y, con esto, la capacidad y

la imposibilidad de ganar competencia para que el flujo de la corriente pueda llevar en suspensión el material con calibre mayor a las arenas, quedando una buena parte de los sedimentos atrapados en el lecho fluvial, reduciéndose así, la capacidad volumétrica del escurrimiento, teniendo con esto, escasas oportunidades de distribuir los sedimentos de forma lateral, toda vez que se encuentra encausado y controlado por las riberas formadas de bordos sobresalientes con diques amplios. De tal manera, que el río deja de ser la fuente primordial de aporte de sedimentos en el delta, iniciando su destrucción en el contacto de mayor energía física, constituido por el frente del delta y como resultado del déficit de escurrimiento y de sedimentos en la desembocadura deltaica de la actual boca del río San Pedro y San Pablo.

Así, la superficie física de llanura costera pierde terreno ante el avance transgresivo, que es de poco más de un km^2 , (tabla 1) que

una vez que dicha superficie es dividida entre la longitud de la línea de costa se obtiene una franja de 45.4 metros de ancho promedio, valor que una vez repartida por el lapso de ésta interpretación, equivaldría a tener una tasa de retroceso con un ritmo de 3.5 m por año (figuras 9 y 10).

El sector 4, se presenta como la tercera área vulnerable afectada por el retroceso de la costa, misma que corresponde a la porción central más prominente del antiguo delta del Mezcalapa, cuya línea de costa tiene una morfología de trazo arqueado. Constituye un delta muerto o inactivo que sin aporte sedimentario propio, queda a merced de la energía marina, en una posición de déficit, por tanto, no logra mantenerse sin perder superficie de playa. De esta manera, en el lapso de 13 años y a lo largo de 23 870 m que tiene la línea costa del sector, se recortan 534 288 m^2 , más de medio km^2 , esto equivaldría a la desaparición de una franja de 22.38 m de ancho, a un

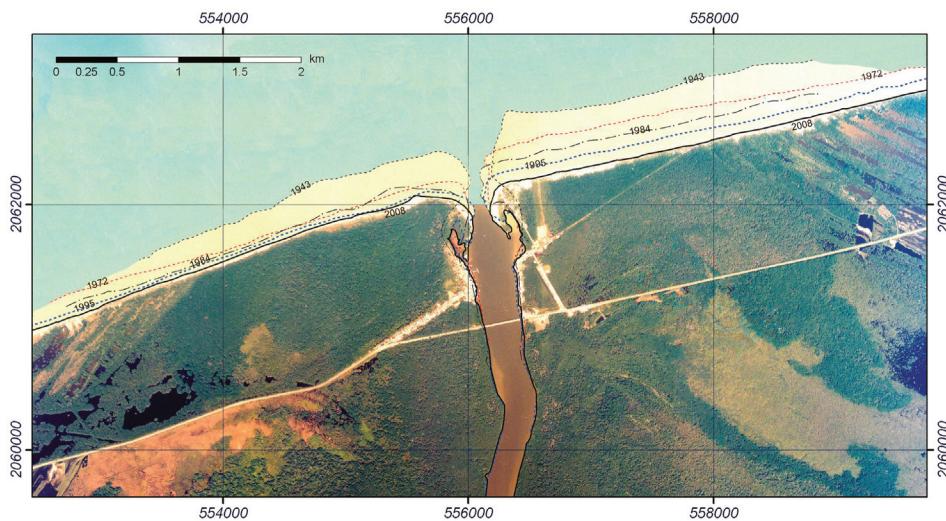


Figura 10. Restitución de las antiguas líneas de costa, realizada sobre fotografía aérea rectificada, obtenida en marzo del 2008, a partir de las observaciones de distintas fechas de vuelo, hechas desde el año de 1943.

ritmo de más de 1.72 m anuales de retroceso de playa (figura 9).

El sector 2, es el siguiente en lista de los más impactados por el avance transgresivo, este tramo se le identifica como el tipo isla barrera que origina a las lagunas costeras. Para el caso en estudio, da lugar y formación a la laguna de Carmen y Machona y forma parte del flanco centro-occidental del delta del Mezcalapa. Los valores registran también una pérdida física de terreno de poco más medio km², (tabla 1) que repartida por la longitud del litoral de 28 453 m se ha perdido una franja de 17.8 m de anchura media, es decir un retroceso de 1.37 m por año, (figura 9). Estos registros son válidos para el sector en cuestión, pero no hay duda de que, de forma local con apertura de bocas se ha inducido el impacto de la erosión, por ejemplo, a los lados de la boca artificial de Panteones, localizada en el extremo poniente del sector 2, la barrera se ha desestabilizado con la entrada de una mayor circulación y el efecto de la refracción de las ondas en la boca, además del incremento en el valor del prisma de marea, impartida por la inundación periférica de nuevos terrenos y las evidencias de erosión del fondo de la laguna que se traduce en el incremento de la capacidad volumétrica del cuerpo de agua costero.

El sector 5, correspondiente al Puerto de Dos Bocas, está localizado en el flanco centro-oriental del delta del Mezcalapa, a pesar de que en el puerto se ha establecido la edificación de una serie de espigones y escolleras, éstos no han impedido la erosión de la costa y la infraestructura misma. El puerto está flanqueado por espigones en sus extremos y entre ellos hay una distancia de 4 859 m, sobre la cual se perdió poco más de ocho hectáreas, es decir una franja equivalente de 16.7 m que

se traduce a una velocidad de retroceso de la costa de 1.28 m anuales. Posiblemente el problema, independiente de la razón del ascenso del nivel medio marino, es que ha sido inducido por estar fincado sobre materiales de relleno. El arreglo en la distribución de espigones y su disposición, ¿no es el adecuado?, ¿y entonces podría ser un problema de diseño en la materia de ingeniería de puertos?

Sector 3, se extiende a lo largo de la porción centro-occidental del flanco del delta del Mezcalapa, entre la boca de Panteones y la barra de Tupilco y encierra a la laguna Redonda por el poniente, seguida por un tramo de barrera estrecho separado de la porción continental por un estero dragado de posición paralela a la línea de costa y que en el extremo oriental, da forma y abrigo a la laguna Cocal. Al igual que el resto de la línea de costa del delta del Mezcalapa, no hay una fuente directa de sedimentos que provenga de la porción continental, sin embargo hay evidencias de subsidencia y/o ascenso del nivel del mar, que se reflejan finalmente en las cifras siguientes: hay una disminución de terreno de 449 997 m², que repartida a lo largo de la costa, se tendría una franja hipotética de 26.5 m de ancho, dicho valor entre el periodo de este análisis, se obtuvo un resultado de un retroceso de dos metros anuales (ver figura 9).

RESULTADOS DE LOS VALORES DE LA MAGNITUD POTENCIAL DEL AVANCE Y RETROCESO DE LA COSTA

Los aportes se sintetizan en el conocimiento de la diferenciación de los procesos transgresivos y regresivos del complejo deltaico, en donde se distribuyen y manifiestan con

distinta magnitud; de esta manera, se está en condiciones de saber qué porciones son las más vulnerables, las cuales se exponen de forma sinóptica de acuerdo con la figura 9. Conviene aclarar y reiterar en este momento que el sobrenombre de magnitud potencial se refiere cuando se hace la medición directa de los valores de las áreas dejadas como huellas de la intensidad de los fenómenos de la transgresión o de la regresión, sin importar, ni considerar los procesos que puedan contrarrestar al fenómeno original y virgen

De la zonificación de áreas impactadas, se puede concluir, que existe un avance regresivo de la costa, que es totalmente congruente con un de los mayores abastos de sedimentos del país, constituidos por el acrecentamiento delta Grijalva-Usumacinta. En cuanto al comportamiento transgresivo, éste tiene lugar en deltas inactivos o muertos, por tanto, los resultados resultan congruentes; sin embargo, es un hecho que las obras realizadas han catalizado el fenómeno de la erosión de la costa.

BALANCE NETO DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LA LÍNEA DE COSTA

Hasta aquí se ha examinado, por separado el poder potencial de los procesos de retroceso de la costa por erosión y la evaluación de las áreas ocupadas por la sedimentación con el avance de la línea de costa hacia el mar. Empero, sabemos que las corrientes costeras playeras son las generadoras de una buena parte de los cambios de la zona costera. En la zona de estudio provienen principalmente del oriente, enfilando con dirección dominante hacia el poniente. Se trata de una corriente longitudinal alóctona que viene de lugares distantes,

pues provienen de las costas de Campeche y Yucatán, acarreando consigo sedimentos de manera continua, a la manera de una cinta sin fin que solo es interrumpida por el corto lapso del fenómeno de los frentes fríos o nortes (figura 11), cuya presencia genera el oleaje destructivo y corrientes litorales de playa que re-moviliza y trabaja los sedimentos en cuestión. A los cuales se suma, parte de los sedimentos de la fuente aportada por el complejo deltaico tabasqueño, de este modo, el aporte de los deltas y las corrientes de playa, contrarrestan los valores de erosión y los valores de descenso del terreno por subsidencia, a un nivel de disposición topográfica menos baja. Se llega abatir la remoción del oleaje erosivo, derivado de las tormentas ciclónicas y nortes y desde luego, del fenómeno de ascenso del nivel del mar, que se concibe como efecto del cambio climático de escala mayor, de carácter planetario involucrando la universalidad del globo terráqueo.

De ésta forma y tomando en consideración de que a todo fenómeno en acción, le corresponde una respuesta de reacción que generalmente esta en contraposición, por tanto, se estima necesario evaluar a los contrarios, a fin de possibilitar el cálculo de los desplazamientos reales y netos de la línea de costa. ¿Cómo logramos este cálculo? , se establece midiendo la diferencia entre las áreas ocupadas por el fenómeno de la transgresión, a través de las superficies que se han perdido, ya sea por la inundación o la destrucción de tierras por erosión y las superficies ganadas al mar debidas a la regresión marina, mediante la acumulación sedimentaria que se traduce en la ganancia de nuevos terrenos de playa. Ambos procesos se relacionan al medir las superficies de forma comparativa y se con-

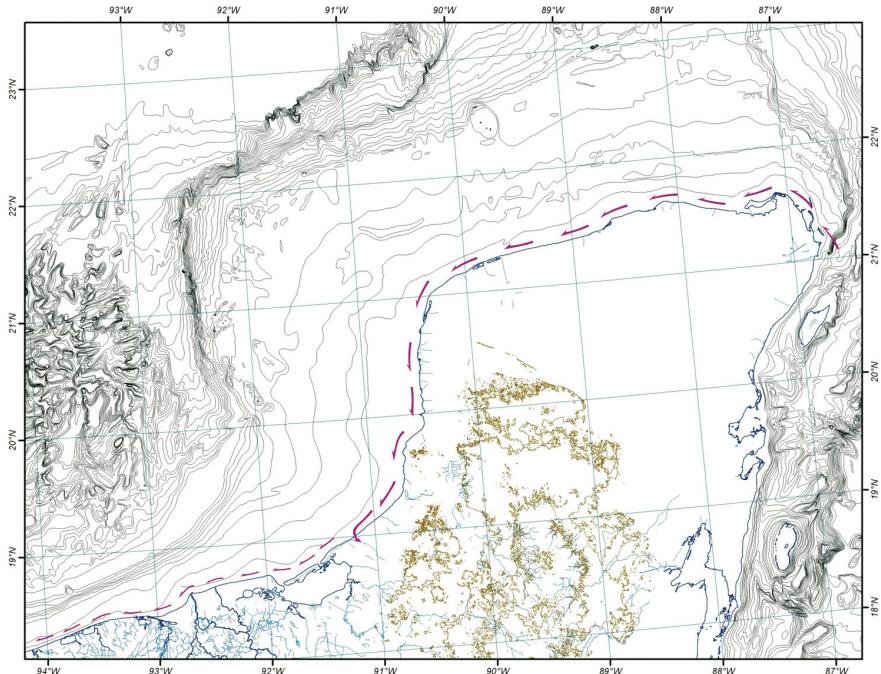


Figura 11. Esquema idealizado de la corriente costera de deriva playera que circunda la península de Yucatán y baja con rumbo de oriente- poniente recorriendo el frente del Complejo Deltaico Tabasqueño durante la mayor parte del año.

signa al proceso dominante que se extiende sobre el mismo sector de la costa en cuestión, con el fin de distribuir y homogeneizar regionalmente los valores representativos de los procesos dominantes (tabla 2). Toda vez, que el desarrollo del valor accesorio, viene usualmente a contrarrestar y a aminorar la realimentación del proceso principal.

La interpretación de los cambios netos de la línea de costa se asemeja de cierta manera a los potenciales, pero con repercusiones evidentes de abatimiento sobre los procesos dominantes. Siguiendo con la tónica de iniciar con los valores extremos tenemos el balance con resultados incluso inesperados. Así en el orden de mayor a menor cambio se presenta: Al sector 6 correspondiente a la barra de Chiltepec que alberga a la bocana de la laguna de

Dos Bocas y al curso bajo del río González. Después de verificar el balance se observa, un retroceso de 4.34m/ al año, (figura 12) el cual, al ser comparado con el retroceso potencial, se nota que este disminuye en 1.65m por año. Sin embargo hay consistencia en cuanto que es la magnitud más elevada de todo el complejo deltaico, tanto para los cambios netos como los potenciales.

El sector 9, se presenta de forma similar al ser congruente con los valores de potenciales, con una tasa de 3.5m al año, sobre los 3m de ahora con los cambios netos, con una diferencia y de disminución de medio metro (figuras 9 y 12), cifra también elevada de retroceso.

El sector 4, desciende a la tasa de 1.35 m de promedio anual de retroceso abatiendo la cifra potencial a nivel de centímetros. Siendo

Tabla 2. Cuadro resumen que muestra el valor de la longitud de los sectores, las áreas recortadas por retroceso y las superficies agregadas por el avance de la tierra sobre el mar, los valores dominantes y co-dominantes, el valor de las áreas reducidas a una faja equivalente a todo lo largo del sector y las tasas de avance y retroceso neto de la línea de costa.

Número y longitud de sector	Área ganada de nuevos terrenos avance m ²	Área perdida de terrenos por retroceso m ²	Dominio del avance-diferencia real en m ²	Dominio del retroceso-diferencia real m ²	Anchura de la faja ganada por el avance m	Anchura de la faja perdida por el retroceso m	Tasa media anual de avance en m	Tasa media anual de retroceso en m
Sector 1 31 062 m	273 181.37	249 325.89	23 855.48		0.76		0,05 En equilibrio	
Sector 1 Poniente 11 870 m	206 674	56 416.40	150 258		12.65		0.97	
Sector 1 Oriente 19 192 m	66 507	192 909.47		126 402		6.58		0.50
Sector 2 28 453 m	115 273.15	506 637.68		391 364.53		13.75		1.05
Sector 3 16 961 m	211 962.97	449 997.58		238 034.61		14.03		1.07
Sector 4 23 870 m	114 449.53	534 288.05		419 838.52		17.58		1.35
Sector 5 4 859 m	19 082.57	81 276.42		62 193.85		12.79		0.98
Sector 6 8 675 m	177 042.89	667 324.41		490 281.52		56.51		4.34
Sector 7 45 185 m	1 174 569.55	558 046.92	616 522.63		13.64		1.04	
Sector 8 27 690 m	1 105 858.06	1 044 954	60 904		2,19		0,16	
Sector 9 22 295 m	128 699.47	1 012,719		884 020		39,65		3.05

entonces, similares al guardar una tendencia paralela de retroceso.

Sector 3, representa la siguiente categoría inferior, pues se haya desacelerando el valor de la tasa a un metro de retroceso, es decir, prácticamente a la mitad de la magnitud de la cifra potencial (figuras 9 y 12). Esto se puede interpretar suponiendo una restitución de una activa sedimentación transitoria establecida a nivel de playa, generada por la corriente de deriva litoral.

Sector 2, guarda el orden inferior, pero prácticamente es semejante con el valor numérico del sector 3, (figura 12), sin embargo

la disminución de la tasa anual es del orden de centímetros. Sin entender las causas de esta situación, podríamos plantear a manera de hipótesis, que las obras de protección hechas con empedrados y espigones han evitado un mayor recorte de las playas. Otra razón del abatimiento, es que una parte de los sedimentos de la deriva asignados, han quedado estacionados de forman circundante en las inmediaciones de la boca de Panteones que se localiza en el extremo oriental de la barrera que es sitio que representa al surtidor, de donde proviene la fuente de sedimentos que alimenta y mantiene a la barrera, una vez sa-



Figura 12. Tasa anual de retroceso y avance neto registrado en los diferentes sectores de la línea de costa en el período de 1995 y 2008.

tisfechas las necesidades de sedimentos con el equilibrio de la boca, estará en posición de superávit y con esto lograr su traslado incorporando los sedimentos de la deriva playera al sector en cuestión, restituyendo con más arena la pérdida de tierras.

El sector 1 constituye la única barrera con respecto a todo el resto de los sectores con un comportamiento desigual. Pierde terreno en el tramo centro-oriental y gana terreno en el tramo poniente de la barrera. Los valores que representan pérdidas son congruentes con el poder de la erosión potencial, pues se contrae unos centímetros. Mientras los valores que reportan una expansión de las superficies de terreno ganadas al mar, son modestas si consideramos una tasa de alrededor de un metro (figura 12).

En cuanto los sectores con dominio de la sedimentación y el incremento de playas o nuevos terrenos se reducen a dos sectores que corresponden con los flancos del delta del río Grijalva, comprobando la evidencia de la

existencia del delta activo, a pesar del ascenso del nivel del mar, la subsidencia y la captura de sedimentos fluviales en las represas del sistema hidrográfico.

Examinemos el sector 8 que representa uno de los valores más altos, con una tasa potencial de avance de tres metros. Pero en el momento de ser comparada con la tasa neta, prácticamente el registro se nulifica al quedar con mínimo avance de unos cuantos centímetros. Realizando así la importancia de ambos fenómenos, nos referimos a acumulación sedimentaria como a los de destrucción del frente deltaico. Por ende, consideramos la posición del delta en un estado de equilibrio, en donde tiene lugar una gran acumulación, pero enmarcada por un delta de morfología cuspada que se proyecta afuera de la traza general de la línea costa y por tanto sujeto al esquema clásico de erosión a través de la concentración de rayos energía del oleaje que se contraponen de manera eficiente a un mayor crecimiento espacial del delta.

El sector siete constituye el flanco occidental del delta del Grijalva y la comparación que resulta entre el dato potencial y el real, es de dos a uno, crecimiento moderado si se considera que se encuentra muy cerca de la fuente de sedimentos del río Grijalva, pero por su disposición espacial permite que sea modelado por el oleaje incidente de los nortes, con energía erosiva que le impiden su franca expansión.

SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS

Atendiendo este apartado podemos considerar que la línea de costa es definitivamente inestable, con un dominio de la transgresión, toda vez que de los 209 km de longitud de la costa en estudio, 124 304 km son de retroceso, representado 59% del litoral en cuestión y solo 57 055 km es decir 27% del litoral, constituyen las costas progradantes con el dominio de la acumulación sedimentaria. Mientras solo 27 690 km correspondiente al sector 8 o del delta del Grijalva, se interpreta como una línea de costa definitivamente estable o en equilibrio.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Debe aclararse, que se averiguó y se dio explicación a estos procesos con elementos de juicio, que no necesariamente se encuentran relacionados con el ascenso del nivel medio del mar. Toda vez, que desde el punto de vista de las condiciones geomorfológicas, referidas a los deltas activos y muertos y la relación que guardan con los procesos de erosión y acumulación, corrientes de playa, junto con el arreglo de la distribución de cordones, son variables clave e indicadoras, con los cuales se interpreta el comportamiento específico de la diferenciación de la línea de costa.

Para el caso de la zona de estudio, el cambio climático y las consecuencias de ascenso del nivel medio del mar, intervienen como factor accesorio o complementario al reflejarse de manera general. Es un hecho que los fenómenos de erosión y acumulación han coexistido desde hace mucho tiempo, así los atestiguan los patrones de diseño de cordo-

nes, que un principio se formaron a partir de una morfogénesis de acumulación sedimentaria en la formación de playas y, posteriormente, éstas fueron cercenadas, al estar truncadas con direcciones diferentes, con arreglos de distribución que ahora, nada tienen que ver con el arreglo fisiográfico de la actual estructura espacial, y es por ello, que dan cuenta de la historia de los cambios en los últimos miles de años. Por eso se considera, que la interpretación del arreglo de los cordones constituyó la clave analítica principal como herramienta de interpretación geomorfológica.

La comparación de la dupla transgresiva como regresiva, analizada desde los cambios en la estructura espacial con repercusiones funcionales, permitió entender una parte del comportamiento litoral, en donde se averiguó el peso que representa la sedimentación de la deriva litoral, para comprender a mayor cabalidad la explicación diferenciada de los

sectores, permitiendo ajustar los valores con una adecuada aproximación, considerando que las mediciones se hicieron con el sensor remoto de las fotografía aéreas.

AGRADECIMIENTO

Se reconoce y se agradece el apoyo técnico del pasante Juan Moreno Mena en las mediciones morfométricas realizadas en el SIG.

LITERATURA CITADA

- Hernández Santana, J. R., M. A., Ortiz Pérez, A. P., Méndez Linares, y L. Gama Campillo, 2008. Reconocimiento morfodinámico de la línea de costa del Estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo xx hasta el presente. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 65: 7-21.
- Ortiz-Pérez, M. A., 1992. Retroceso y avance de la línea de costa del frente deltáico del río San Pedro, Campeche-Tabasco. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 25: 7-23.
- Ortiz-Pérez, M. A., y J Benítez, 1996. Elementos teóricos para el entendimiento de los problemas de impacto ambiental en las planicies deltaicas: la región de Tabasco y Campeche. p. 483-503. En: A.V. Botello, J.L. Rojas Galaviz, J. Benítez y D. Zarate-Lomelí (eds.), Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias, EPOMEX Serie científica 5, Universidad Autónoma de Campeche, 666 p.
- Ortiz- Pérez, M. A., C., Valverde, y N. P., Psuty, 1996. The impacts of sea-level rise and development on the low-lands of de Mexican Gulf Coast. p. 459-470. In: A.V. Botello, J.L. Rojas Galaviz, J. Benítez y D. Zarate-Lomelí (eds.), Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias, EPOMEX Serie científica 5, Universidad Autónoma de Campeche, 666 p.
- Psuty, N. P., 1965. Beach-Ride Development in Tabasco. *Annals of the Association of American Geographers*, 55: 112-124.
- Psuty, N. P., 1967. The Geomorphology of Beach Ridges in Tabasco, México. Coastal Studies Series No. 18, Louisiana State University Press, Baton Rouge.
- West, R. C., Psuty, N.P., y B., Thom, 1969. The Tabasco Lowlands of Southeastern Mexico. Coast Studies Series No. 27, Louisiana State University Press, Baton Rouge.

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

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

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

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

RESUMEN

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

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

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

INTRODUCCIÓN

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

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

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer el entorno del cambio climático global y sus efectos en la variación del nivel medio del mar.
- Calcular las tasas de erosión/acreción de costas del estado de Campeche.

- Realizar una prospectiva de las líneas de costa en escenarios de elevación del nivel del mar de 40, 60 y 100 cm.
- Conocer la vulnerabilidad de las costas del estado de Campeche bajo la influencia de eventos hidrometeorológicos extremos.
- Proponer una estrategia de reducción de la vulnerabilidad para las costas del estado de Campeche ante eventos hidrometeorológicos extremos debidos a la variabilidad y el cambio climático.

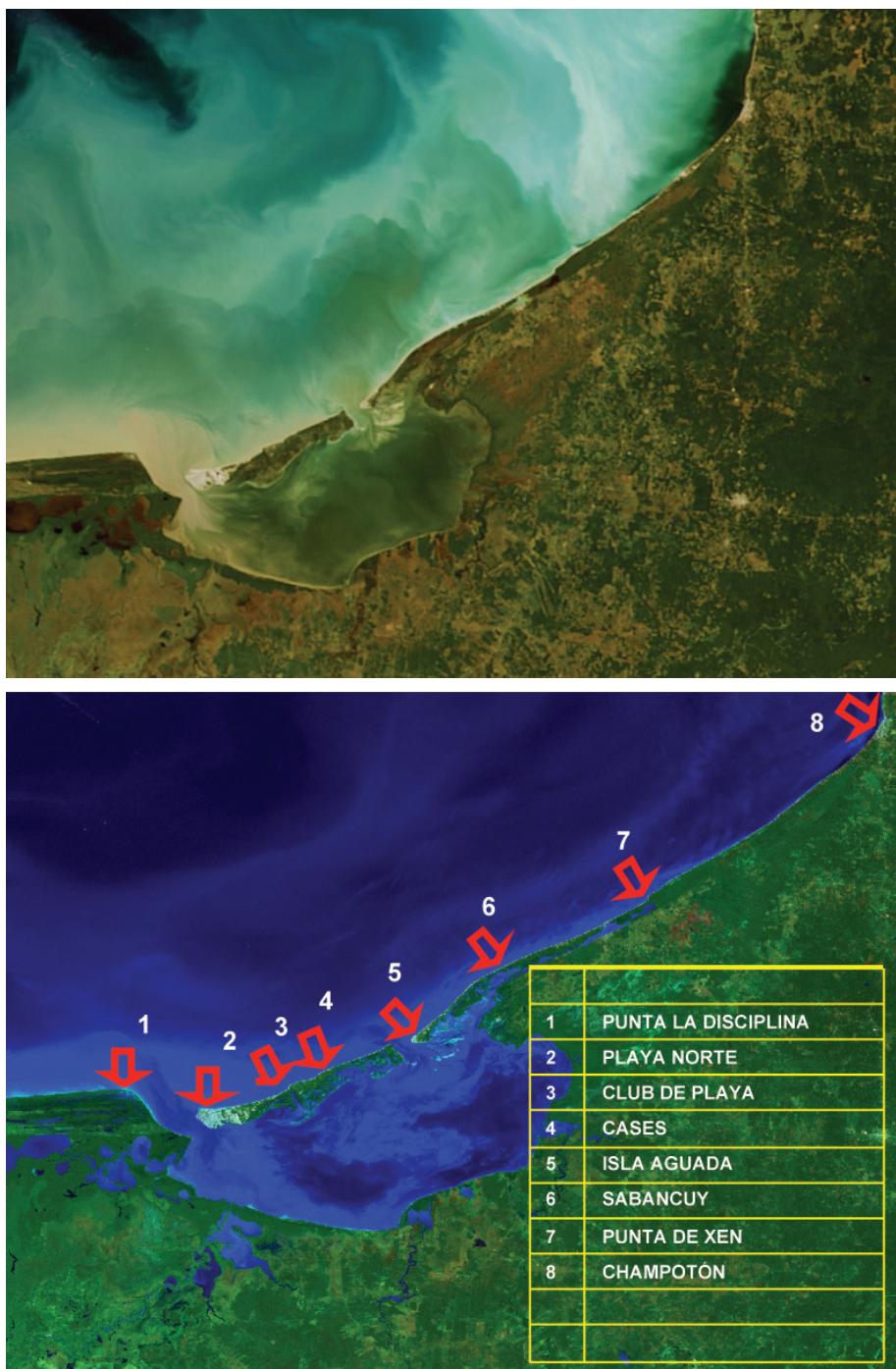


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Arriba: imagen del satélite Terra del 14 de Diciembre de 2008 (Fuente NASA). Abajo, localidades de interés, citadas en este estudio.

METODOLOGÍA

MATERIALES

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

DESCRIPCIÓN

DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA

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

Georreferenciación

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

En el presente caso el SIG se empleó para integrar información digital (raster y vectorial) y convertir formatos de proyecciones en uno común wgs84 (Sistema Geodésico Mundial), mientras que el PDI se empleó para georreferenciar imágenes a partir de puntos de campo (puntos de control) conocidos, así como para realizar mejoramientos digitales para realzar la interfase agua-continente y visualización de la vegetación, parámetros ambos muy útiles para configurar la línea de costa.

Tabla 1. Descripción de la información recopilada.

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

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

² Se utilizó el software comercial Ermapper, versión 7.2.

Todo el material cartográfico y digital utilizado se convirtió a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) para la Zona 15 sobre un esferoide definido por wgs84.

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

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

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

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

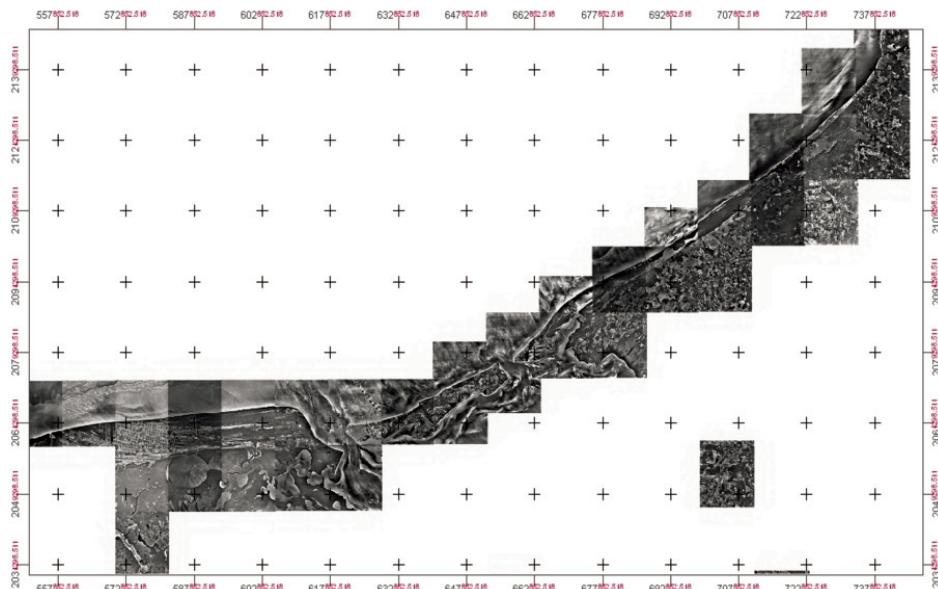


Figura 2. Mosaico ortofotográfico de las costas de Campeche del periodo 1994-2002.

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

Líneas de costa

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

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

Cálculos de tasas de erosión

La estimación de la tasa de erosión se realizó mediante el método de cálculo de áreas de referencia. Para cada imagen de un año determinado se marcó un polígono de referencia y se calcularon el área continental (m^2) y la longitud de la línea de costa (m) (figura 3). Con fines de homogenización del análisis, todos los polígonos tuvieron un ancho aproximado de 10 km.

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

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

$$TEC \text{ (m/año)} = \frac{DLC}{Año_2 - Año_1} \quad (\text{Ec. 2})$$

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

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

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

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

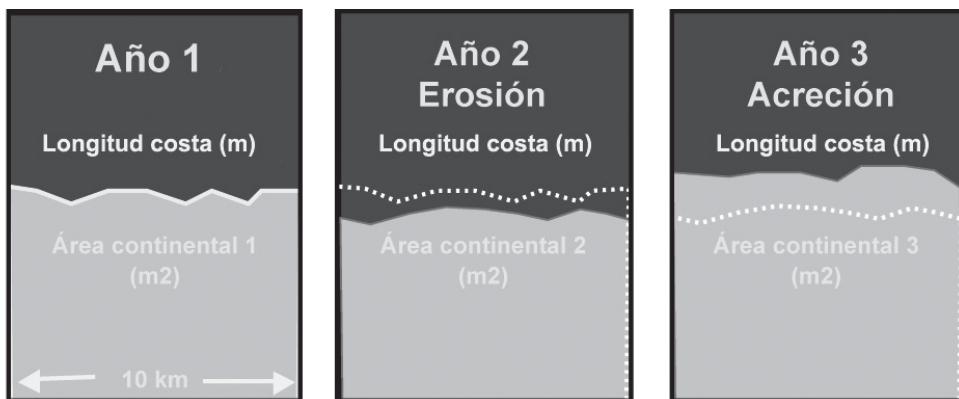


Figura 3. Áreas de referencia para el cálculo de tasas de erosión (ANIDE, 2005).

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

Cambio climático y elevación del nivel del mar

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

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

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

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

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

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

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA LÍNEA DE COSTA

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

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

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

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

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

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

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

Localidades con erosión continua (Transgresión marina)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

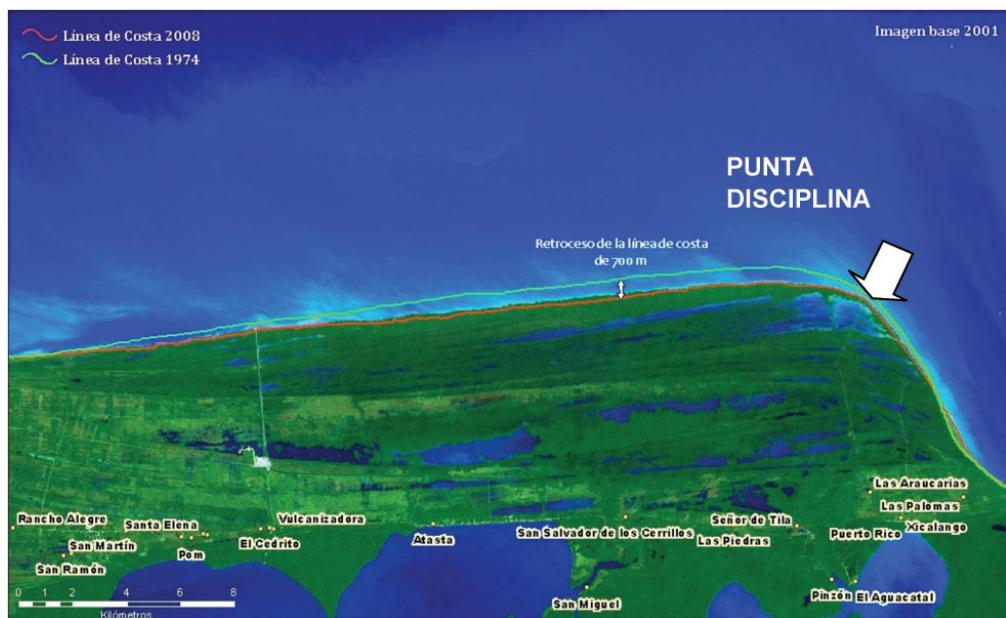


Figura 4. Reconstrucción de la línea de costa de 1974 y su ubicación con respecto a la costa de 2008 de la Península de Atasta. Véase la ubicación de Punta Disciplina, discutida en el texto.



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



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



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

Localidades con fluctuación erosión - depósito

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

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

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



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

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

TASA DE EROSIÓN

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

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

CAMBIO CLIMÁTICO Y ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

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

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

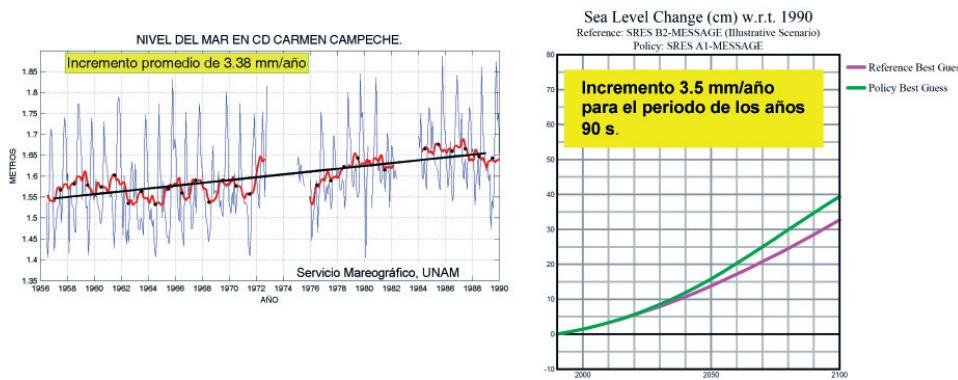


Figura 9. Elevación del nivel del mar medida en la Estación Carmen (Campeche) y modelado mediante el programa MAGICC (2009).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

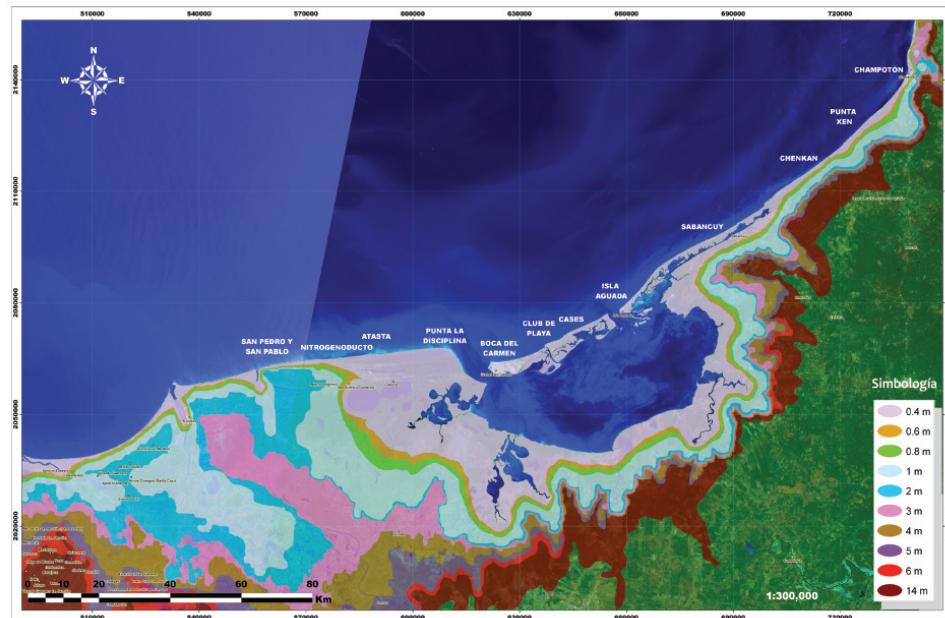


Figura 10. Configuración de las posibles líneas de costa en el estado de Campeche por ascenso del nivel en intervalos de 40, 60 y 100 cm, y 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 14 metros.

VULNERABILIDAD

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

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

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

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

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

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

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

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

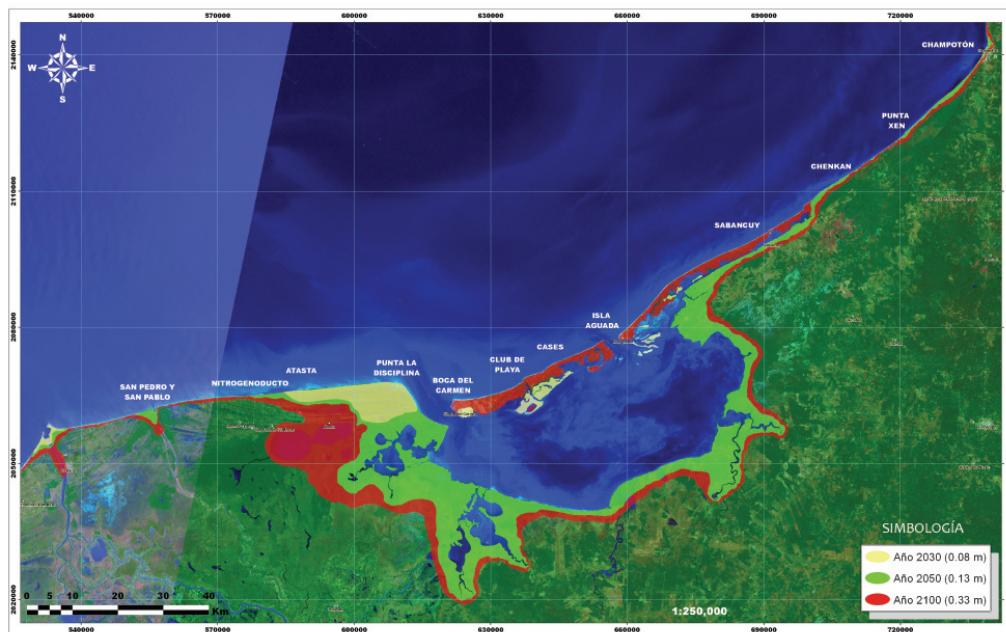


Figura 11. Modelo de elevación del nivel del mar del litoral de Campeche para los años 2030, 2050 y 2100.

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

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

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

OPCIONES DE ADAPTACIÓN

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

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

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

LITERATURA CITADA

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

- Weiss y Overpeck, en preparación. Climate Change and Sea Level. Department of Geosciences. University of Arizona. .
- Wigley T.M., M. Salmon, M. Hulme, y S.C.B. Raper, 2009. Model for the Assessment of Greenhouse-gas induced Climate Change (MAGICC 5.3). NCAR, Boulder, Colorado.
- Zavala, J., 2009. Variaciones del nivel del mar en estaciones mareográficas del Golfo de México. Servicio Mareográfico Nacional, UNAM.

Márquez García, A.Z., E. Márquez García, A. Bolongaro Crevenna Recaséns, y V. Torres Rodríguez, 2010. Cambio en la línea de costa en la Riviera Maya debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos, ¿Consecuencia del cambio global climático?, p. 345-358. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Cambio en la línea de costa en la Riviera Maya debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos, ¿Consecuencia del cambio global climático global?

*A. Z. Márquez García, E. Márquez García,
A. Bolongaro Crevenna y V. Torres Rodríguez*

RESUMEN

Se presentan los resultados de las tasas de erosión y de acumulación presente en 5 sitios localizados en la Riviera Maya, así como un plano de distribución de los procesos de acumulación o erosión presentes en la Riviera Maya obtenidos a partir de la comparación de las líneas de costa definidas de las fotografías aéreas de 1978 e imagen de satélite del área del año 2005 utilizando sistema de información geográfica (SIG): Arc Gis (9.2) y un software para procesamiento digital de imágenes (PDI): Ermapper (7.1). Los resultados muestran que a pesar de incrementarse la intensidad y frecuencia de los huracanes por el cambio global climático, en promedio entre la Riviera Maya, Puerto Morelos y Tulum, existen áreas de erosión y depósito con tasas muy bajas de valores menores a 1 m debido a la presencia de un litoral rocoso, protección de los arrecifes y de la Isla Cozumel. También se hace un análisis de perfiles topográficos de 12 playas de la Riviera Maya, donde se estimó el efecto de la elevación del mar en 0.5 y 1 m cuyo resultado muestra una perdida del 20 % de las playas y del 90 % respectivamente.

Palabras clave: erosión costera, elevación del mar, huracanes.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la mayor parte de las playas de México y del mundo experimentan procesos de erosión, causados por diferentes procesos antropogénicos: diques, espigones, rompeolas, etc., o naturales como: huracanes, lluvias muy variantes y elevación del nivel del mar, entre otros (Salazar-Vallejo, 1998).

La zona litoral es la más dinámica de todos los ambientes marinos. Las playas y extensiones submarinas de playa no son superficies estables dado que están sujetas a los niveles de energía asociados con el oleaje principalmente (Gutiérrez-Estrada y Montaño-Ley, 1987)

Krumbein y Sloss (1963) mencionan que los procesos que gobiernan la dinámica litoral son los cambios en el nivel del mar, la variación de aporte de sedimentos y los cambios de energía causados por el oleaje y corrientes que causan diferencias en el ancho, profundidad, pendiente y forma de las playas, los cuales varían durante las diferentes épocas del año, siendo las épocas de lluvias donde los cambios son más intensos principalmente por la frecuencia e intensidad de las tormentas.

Actualmente, el papel de la actividad antropogénica también ha contribuido a modificar la zona litoral, desde el momento que construye hoteles, casas, restaurantes, etc. , que interrumpe y modifica las playas en su parte continental (supraplaya), hasta la construcción de muelles, espigones, escolleras, rompeolas en la parte marina (infraplaya) que modifican el transporte litoral y la morfología de la playa.

La dinámica costera está determinada por diversos factores físicos y biológicos, entre los primeros destacan, en orden de importancia,

el oleaje, las corrientes marinas y costeras, mareas, cambios del nivel del mar, batimetría, el clima, topografía submarina, las características geológicas de la costa, su tipo y origen; entre los factores biológicos destaca la influencia del ambiente terrestre adyacente, la presencia o ausencia de comunidades biológicas y la existencia o no existencia de una rompiente o laguna arrecifal. Todos estos factores inciden de manera diferencial para esculpir el perfil de la zona litoral y modificarlo continuamente (Sylvatica, 2003).

Un factor muy importante para el sureste del Golfo de México son los huracanes como responsables de los cambios geomorfológicos a lo largo de la línea de costa (Manzano, 1989; Ortiz-Pérez, 1992), donde patrones de acumulación y erosión alteran a lo largo de cientos de kilómetros a las costas de Tabasco y Campeche formando transgresiones marinas que han sido localizados en las últimas décadas (Ortiz-Pérez, 1992)

Actualmente los elementos directamente asociados con el clima como son temperatura, precipitación, viento afectan de alguna forma la morfología de la línea de costa. Diversos estudios que actualmente se han realizado sobre el clima mundial han demostrado un incremento en la temperatura del planeta, lo que repercute en el calentamiento de los océanos dando como resultado un incremento en la frecuencia y la intensidad de los huracanes como lo revela un análisis estadístico basado en datos de los satélites de los últimos 25 años, donde se observa un sensible incremento en la actividad de los huracanes del Atlántico tropical al aumentar la temperatura de la

superficie del océano en agosto-septiembre , se considera que un incremento de 0.5°C de la temperatura de la superficie del océano produce aproximadamente un aumento del 40% de la frecuencia y actividad de los huracanes en relación al promedio de huracanes entre 1950-2000 y el promedio de huracanes de 1995 a 2005 (Saunders y Lea, 2007).

FENÓMENOS CLIMÁTICOS Y LA ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

En época de Nortes los vientos causan cambios en el nivel del mar causando efectos de acumulación y erosión de sedimentos en la línea de costa sobre todo para el Golfo de México y Mar Caribe causando severos problemas de erosión en la zona costera y sus playas al producir cambios en el nivel del mar, fuertes vientos y altas precipitaciones que mueven grandes cantidades de sedimentos.

Durante las tormentas tropicales los cambios del nivel del mar se dan por cambios de la presión atmosférica donde una mayor presión se tiene un decremento del nivel del mar o viceversa (Carter, 1988). Los fuertes vientos presentes en los huracanes también producen cambios en el nivel del mar de manera temporal en decenas de centímetros hasta unos cuantos metros en lo que se conoce como marea de tormentas que a veces se magnifica en plataformas continentales extensas (Rosenbaum, 1998).

Por otro lado los cambios eustáticos del nivel del mar son causado por el cambio relativo de los volúmenes de las cuencas oceánicas con respecto al total de agua oceánica (Sagahain y Holland, 1991), estimándose a nivel mundial que el cambio del nivel del mar es de 15 cm/

siglo hasta 23 cm/siglo (Hicks, 1978), siendo una de las principales causas el deshielo de los polos y por el incremento de aporte de sedimentos al mar por deforestación y lluvias en la zona continental.

Los cambios en el nivel del mar que se han registrado a nivel mundial causan uno de los mayores efectos en la geología, ecología y desarrollo urbano en las áreas costeras. Un progresivo levantamiento del nivel del mar ha provocado los mayores daños de erosión de la línea de costa.

De acuerdo al Panel Intergubernamental de Cambio Climático en su Segunda Conferencia estimó un aumento de la temperatura del planeta de 2 a 5 °C con una elevación del nivel del mar por este fenómeno de $65 \text{ cm} \pm 35 \text{ cm}$. En los registros hechos por Maaul y Hanson en 1985 se encontró que el nivel del mar tiene un incremento de 0.36 cm/año.

En 1987, Titus cita a varios autores, en los que se encuentra Revelle (1983), quien menciona que el nivel del mar puede subir de 30 a 50 cm en este siglo, 70 cm para el año de 2080; Hoffman *et al.* (1983) estima un ascenso del nivel del mar de 26 a 39 cm para 2025 y de 91 a 136 cm para 2075. La Academia Nacional de Ciencias (NAS) estima que los glaciares pueden elevar el nivel del mar entre 20 y 60 cm.

De antemano, lo que se debe tener en cuenta es el hecho de cualquiera de las predicciones sea cual sea el método y sus escenarios, de cualquier forma la tendencia es una elevación del nivel del mar en gran parte por el Cambio Climático Global.

Las consecuencias del cambio de nivel se ven reflejadas en inundaciones, en intrusión de cuña salina y erosión de la costa (Wayne *et al.*, 1993). Esto provoca una perdida de humedad

dales y por lo tanto la destrucción de una barrera contra las mareas y oleaje de tormentas provocando que el oleaje impacte en forma erosiva sobre todo a la zona de supraplaya.

Un incremento del nivel del mar aumenta la profundidad de la columna de agua, disminuye la fricción del fondo y entonces un oleaje con mayor energía se presenta en la línea de costa. Por ejemplo, si se elevara 1 m el nivel del mar sobre una plataforma de 10 m de ancho y 10 m de profundidad, una ola existente su altura se incrementaría un 3% y se generaría olas locales con un incremento de su altura de 7.5%. El subir el nivel del mar 1 m, sería catastrófico para bahías someras, estuarios y lagunas donde se generaría olas de mas de 0.75 m de altura en sitios donde no existían (Wells, 1995).

Para el Golfo de México, Sánchez-Santillán, *et al.* (2005) hace una estimación de la tendencia del nivel medio del mar en 6 puertos del Golfo de México con un aumento promedio de 10.94 cm en los últimos cuarenta años,

teniendo a los puertos de Tuxpan y Tampico con los valores más altos de 22.5 cm y 17.9 cm, respectivamente. El incrementar la profundidad, el oleaje se acercará más al litoral incrementando la erosión por el oleaje.

En la Riviera Maya las características morfológicas y geológicas son de una plataforma calcárea sin ríos superficiales que aporten sedimentos para la formación de playas, siendo los arrecifes y la erosión del mismo litoral rocoso las fuentes principales de sedimentos formadores de estas playas. Su distribución depende de las corrientes litorales y marinas principalmente, que junto con los efectos de viento, mareas de tormentas y oleaje presentes durante los nortes y huracanes son los responsables de la modelación de las playas de manera natural aunque debe de analizarse el efecto antropogénico.

La Riviera Maya se localiza en la zona de trayectoria de los huracanes (figura 1) generados en el Atlántico por lo cual son uno de los principales fenómenos naturales que afectan

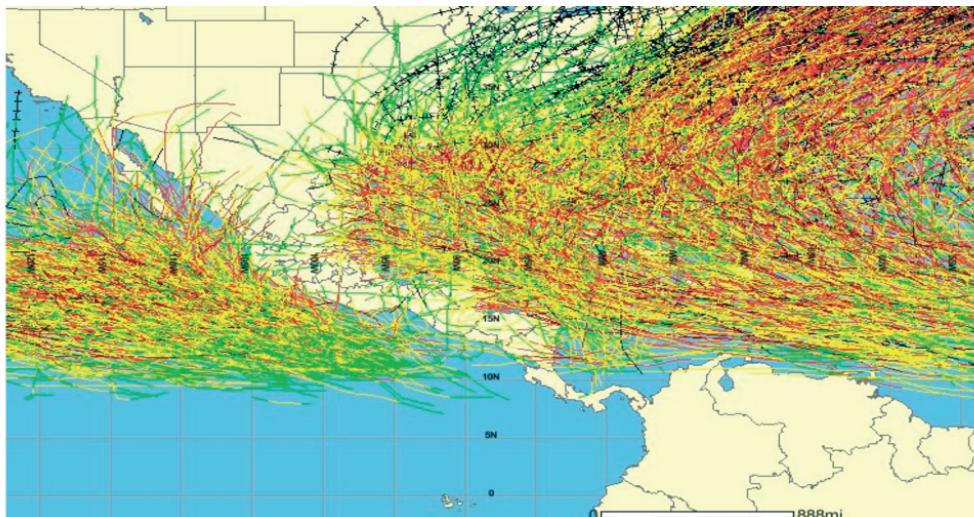


Figura 1.-Trayectoria de huracanes en los últimos 25 años en la república mexicana.
NOAA (2006-04-13).

la zona litoral, por lo cual es muy importante evaluar los procesos de acumulación-erosión presentes en la línea de costa que permitan conocer la tendencia de la línea de costa en una zona de alta actividad turística como lo es la Riviera Maya.

Por ejemplo, cuatro de los seis huracanes más intensos de los que se tiene registro se formaron en el 2005, con Wilma con el número uno con una presión mínima de 882 mbar, rompiendo el récord impuesto por el huracán Gilbert en 1988. Los huracanes Emily, Rita y Katrina fueron categoría 5, siendo Rita y Katrina los cuarto y sextos lugares, respectivamente, en intensidad. La temporada del 2005 es la única temporada que ha tenido cuatro huracanes categoría 5 desde que se tiene registro.

Los modelos más recientes presentados durante la Reunión del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) celebrado en París en Febrero de 2007 muestran que el incremento esperado de la temperatura promedio a finales del siglo XXI, con los diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, será de 1.8°C a 4°C. (Considerando la incertidumbre de dichos escenarios, ésta puede variar de 1.1°C a 6.4°C). Por su parte el aumento esperado del nivel del mar, según diferentes escenarios, para fines del siglo XXI podría ser de 18 a 59 cm. Como consecuencia de lo anterior, los ciclones tropicales y huracanes serán más intensos, con mayor cantidad de lluvia y velocidad del viento.

Para el caso del Golfo de México y Mar Caribe la temperatura de la superficie del mar en el podría aumentar entre 1 y 2°C, favoreciendo las probabilidades de que los ciclones

tropicales alcancen las categorías mayores en la escala Saffir-Simpson. Por lo que es necesario estudios que midan los procesos de erosión-acumulación y tasas de erosión que se presenta en la línea de costa a causa de estos fenómenos

Trabajos relacionados con evaluar la erosión o acumulación en la línea de costa utilizando imágenes de satélite y/o fotografías áreas para la zona litoral de México son mínimas. Uno de los estudios más recientes fue realizado por Hernández-Santana *et al.* (2008) con una investigación sobre la tendencias morfodinámicas en el margen costero estatal del estado de Tabasco mediante el uso de información cartográfica y mediciones geomorfológicas de campo en los años 2003 y 2004, donde se menciona a Sánchez Magallanes con una tasa de erosión de 3 a 5 m al año y la desembocadura del río San Pedro y San Pablo, con 8 a 9 m al año de retroceso.

El desarrollo de centros urbanos, actividad industrial y el desarrollo turístico en la zona litoral hacen necesario contar con este tipo de investigaciones de toda la República Mexicana con el fin de contar con la información sobre los procesos de erosión- depósitos presentes en la línea de costa que permitan la toma de decisiones sobre el uso y manejo adecuado de la zona costera, determinando la vulnerabilidad de la línea de costa.

Por lo que en el presente trabajo, se plantea determinar en algunos sitios de la zona litoral de la riviera maya los procesos de acumulación-erosión presentes y medir las tasas de erosión a partir de un método rápido y de alta precisión utilizando imágenes de satélite de alta resolución de diferentes épocas y fotografías aéreas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Establecer el posible efecto de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (huracanes) en la línea de costa de la riviera maya y el efecto del aumento del nivel del mar por el cambio global climático.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Cuantificar las tasas de erosión de la línea de costa de la riviera maya con apoyo de imágenes de satélite y fotografías aéreas.
- Conocer la evolución y tendencias a futuro de algunas playas de la riviera maya por variaciones del nivel del mar

METODOLOGÍA

La reconstrucción histórica de la línea de costa se realizó a escala regional (1:50 000). El período de observación fue de 1978 a 2005, a partir de los documentos cartográficos siguientes: fotografías aéreas escala 1: 50 000 de 1978 e imagen satelital Ikonos de 4 m de resolución del año 2005, todas ellas en formato raster.

Los resultados del análisis litoral de la Riviera Maya comprendió 5 sitios localizados entre Puerto Morelos y Tulum, cuya comparación presentó una mayor georreferenciación y mínima distorsión entre la línea de costa obtenida de las fotografías aéreas del año 1978 y la obtenida por la imagen de satélite del 2005 (figura 2).

En el presente caso del Sistema de Información Geográfica (SIG) se empleó para integrar información digital y convertir formatos de proyecciones en uno común wgs84 (Sistema Geodésico Mundial), mientras que el PDI (Proceso Digital de Imágenes) se empleó para georreferenciar imágenes a partir de puntos

de campo (control) conocidos, así como para realizar mejoramientos digitales para realzar la interfase agua continente y visualización de la vegetación, parámetros ambos muy útiles para configurar la línea de costa.

Todo el material cartográfico y digital utilizado se convirtió a la proyección Universal Transversa de Mercator para la Zona 15 sobre un esferoide definido por wgs84. . Para ello se emplearon un software para un sistema de información geográfica comercial (SIG): Arc Gis (9.2) y un software para procesamiento digital de imágenes (PDI): Ermapper (7.1).

Por otro lado se analizó la información de Márquez-García *et al.* (2006) sobre perfiles topográficos de playa realizados en noviembre del 2004 (nortes), marzo del 2005 (secas) y agosto del 2005 (lluvias) en la riviera maya estimando el posible efecto de la elevación del mar a 50 cm y 1 m de altura.

La información obtenida se comparó con el número de huracanes extremos en el Atlántico para un período de 1988 al 2005.

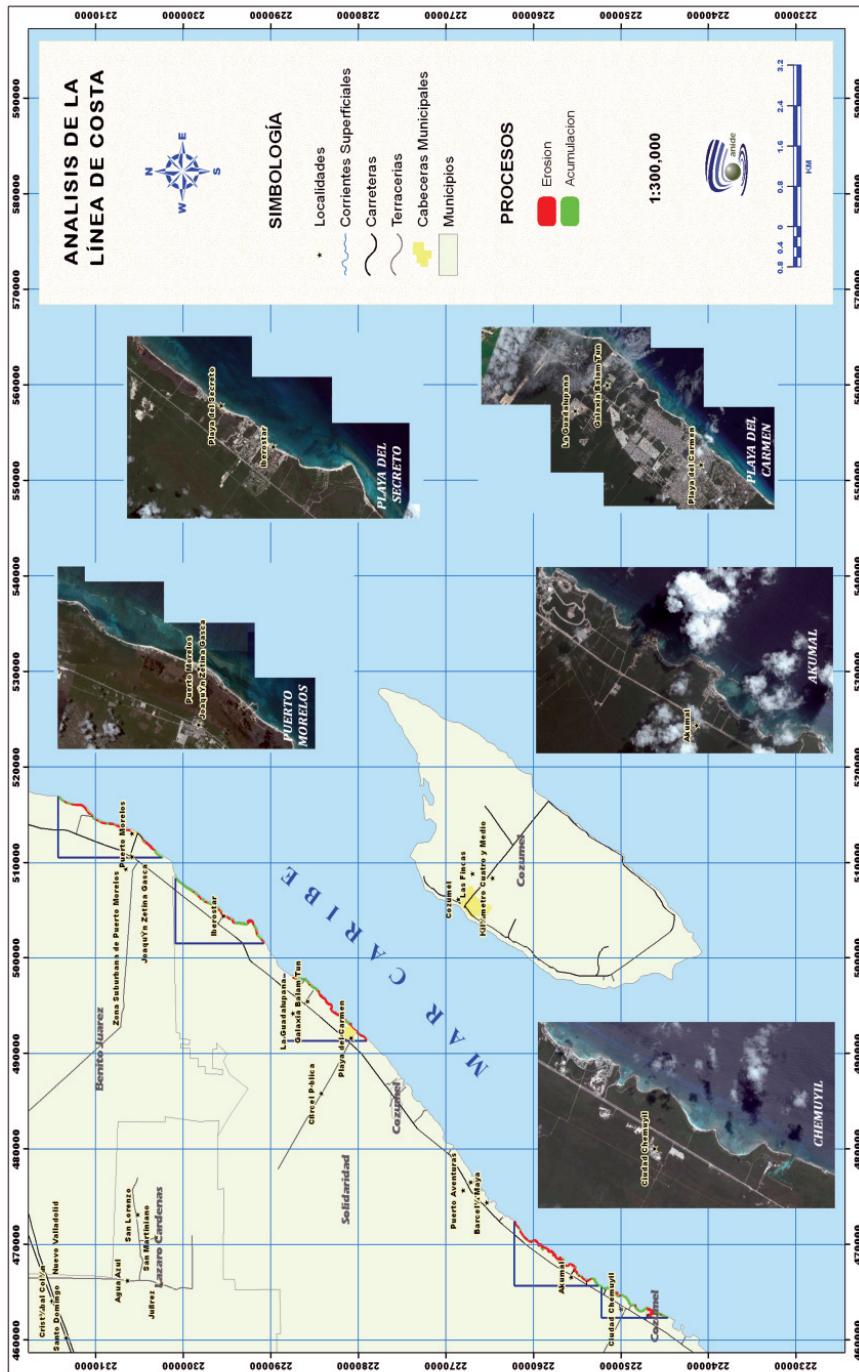


Figura 2. Análisis de la línea de costa y procesos de acumulación y erosión en 5 secciones de la Riviera Maya.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se presenta una cuantificación de los procesos de erosión y depósito presentes en los 5 sitios analizados de la Riviera Maya, en el que se tiene un mayor crecimiento de playa en Chemuyil con un promedio de 38 m a lo largo de 11.5 km de longitud, mientras que el menor crecimiento fue de cerca de 6 m en Puerto Morelos en una longitud promedio de 14 km de línea de costa para un intervalo de 27 años. Por otro lado la mayor erosión de 17 m presente en la línea de costa se tiene en Akumal en una longitud promedio de 14 km y la menor erosión de 8 m en Playa Secreto en Punta Venado para una longitud promedio de cerca de 14 km para el mismo intervalo de tiempo (figura 3).

A partir de ello se estimó una tasa de acumulación que varía desde 22 cm/año en Puerto Morelos hasta 1.42 m/año en Chemuyil y una tasa de erosión de 32 cm/año en playa Secreto y 65 cm/año en Akumal. Estos resultados difieren grandemente si comparamos la tasa de erosión de 3 a 5 m/año para Sánchez Magallanes y 8 a 9 m/año en el río San Pedro y San Pablo en el Golfo de México (Hernández *et al.*, 2008; Ortíz-Pérez, 1992).

PERFILES DE PLAYA

En la figura 4 se presentan 12 sitios de playa de la riviera maya donde se tiene un registro de perfiles topográficos de playa: Punta

Tabla 1. Valores de acumulación y erosión presentes en la Riviera Maya.

Acumulación						
ID	Sitio	Área litoral (m ²)	Longitud del litoral (m)	Intervalo (años)	Desplazamiento Total (m)	Desplazamiento Anual Promedio (m/año)
1	Puerto Morelos	82 257	14 007	27	5.87	0.22
2	Playa del Secreto	286 031	13 755	27	20.79	0.77
3	Playa del Carmen	153 645	12 769	27	12.03	0.45
4	Akumal	148 798	16 198	27	9.19	0.34
5	Chemuyil	443 478	11 568	27	38.34	1.42

Erosión						
ID	Sitio	Área litoral (m ²)	Longitud del litoral (m)	Intervalo (años)	Desplazamiento Total (m)	Desplazamiento Anual Promedio (m/año)
1	Puerto Morelos	128 770	14 007	27	9.19	0.34
2	Playa del Secreto	120 682	13 755	27	8.77	0.32
3	Playa del Carmen	207 472	12 769	27	16.25	0.60
4	Akumal	282 527	16 198	27	17.44	0.65
5	Chemuyil	107 413	11 568	27	9.29	0.34

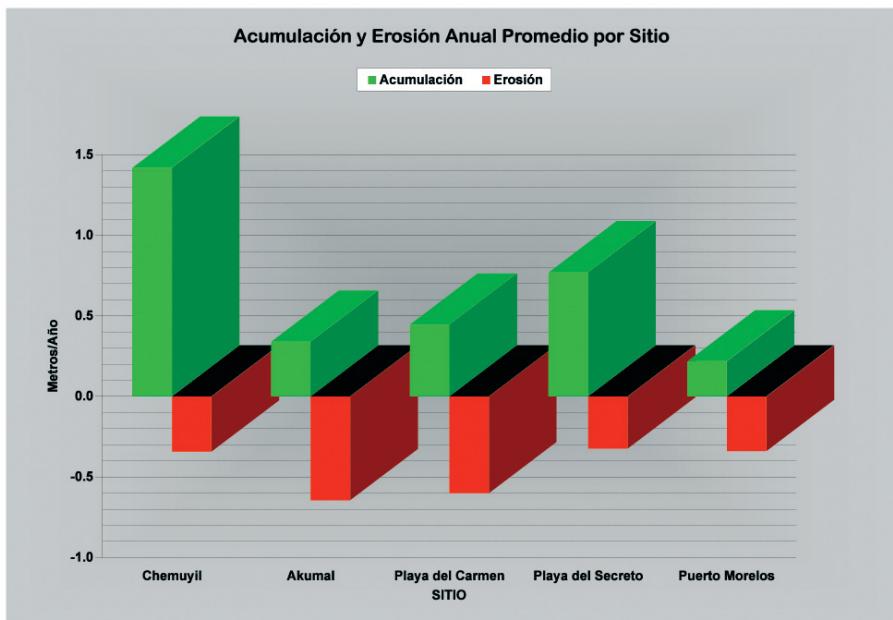


Figura 3. Tasas de acumulación y erosión presentes en la Riviera Maya.

Maroma,, Tres Ríos, Capitán Lafitte, Playa Esmeralda, los muelles fiscal, calle 14 y muelle ultramarino de Playa del Carmen, Punta Venado, Paa-mul, Akumal, X-Cacel y Tulum, publicados por Márquez-García *et al.* (2006), cuyo análisis se muestra en la tabla 2.

Se consideró las características morfológicas de las playas como son la altura de la supraplaya con respecto al nivel del mar y su longitud de las mismas, a partir de ello se estimó el impacto del nivel del mar si se eleva 0.5 m y 1 m de altura con respecto al nivel actual, si el nivel del mar sube 50 cm, las playas al norte de la Riviera Maya como son Punta Maroma y Tres Ríos desaparecerán, mientras que playas al Sur de la riviera disminuirán su longitud considerando longitudes de 10m a 30 m en Akumal, X-Cacel y Tulum, pero, si el nivel del mar se eleva hasta 1 m, gran parte de las playas desaparecerían sobre todo al

Norte de la riviera, mientras al Sur tendrían playas de menos de 10 m de longitud excepto Tulum que presentaría una extensión máxima de 20m.

Esta estimación no considera los posibles cambios que existieran por huracanes, disminución de transporte litoral o la construcción de alguna obra civil, entre otros procesos o actividades.

Al analizar los perfiles de playa en un año de monitoreo Marquez *et al.* (2006) muestran que la Riviera Maya tiene una predominancia de playas acumulativas-erosivas, aunque de alguna manera el proceso erosivo está presente en varias partes de las diferentes playas de la Riviera Maya. Estos resultados también coinciden con los resultados de la comparación de la línea de costa obtenidas de las imágenes de satélite.

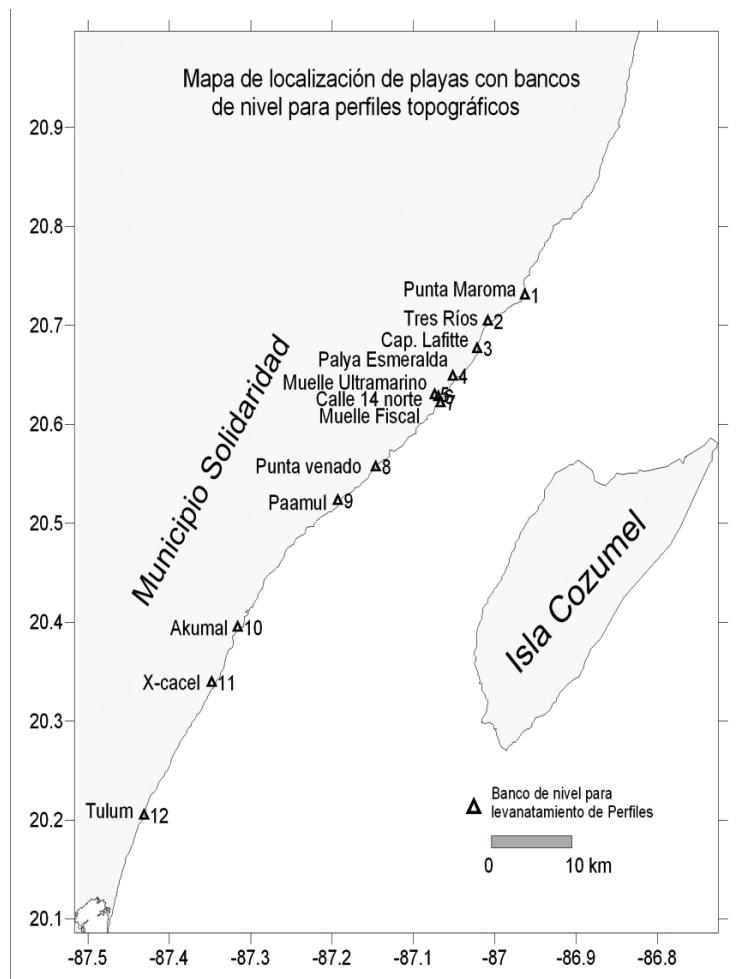


Figura 4. Localización de los perfiles de playa levantados en la Riviera Maya.
(Márquez García *et al.*, 2006).

HURACANES EXTREMOS

Si consideramos los eventos hidrometeorológicos extremos que se han presentado en el Atlántico (Blake *et al.*, 2007), se hizo un análisis de la frecuencia de los huracanes extremos de 1988 al 2005 donde se puede observar una tendencia de aumento de la frecuencia hacia el 2005 , que culmino con 4 huracanes de categoría 5 en el 2005, (figura 5), resultado del cambio global climático.

Sin embargo, a pesar de tener un incremento en el número de fenómenos hidrometeorológicos extremos, la erosión costera en las playas de la Riviera Maya no ha sido considerable como lo demuestran la presencia de playas erosivas-acumulativas con una tasa de erosión de menos de 1 m, por lo que se debe efectuar un trabajo detallado de la costa de la Riviera Maya de las causas locales de erosión como es la actividad turística, obras civiles como espi-

Tabla 2. Características morfológicas y tipo de playa de sitios en la Riviera Maya con estimación del impacto en su longitud si el nivel del mar se eleva 0.5 m o 1 m.

Playa	Nivel de supraplaya (m)	Longitud de playa (m)	Longitud de playa (m) por elevación del nivel del mar (50 cm)	Longitud de playa (m) por elevación del nivel del mar (1 m)	Tipo de playa
Punta Maroma	0.4 a 1.2	16 a 50	0	0	Erosiva
Tres Ríos	0.2 a 0.7	6 a 12	0	0	Acumulativa-erosiva
Capitán Lafitte	0.5 a 2.2	16 a 335	15 a 0	0	Acumulativa-erosiva
Playa Esmeralda	0.2 a 1.2	16 a 25	5 a 0	0	Acumulativa-erosiva
Muelle Ultramarino	0.5 a 1.2	30 a 35	10	0	Acumulativa-erosiva
Calle 14	0.5 a 1.0	20 a 40	10	0	Acumulativa-erosiva
Muelle Fiscal	1.0 a 1.5	7 a 40	1 a 10	0	Acumulativa-erosiva
Punta Venado	1 a 2	10 a 50	2 a 20	0 a 10	Erosiva
Paa-mul	1.5 a 2	14 a 40	10 a 20	0 a 10	Estable
Akumal	1.5 a 3	5 a 20	10 a 15	0 a 5	Acumulativa
X-cacel	1 a 2	10 a 40	8 a 20	0 a 10	Acumulativa-erosiva
Tulum	1.5 a 3	20 a 50	15 a 30	5 a 20	Acumulativa

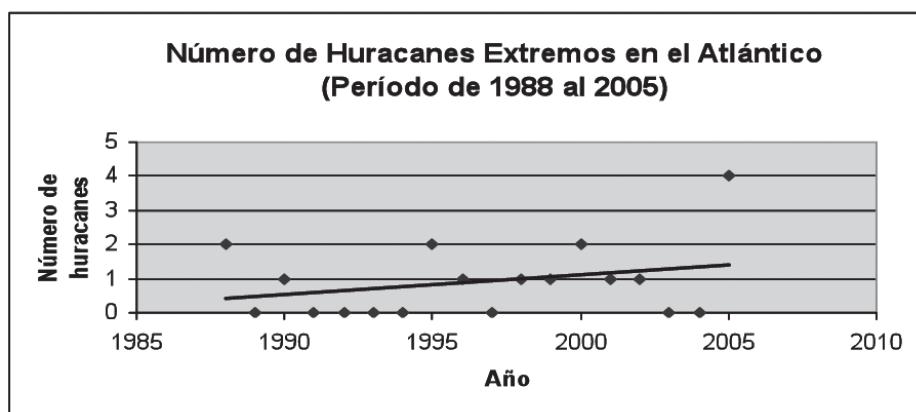


Figura 5. Número de huracanes extremos en el Atlántico durante el período de 1988 al 2005).

gones, muelles, hoteles, factores biológicos, como el papel que juegan los arrecifes y la presencia de manglar, entre otros factores.

Es importante, considerar que la existencia de una playa depende de 4 factores:

- 1) Fuente de sedimentos
- 2) Transporte litoral
- 3) Condiciones de energía de oleaje, corrientes y mareas no extremas.
- 4) Nivel del mar estable

Para el caso de la riviera, la fuente de sedimentos es principalmente de origen biogénico, es decir, proviene de la erosión de la zona arrecifal y del material calcáreo de los litorales rocosos presentes en el área.

El transporte litoral en la riviera presenta interrupción de manera natural por puntas y litorales rocosos, además de la construcción de espigones, rompeolas, y obras civiles asociadas a la protección hotelera, lo cual produce áreas acumulativas y áreas erosivas.

Los efectos causados por oleaje, marea y corrientes presentes en nortes y huracanes, en cierta forma son disminuidos por la presencia de manglares, de la zona arrecifal y de la isla de Cozumel, sin embargo donde no se tiene esta protección la vulnerabilidad aumenta, sobre todo si se considera que la frecuencia e intensidad de huracanes se presenten más continuamente.

Finalmente el incremento del nivel del mar, es un proceso a largo plazo pero que ya está presente y debe ser considerado dentro de los problemas de erosión de costas.

La dinámica de las playas es muy compleja donde intervienen diferentes factores desde los geológicos, oceanográficos y antropogénicos que para cada playa intervienen de diferente manera por lo que cada playa debe ser estudiada de manera local, sin dejar de tomar en cuenta el contexto regional.

CONCLUSIONES

A pesar de ser una zona de paso de huracanes, con un incremento en categoría y frecuencia, la tasa de erosión y/o acumulación son bajas de menos de 1 metro en comparación a las presentes en el sur del Golfo de México, esto debido a la presencia de un litoral rocoso en la línea de costa con una protección natural que representan los manglares y arrecifes presentes en la zona litoral y de alguna forma la presencia de la isla de Cozumel.

El impacto del nivel del mar si se estima un incremento por el cambio global climático de 50 cm desaparecerán 20 % de las playas pero si se eleva 1 m el nivel del mar 90 % de las playas actuales desaparecerá.

En el desarrollo de centros urbanos y el desarrollo turístico en la zona litoral hacen necesario contar con este tipo de investigaciones con el fin de contar con la información sobre los procesos de erosión-depósito presentes en la línea de costa que permitan la toma de decisiones sobre el uso y manejo adecuado de la zona costera y determinar la vulnerabilidad de la línea de costa por el cambio global climático que comprende elevación del mar, frecuencia e intensidad de huracanes y nortes.

RECOMENDACIONES

En la Riviera Maya como en la zona litoral de todo el país esta expuesta a fenómenos meteorológicos extremos y de la elevación del nivel del mar como resultado del cambio global climático por lo que se recomienda:

- Llevar a cabo un programa de vulnerabilidad de la zona costera por fenómenos hidrometeorológicos extremos y cambios del nivel del mar que contemple un monitoreo nacional y permanente que permitan identificar los cambios en la zona litoral para proponer las medidas de mitigación pertinentes.
- En la riviera maya es necesario llevar un monitoreo permanente a detalle

de la dinámica de los sitios de erosión-deposito y evaluar el efecto de los huracanes, nivel del mar (cambio global climático) y de los efectos antropogénicos que permitan evaluar las causas principales de erosión y tomar las medidas de mitigación necesarias.

Se recomienda que para conservar una playa se tome en cuenta la existencia de una fuente continua de sedimentos, un transporte litoral sin interrupciones y la protección de las playas a los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

LITERATURA CITADA

- Blake, E.S., E.N Rappaport, y C.W. Landsea, 2007, The deadliest, costliest and most intense United States tropical cyclones from 1851 to 2006 (and other frequently requested hurricane facts), NOAA Technical Memorandum NWS TPC-5, 43p.
- Carter, R.W.G., 1988. Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological, and Cultural Systems of Coastlines; Academic Press, London, UK.
- Gutiérrez-Estrada y Y. Montaño-Ley, 1987. Control de perfiles de playa en el área de Mazatlán, Sinaloa, México. *An.Inst.Cienc. del Mar.*
- Hernández-Santana, J.R., M.A. Ortiz-Pérez, A.P. Méndez-Linares, y L. Gama-Campillo, 2008. Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo xx hasta el presente. Boletín No. 65 del Instituto de Geografía.
- Hicks, S.D., 1978. An Average Geopotential Sea Level Sries for the United States, *Journal of Geophysical Research*, ; 83(C3): 1377-1379.
- Hoffman, J.S., D. Keyes, D., y J.G. Titus, 1983. Projecting future sea level rise. Methodology, estimates to the year 2100, and research needs; Report 230-09-007. US Environmental Protection Agency, Washigton, DC.
- Krumbein, W.C., y L.C. Sloss, 1963. Stratigraphy and Sedimentation, W.H. Freeman company, San Francisco, 660 p.
- Manzano, O., 1989. Estudio geomorfológico para la zonificación de las áreas de manejo de la reserva de la Biosfera los pantanos de Centla, Tabasco. Bsc thesis, Colegio de Geografía UNAM, México.

- Márquez-García, E., S. Flores-Erazo, A. Márquez-García, y V. Pérez Aguilar, 2006. Cambios por erosión y acreción de las playas del Municipio de Solidaridad, p. 45-57. En: M.J. Bello, G. De la Lanza-Espino, y G. Pérez de la Fuente, (eds.). Comunidad arrecifal de las playas en la Riviera Maya. Revista del Medio Ambiente, Turismo y Sustentabilidad, Vol. 2, núm. 1, Universidad del Caribe.
- Maul, G.A., y K. Hanson, 1985 A Century of Southeastern United States Climate Change Observations: Temperature, Precipitation and Sea Level. Global Change: A Southern Perspective. Southeast Regional Climate Center Colombia, sc, p. 139-155.
- NOAA, 2006. NOAA reviews record-setting 2005 Atlantic hurricane season", National Oceanic and Atmospheric Administration. Retrieved on 2006-04-26.
- Ortiz P., M.A., 1992. Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche- Tabasco. *Boletín Instituto de Geografía*, 25: 7-23.
- Rosengaus M., 1998. Efectos destructivos de ciclones tropicales. MAPFRE. 251p
- Sahagian, D.L., y S.M.Holland, 1991. Eustatic sea-level curve based on a stable frame of reference: Preliminary results. *Geology*, 19: 1208-1212.
- Salazar-Vallejo, S. I., 1998. Calentamiento global y efectos costeros. *Ava. Cient*, 25:10-20.
- Sánchez, S. N., L.R. Garduño, y R. P. Negrete, 2005. Análisis del nivel del mar en seis puertos del Golfo de México a través de un método alternativo. UAM-Xochimilco. UNAM.
- Saunders M. A., y S. Adam Lea, 2008. Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity. *Nature* 451: 557-560.
- Sylvatica S.C., 2003. Manifestación de impacto ambiental: modalidad particular. Tomo L Proyecto integral de recuperación y protección de playas con Epc-kanaab en el litoral norte, Punta Cancún , Quintana Roo. 252 p.
- Titus, J., 1987. Sea level rise and wetland loss: an overview Greenhouse effect; sea level rise and coastal wetlands, EPA (Environmental Protection Agency). us. pp. 1-35.
- Wayne, L., M., L. Byrnes, S. Bristsch, P. Penland, T. Wilkey, T. Williams, y J. Williams, 1993. A method for classifying land loss by geomorphology and process. p. 85-95. In: American Society of Civil Engineers. *Coastlines of the Gulf of México*. Nueva York.
- Wells J.T., 1995. Effects of Sea Level Rise on Coastal Sea Level Rise on Coastal Sedimentation and Erosion, p. 260. In: D. Eisma (ed.) *Climate Change Impact on Coastal Habitation*.

Carbajal Domínguez, J.A., 2010. Zonas costeras bajas en el Golfo de México ante el incremento del nivel del mar. p. 359-380. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMyl, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

**Zonas costeras bajas
en el Golfo de México
ante el incremento del nivel del mar**

J.A. Carbajal Domínguez

RESUMEN

En este trabajo se presenta una estimación de la extensión territorial afectada en el caso de incrementos del nivel del mar de 0.6 m, 1 m y 2 m. Asimismo, se estima el número de habitantes en las zonas vulnerables que se producirían en el escenario de elevación del mar en 1 m. Para ello, se utilizan los datos de elevación del terreno de la Shuttle Radar Topography Mission de la Nasa junto con un algoritmo propio que permite la reconstrucción de la zona afectada. Para la estimación de la superficie se emplea el procesamiento digital de imágenes para la delimitación de dichas zonas. Los resultados se procesan geo-referenciados para compararlos con los asentamientos humanos en la región de interés. Los resultados muestran que el área afectada total corresponde al 1.26% del a extensión territorial nacional y al 3.18% de la población total del país. Se verán afectadas 174 poblaciones de más de 1 000 habitantes. El estado con mayor superficie afectada es Tabasco con más del 21% de su territorio, mientras que el quien tendrá una población más vulnerable será Veracruz, con más de 1 millón de habitantes si el escenario de incremento en 1m se presentará hoy en día. Quintana Roo, por su parte, tendrá proporcionalmente un mayor impacto pues sufrirá los efectos en el 81.1% de su población. Se listan las poblaciones vulnerables y se muestran los mapas correspondientes a las diferentes zonas estudiadas.

Palabras clave: zona costera, incremento nivel dem mar, Golfo de México

OBJETIVO

Determinar la extensión territorial y la población afectada ante el incremento del nivel del mar en escenarios de 0.6 m, 1 m y 2 m en la costa del Golfo de México y el Caribe

- Desarrollar un método de estimación de la extensión territorial vulnerable en los escenarios considerados.
- Determinar la extensión territorial vulnerable para cada estado considerado.
- Determinar el número de habitantes y las poblaciones más vulnerables ante el escenario de elevación del nivel del mar de 1m.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener y procesar información de elevación de terreno para la costa los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

METODOLOGÍA

MATERIALES

Para el presente estudio se emplean los archivos de datos con formato hgt para disponibles en el sitio de USGS (http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/srtm3/North_America/), relativos a los estados de la costa del Golfo de México y del Caribe mexicano, la lista de todos los archivos utilizados se muestra en el apéndice I. Cabe mencionar que estos archivos contienen los datos de información de elevación de terreno obtenidos en la misión del transbordador espacial (Shuttle Radar Topography Mission, http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/p_status.htm). Por otro lado, los datos de población se obtienen de Inegi (2005)¹ para los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

Se descargan de la página del Conacyt Queretaro (<http://www.concyteq.edu.mx/cqrn2/kmldownload.htm>) los archivos kml con los polígonos que delimitan la extensión territorial de los estados y municipios de los estados del Golfo.

El procesamiento se realiza en ambiente Windows, con programas en c para el procesamiento de los datos de terreno y en lenguaje python para la escritura y despliegue de la información en archivos tipo kml (KeyHole Markup Language) para realizar la geo-referenciación de los resultados obtenidos.

Para el procesamiento y los cálculos se emplea una computadora PC con procesador AMD phenom de triple núcleo y 2 GB de memoria RAM, con disco duro de 300 GB.

¹ Conteo de Población Inegi 2005. Principales resultados por localidad 2005 (ITER), <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/localidad/iter/default.asp?s=est&c=10395>.

Para visualizar los resultados, se emplea el programa World Wind (<http://worldwind.arc.nasa.gov/java/>) para la visualización espacial de los resultados.

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA

Como ya se mencionó previamente, los archivos DEM (Digital Elevation Models), utilizados son los SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la Nasa y que están disponibles gratuitamente vía ftp en USGS (http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/srtm3/North_America/). Estos archivos comprenden 1° lat. por 1° long. Su nomenclatura se refiere a la esquina sur-oeste de este (esquina inferior izquierda) de este cuadrado. Cada uno de ellos contiene del orden de 1,214 x 1,214 mediciones, aunque estos valores cambian en cada caso, por lo que se tiene aproximadamente una medida elevación cada 100 m. Cada uno de estos archivos es transformado con un programa propio en dos archivos de texto: uno con la información de la información de tamaño de archivo y coordenadas, y otro con los datos de elevación del terreno en coordenadas UTM.

Los datos de elevación son procesados para determinar las zonas menores o iguales a la cota de incremento del nivel del mar considerada.

Sin embargo, de esta forma se obtiene sólo un muestreo discreto de datos o puntos de una superficie bidimensional. Esto hace necesario construir un algoritmo propio que permita delimitar las áreas de afectación de-

finidas por estos puntos debido a que no se encontró reportado ninguno en la literatura. Esto a pesar de que un estudio similar de áreas afectadas ante el incremento del nivel del mar se encuentra disponible en el sitio del Department of Geosciences Environmental Studies Laboratory (DGESL) de la Universidad de Arizona (Department of Geosciences Environmental Studies Laboratory, <http://geongrid.geo.arizona.edu/arcims/website/slrworld/viewer.htm>).

El algoritmo propuesto aquí consiste en convolucionar los datos que cumplen el criterio de la cota de elevación especificada con una función gaussiana de radio R, como se indica en las ecuaciones (1) y (2) (Goodman, 2004)²,

$$A(x,y) = C(x,y) \otimes G(x,y) \quad (1)$$

en donde $A(x,y)$ el área afectada, $C(x,y)$ son los datos que cumplen con el criterio de la elevación requerida, \otimes denota el producto de convolución y $G(x,y)$ es una función gaussiana en 2D dada, en este caso, por

$$G(x,y) = \exp [-(x^2 + y^2) / R^2] \quad (2)$$

Con R un parámetro que define el radio de extensión de la afectación alrededor de un punto de medición. En este caso se considera $R=10$ equivalente aproximadamente a 1000 m. La convolución (1) se realiza multiplicando escalarmente las transformadas de Fourier de cada una de las funciones descritas y finalmente tomando la transformada de Fourier inversa de este producto. Además, como lo

² Goodman, JW., 2004. Introduction to Fourier Optics. Roberts & Company Publishers.

que interesa es la extensión y no la amplitud de la función $A(x,y)$ se escala toda la intensidad a 1. Un ejemplo de procesamiento se presenta en la figura 1. Con los resultados se escribe un archivo de imagen en formato jpg, para tener una mayor eficiencia.

Como se observa en la figura 1, los puntos de elevación que satisfacen el criterio de elevación se encuentran distribuidos como se muestra en (A), mientras que después de aplicar la convolución, se tiene una superficie bien definida, como se muestra en (B). Además, se puede observar que se forman áreas conexas y otras que aparecen aisladas, como las dos zonas que se aprecian en la parte inferior izquierda. Eso indica que la zona principal de afectación se puede extender hasta esos lugares.

Ya con los resultados, se genera un archivo en lenguaje kml que permite su despliegue

en un sistema de información geográfica utilizando la imagen previamente obtenida, en este caso el software World Wind aunque el formato kml también puede ser utilizado por programas (*e.g.* Google Earth). En este mismo formato se emplean los datos de los polígonos que definen los estados y municipios de interés para el presente estudio. De esta forma, al superponer los resultados de las zonas vulnerables junto con los datos de los límites territoriales es posible determinar las áreas vulnerables por estado y por municipio.

Para determinar el área afectada por estado, se considera la imagen del estado total y se binariza (uno para puntos en el estado y cero para los puntos fuera) (González y Woods, 2007)³ junto con la imagen de las áreas vulnerables del estado. El porcentaje del área afectada puede estimarse mediante el cociente de las sumas de los píxeles,

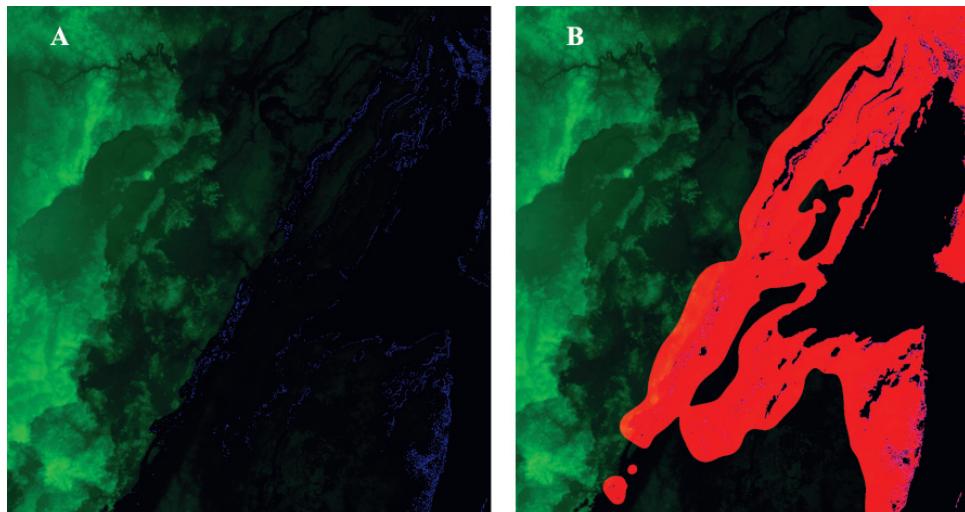


Figura 1. Imagen generada con datos de elevación de terreno de la bahía de Chetumal.
A) En verde se muestra el terreno; las zonas más brillantes corresponden a zonas más altas. En azul se muestran los puntos cuya altura es menor o igual a 0.6m. Se observa que siguen una distribución discreta. B) Resultado de aplicar el algoritmo: en rojo se muestra la posible extensión del terreno cuya elevación cumpla con los criterios deseados. Se observa una definición continua. En este ejemplo R=10 pixeles que corresponden a 1000m aproximadamente.

$$A\% = \left(\frac{\Sigma Pv}{\Sigma PT} \right) \times 100\% \quad (3)$$

En la que $A\%$ es el porcentaje del área afectada, Pv son los píxeles que conforman el área vulnerable y PT los píxeles que conforman el área del estado.

Para verificar estos resultados, se realiza un procedimiento similar para imágenes de la Universidad de Arizona⁴ para los estados de interés y para elevaciones del mar de 1 y 2 m aunque en este caso se realizó además un procesamiento en color para aislar las zonas vulnerables. Esto es, se convierte la imagen a color en RGB y se transforma al espacio HSV en el que se aíslan los píxeles correspondientes al color rojo. Un ejemplo se muestra en la figura 2.

Para determinar el número de habitantes vulnerables, se utilizan los datos del Inegi del conteo de población 2005, para los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Como primer paso, se consideraron únicamente los datos de los

municipios cuyo polígono coincide o contiene parte del área de afectación calculada para el caso de 1 m debido a que es el escenario más probable en el mediano plazo. De cada municipio se tomaron en consideración —en aras de facilitar el cálculo— la información correspondiente a las poblaciones mayores a 1 000 habitantes así como sus respectivas coordenadas geográficas. Con un programa propio, los datos son empleados para escribir una archivo con la información de las coordenadas en formato kml para poder desplegarles en un mapa.

Posteriormente, se descarta a las poblaciones que no están dentro o que no estén suficientemente cerca del área de afectación. Aquí se entiende que los asentamientos no son puntuales, si no que tienen una importante extensión llamada comúnmente mancha urbana. Por lo tanto, se consideran puntos cuya mancha urbana quede en la vecindad de las zonas de afectación. De esta forma se obtiene una lista de las poblaciones afectadas en el caso de tal escenario.



Figura 2. Ejemplo del procesamiento. A) Imagen del estado que se desea analizar; B) imagen binarizada del estado. Aquí el número de píxeles blancos es proporcional a la superficie del estado; C) Resultado del procesamiento de color para dejar únicamente los píxeles rojos. El número de estos píxeles es proporcional al área de afectación.

³ González, RC., y R.E. Woods, 2007. Digital Image Processing. Prentice Hall.

⁴ Departament of Geosciences Environmental Studies Laboratory, <http://geongrid.geo.arizona.edu/arcims/website/slrvworld/viewer.htm>

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SUPERFICIE AFECTADA

Los resultados obtenidos para cada estado, en cada escenario, se muestran en la tabla 1, la cual contiene además a manera de comparación, los resultados que se obtuvieron procesando las imágenes de los mapas de la Universidad de Arizona para las mismas zonas.

Se observa que ambos métodos coinciden satisfactoriamente para Quintana Roo, Yucatán, Veracruz y Tamaulipas. Sin embargo, las diferencias son notables para los casos de Tabasco y Campeche. Esto se debe a que en la zona fronteriza entre ambos estados, los datos de elevación de terreno tienen errores debido a que existe una importante cobertura vegetal, así como en las regiones bajas que incluso se encuentran por debajo del nivel del mar, las cuales permanecen cubiertas de agua la mayor parte del año. Debido a que los datos fueron obtenidos mediante interferometría de radar, la vegetación y los cuerpos de agua tienden a modificar los resultados. El efecto es que en el método de la Universidad de Arizona, la región afectada parece subestimada, pues se excluye a las regiones de Jonuta, Macuspana y Emiliano Zapata pertenecientes

al estado de Tabasco, así como el área correspondiente a Palizada en Campeche. Mientras que en el proceso aquí reportado dichas áreas son incluidas.

Para los otros estados, los dos métodos coinciden satisfactoriamente pues la diferencia entre la estimación de ambos métodos es menor al 3%. Lo anterior demuestra que el método aquí presentado para estimar el área afectada a partir de los datos de elevación es bastante razonable. La tabla 1 muestra el concentrado de los resultados en orden descendente de las áreas afectadas para los escenarios de 0.6 m, 1 m y 2 m.

En ella se muestra que, el estado de Tabasco es el que sufre una mayor área afectada, la cual se sitúa entre el 20 y el 25% del área total del estado. Mientras que Campeche y Quintana Roo tienen una disminución de alrededor 12% de su superficie. Finalmente, Yucatán, Veracruz y Tamaulipas muestran una menor afectación, al situarse entre 2 y 6%.

Para el escenario de 1 m, se tiene que la superficie total afectada es igual al 1.26% de la extensión continental de los Estados Unidos Mexicanos.

Tabla 1. Porcentaje de la superficie afectada para cada estado en los distintos escenarios.

Estado	0.6m	1m	2m	1m*	2m*
Tabasco	21.44%	25.87%	25.45%	8.18%	14%
Campeche	12.46%	12.60%	15.00%	7.46%	9.50%
Quintana Roo	11.38%	12.05%	12.50%	9.47%	11.94%
Yucatán	3.53%	3.86%	5.88%	4.70%	6.27%
Veracruz	3.21%	3.50%	4.64%	5%	5.30%
Tamaulipas	2.29%	2.40%	3.29%	2%	3.60%

*resultados de superficie con imágenes de la Universidad de Arizona

POBLACIÓN AFECTADA

En la tabla 2 se concentran los resultados obtenidos para el número de habitantes afectados en el escenario de 1m. Se muestra que Veracruz tendrá la afectación de un mayor número de habitantes que los otros estados. Le siguen Tamaulipas y Quintana Roo. La tabla 2 también muestra la densidad de habitantes vulnerables, la cual es la razón entre el número de habitantes de las zonas vulnerables y la extensión en km^2 de dicha área. Este parámetro permite ver cuáles estados tendrán una mayor presión sobre asentamientos humanos densamente poblados y que seguramente deberán implementar estrategias de reubicación. En ambos casos, aunque su superficie territorial sufre una afectación relativamente pequeña, dicha área cuenta con asentamientos humanos importantes.

En cuanto al porcentaje de la población vulnerable de cada estado, se tiene que Quintana Roo y Campeche verán afectados el 81.10% y 58.41% de su población respectivamente. Esto se debe a que la mayor parte de su población se asienta en ciudades cercanas a la costa.

En el caso de Tabasco y Yucatán, se observa que son los que tienen una menor población afectada, debido probablemente, a que las características de las áreas vulnerables ante el incremento del nivel del mar, no han sido aptas históricamente para el asentamiento de grandes grupos poblacionales, debido a que, o son zonas permanentemente inundadas, como en el caso de Tabasco; o son zonas permanentemente expuestas a eventos hidrometeorológicos tales como los huracanes, en el caso de Yucatán, entre otros factores.

En la columna del número de asentamientos, se puede observar que el estado con un mayor número de localidades –mayores a 1 000 habitantes- afectadas es Tabasco con 61, seguido por Veracruz con 45. Si se considera que Tabasco tiene una franja costera mucho menor que Veracruz, se puede notar la alta dispersión poblacional de Tabasco.

La población total afectada de la costa del Golfo de México corresponde al 3.18% de la población total del país, asentadas en 174 localidades que deberán tomar medidas para protegerse de los riesgos inherentes a un escenario de incremento del nivel del mar.

Tabla 2. Resultados de la población afectada por estado.

Estado	Habitantes vulnerables	% población	No. Asentamientos	Densidad Habitantes/ km^2
1 Veracruz	1 008 928	14.18%	45	401.37
2 Tamaulipas	651 647	21.54%	13	338.66
3 Quintana Roo	920 772	81.10%	23	180.38
4 Campeche	440 910	58.41%	19	60.41
5 Yucatán	66 763	3.67%	13	43.66
6 Tabasco	199 491	10.02%	61	31.17
Total	3 288 511		174	
% Pob. Nacional	3.18%			

A continuación, de las tablas 3 a la 8, se muestran los asentamientos humanos vulnerables por estado con su respectivo número de habitantes, se cuerdo al conteo de población Inegi (2005). Se incluyen las coordenadas geográficas de las mismas para evitar los errores por homonímias.

De las figuras 3 a la 15, se muestran los mapas de la zona estudiada con las poblaciones ahí asentadas. Las zonas vulnerables

se muestran en rojo, mientras que en blanco se muestran las fronteras de los estados y los municipios. Los círculos pequeños muestran la ubicación geográfica de las poblaciones, de acuerdo a sus coordenadas. Algunas de las poblaciones que no aparecen claramente dentro de la zona de afectación se incluyen en este estudio debido a la cercanía a la zona de su mancha urbana.

CONCLUSIONES

Se ha obtenido una estimación para la superficie afectada en la costa del Golfo de México para los escenarios de incremento del nivel del mar de 0.6 m, 1 m y 2 m usando un método basado en el producto de convolución. Así mismo, se obtuvo una estimación de la pobla-

ción total vulnerable de esta región para el escenario de 1 m. Los resultados muestran que el área afectada total corresponde al 1.26% de la extensión territorial nacional y al 3.18% de la población total del país. Se verán afectadas 174 poblaciones de más de 1 000 habitan-

Tabla 3. Resultados de población afectada por localidad para Tamaulipas.

	Nombre	Habitantes	Latitud	Longitud
1	Tampico	303 635	22.2552778	-97.8686111
2	Ciudad Madero	193 045	22.2763889	-97.8313889
3	Miramar	82 079	22.3375	-97.8694444
4	Altamira	50 896	22.3958333	-97.9369444
5	Soto la Marina	9 389	23.7675	-98.2077778
6	Carboneras (La Carbonera)	2 723	24.6263889	-97.7166667
7	Las Higuerillas	2 036	25.2622222	-97.4361111
8	La Pesca	1 632	23.7872222	-97.7766667
9	La Colonia (Estación Colonias)	1 435	22.4358333	-98.0172222
10	Ricardo Flores Magón	1 383	22.4530556	-97.9055556
11	Lomas del Real	1 216	22.5194444	-97.8994444
12	San Germán	1 153	25.2161111	-97.9208333
13	Carvajal	1 025	24.5041667	-97.7430556
Total		65 1647		
%Pob.		21.54%		

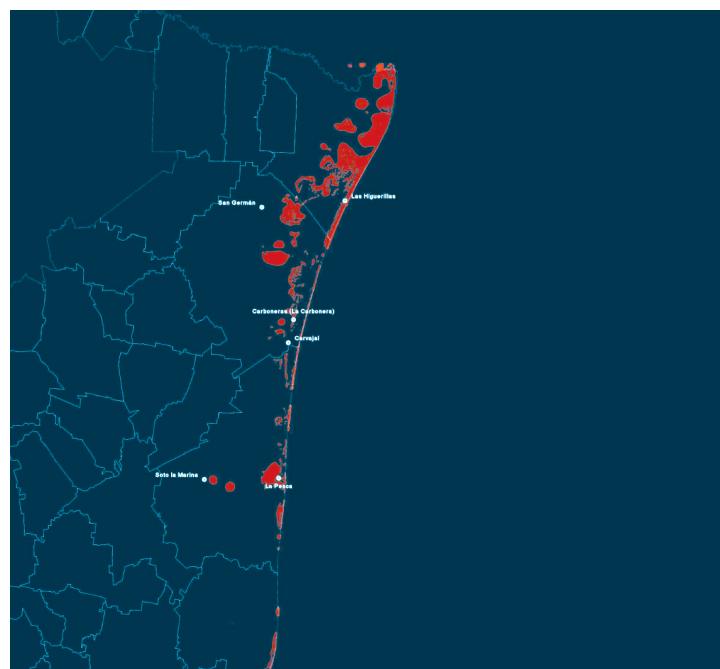


Figura 3. Tamaulipas, región norte. Las Higuerillas, Carboneras, Carvajal y La Pesca aparecen claramente en la zona de afectación.



Figura 4. Frontera Tamaulipas-Veracruz. Esta zona constituye un área densamente poblada. En particular, el municipio de Tampico aparece ampliamente afectado.

Tabla 4. Resultados de población afectada por localidad para Veracruz.

	Nombre	Habitantes	Latitud	Longitud
1	Veracruz	444 438	19.1991667	-96.1377778
2	Coatzacoalcos	234 174	18.1377778	-94.4352778
3	Túxpam de Rodríguez Cano	78 523	20.9588889	-97.4030556
4	Pánuco	37 450	22.0552778	-98.1775
5	Alvarado	22 330	18.7702778	-95.7605556
6	Allende	20 501	18.15	-94.405
7	Benito Juárez	14 015	22.1994444	-97.8411111
8	Anáhuac	13 657	22.2069444	-97.8580556
9	Alto Lucero	13 525	20.9508333	-97.4433333
10	Gutiérrez Zamora	13 484	20.4491667	-97.0838889
11	Boca del Río	10 980	19.1008333	-96.1072222
12	Moralillo	9 154	22.2255556	-97.9058333
13	Cd. Cuauhtémoc	8 950	22.1833333	-97.8361111
14	Santiago de la Peña	8 538	20.945	-97.4063889
15	Tlacotalpan	8 006	18.6116667	-95.6611111
16	Antón Lizardo	6 187	19.0566667	-95.9880556
17	Hidalgo	6 159	22.2338889	-97.8302778
18	Primero de Mayo (Los Mangos)	5 068	22.2263889	-97.8222222
19	Fraccionamiento Ciudad Olmeca	4 948	18.1497222	-94.5536111
20	Tamiahua	4 849	21.2780556	-97.4455556
21	Tecolutla	4 523	20.4797222	-97.01
22	Tamos	3 740	22.2188889	-97.9930556
23	Nautla	3 118	20.2072222	-96.7722222
24	Palma Sola	2 633	19.7705556	-96.4313889
25	Tampico Alto	2 242	22.1105556	-97.8033333
26	Villa Cacalilao (Dos)	2 132	22.1530556	-98.1722222
27	Casitas	2 024	20.2538889	-96.7991667
28	Tonalá	1 989	18.2075	-94.1388889
29	Paso Nacional	1 830	18.7677778	-95.7475
30	Cucharas	1 592	21.6158333	-97.6577778
31	Antonio J. Bermúdez	1 506	22.1516667	-98.1580556
32	Estero de Milpas	1 467	21.2538889	-97.4497222
33	Saladero	1 379	21.4247222	-97.5433333
34	La Victoria (La Peñita)	1 371	20.9361111	-97.3788889
35	Las Escolleras	1 334	18.7755556	-95.7472222
36	La Guadalupe	1 218	20.3736111	-96.9216667

Tabla 4 (continuación). Resultados de población afectada por localidad para Veracruz.

	Nombre	Habitantes	Latitud	Longitud
37	Rancho Nuevo	1 209	20.6711111	-97.2063889
38	Las Higueras	1 194	20.0361111	-96.6211111
39	Mandinga y Matoza	1 154	19.0486111	-96.0730556
40	Banderas	1 135	20.9883333	-97.3933333
41	Barra de Cazones	1 065	20.7208333	-97.2033333
42	El Farallón	1 063	19.6375	-96.4102778
43	Playa de la Libertad	1 053	19.0822222	-96.0972222
44	Playa de Chachalacas	1 015	19.4175	-96.3247222
45	Las Barrillas	1 006	18.1863889	-94.5961111
Total		1 008 928		
%Pob.		14.18%		

**Figura 5.** Veracruz. En sta región todas las poblaciones costeras aparecen en la zona afectada.

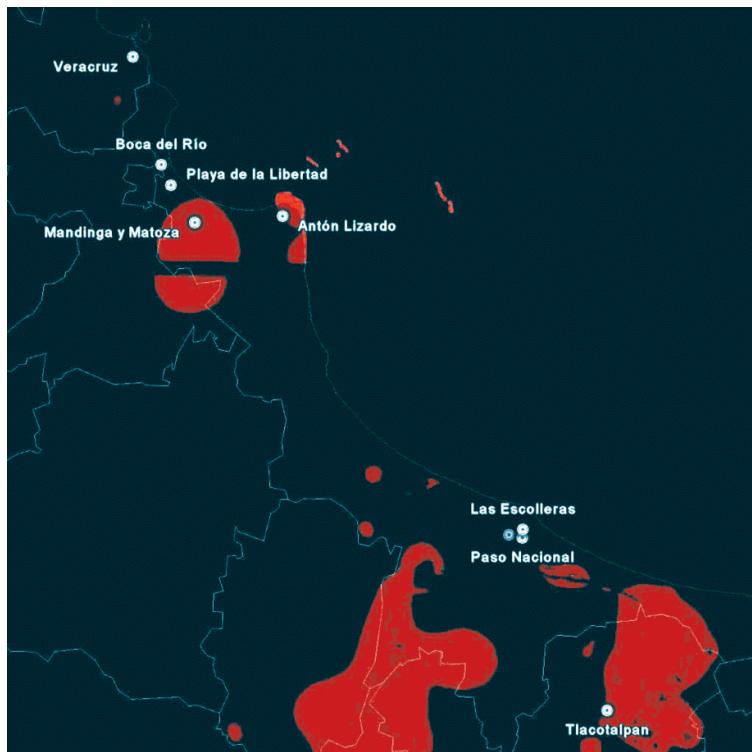


Figura 6. Mapa correspondiente a las regiones cercanas al puerto de Veracruz.

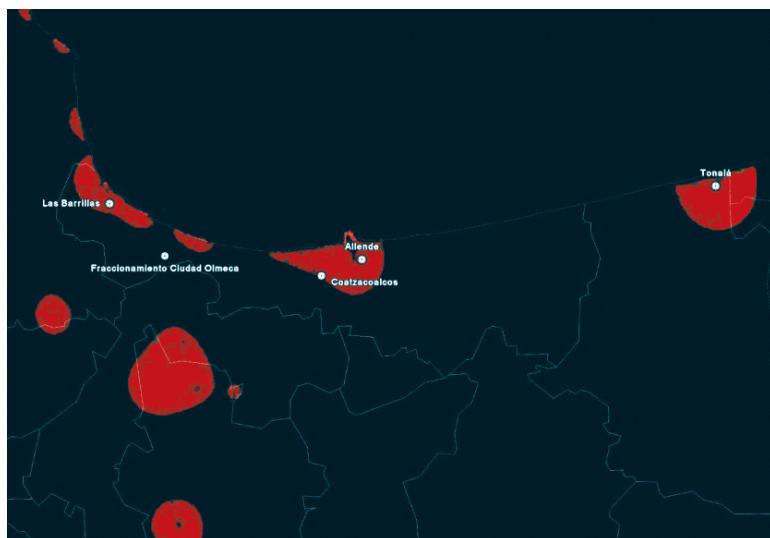


Figura 7. Veracruz-Tabasco. El municipio de Coatzacoalcos, densamente poblado, se muestra como una zona afectada.

Tabla 5. Resultados de población afectada por localidad para Tabasco.

	Nombre	Habitantes	Latitud	Longitud
1	Paraíso	24 773	18.3961111	-93.2127778
2	Frontera	21 810	18.5336111	-92.6469444
3	Emiliano Zapata	16 796	17.7413889	-91.7636111
4	Tamulté de las Sabanas	7 874	18.1616667	-92.7838889
5	Vicente Guerrero	7 554	18.3913889	-92.8919444
6	Cor. Andrés Sánchez Magallanes	7 277	18.2933333	-93.8633333
7	Jonuta	6 341	18.0902778	-92.1366667
8	Pemex (Ciudad Pemex)	5 752	17.8822222	-92.4825
9	La Curva	5 098	17.8686111	-92.4883333
10	Buena Vista 1a. Sección	4 527	18.1441667	-92.7497222
11	Quintín Arauz	4 341	18.3675	-93.2147222
12	Simón Sarlat	4 329	18.3438889	-92.8097222
13	Reyes Hernández 2a. Sección	3 506	18.2369444	-93.2558333
14	Cuauhtémoc	3 405	18.4019444	-92.955
15	Ignacio Allende	3 314	18.3830556	-92.8444444
16	Chablé	3 152	17.8561111	-91.7816667
17	Guatacalca	3 138	18.1669444	-92.9780556
18	Puerto Ceiba	2 726	18.4113889	-93.18
19	Cocohital	2 403	18.3972222	-93.3455556
20	Moctezuma 1a. Sección	2 309	18.3766667	-93.2313889
21	Moctezuma 2a. Sección	2 292	18.3686111	-93.2208333
22	Libertad 1a. Sección (El Chivero)	2 246	18.3291667	-93.1694444
23	Ignacio Zaragoza	2 090	18.4016667	-92.9594444
24	Álvaro Obregón (Santa Cruz)	2 087	18.3886111	-92.8022222
25	Las Flores 1a. Sección	1 838	18.4025	-93.2291667
26	Francisco I. Madero	1 795	18.4663889	-92.7416667
27	Tucta	1 790	18.195	-92.9938889
28	Nicolás Bravo	1 789	18.2941667	-93.13
29	José María Pino Suárez 1a. Sección	1 770	18.3522222	-93.3822222
30	Monte Grande	1 757	17.9358333	-92.2638889
31	Las Flores 2a. Sección	1 712	18.4244444	-93.2519444
32	Benito Juárez	1 685	18.4225	-92.8058333
33	Zapotal 2a. Sección	1 653	18.3130556	-93.2666667
34	Puerto Ceiba (Carrizal)	1 648	18.405	-93.1897222
35	Olcuatán	1 577	18.1908333	-92.9611111
36	Tepetitán	1 543	17.8188889	-92.3725

Tabla 5 (continuación). Resultados de población afectada por localidad para Tabasco.

	Nombre	Habitantes	Latitud	Longitud
37	Tecoluta 2a. Sección	1 517	18.25	-93.0194444
38	Tránsito Tular	1 465	18.3402778	-93.3975
39	Gobernador Cruz	1 454	18.435	-92.8716667
40	Nuevo Torno Largo	1 381	18.4327778	-93.1633333
41	Quintín Aráuz	1 353	18.3236111	-92.5661111
42	Nueva División del Bayo (Guatemala)	1 333	17.8402778	-92.4888889
43	Chichicastle 1a. Sección	1 318	18.3094444	-92.4480556
44	Acachapan y Colmena 3a. Sección	1 239	18.0477778	-92.7780556
45	Chiltepec (Sección Banco)	1 214	18.4275	-93.1130556
46	Occidente (San Francisco)	1 199	18.3313889	-93.2522222
47	Pénjamo	1 196	18.4347222	-93.0930556
48	Libertad de Allende	1 173	18.4086111	-92.8269444
49	Estancia	1 170	18.1772222	-92.8127778
50	Oriente (San Cayetano)	1 128	18.3480556	-93.2052778
51	Reforma 2a. Sección (Santa María)	1 128	18.3352778	-93.0461111
52	Las Flores 3a. Sección (El Cerro)	1 099	18.425	-93.2797222
53	José María Pino Suárez 2a. Sección	1 098	18.3838889	-93.3794444
54	Chiltepec (Sección Tanque)	1 077	18.4283333	-93.0913889
55	Unión y Libertad	1 069	17.9447222	-92.6416667
56	Potreritos	1 068	18.3113889	-93.2819444
57	La Victoria	1 044	18.5905556	-92.6341667
58	El Escribano	1 034	18.4105556	-93.2216667
59	Jalapita	1 033	18.4133333	-92.9938889
60	La Sábana	1 004	18.4416667	-92.8877778
61	Ignacio Zaragoza 1a. Sección	1 000	18.3316667	-93.3355556
Total		199,491		
%Pob.		10.02%		

tes. El estado con mayor superficie afectada es Tabasco con más del 21% de su territorio, mientras que el que tendrá una población más vulnerable será Veracruz, con más de 1 millón de habitantes si el escenario de incremento en 1 m se presentará hoy en día. Quintana Roo, por su parte, tendrá proporcionalmente un mayor impacto pues sufrirá los efectos en el

81.1% de su población. En el caso de Tabasco y Campeche, la línea costera sufrirá un importante retroceso, lo que impactará también en las poblaciones que en la actualidad no están en la costa, además de que se producirá una importante contaminación de las fuentes de agua dulce y la salinización de los suelos.



Figura 8. Tabasco. Poblaciones costeras de Tabasco afectadas. Nótese la gran dispersión de los asentamientos así como la afectación sobre asentamientos lejanos a la costa.



Figura 9. Tabasco- Campeche. Se observa una enorme afectación debido a que predominan las zonas bajas. Nótese la afectación sobre asentamientos distantes a la costa.

Tabla 6. Resultados de población afectada por localidad para Campeche.

	Nombre	Habitantes	Latitud	Longitud
1	Campeche	211 671	19.8422222	-90.5316667
2	Ciudad del Carmen	154 197	18.6433333	-91.8308333
3	Champotón	27 235	19.3555556	-90.7233333
4	Seybaplaya	8 285	19.6383333	-90.6877778
5	Sabancuy	6 159	18.9738889	-91.1794444
6	Isla Aguada	4 688	18.7847222	-91.4916667
7	Nuevo Progreso	4 492	18.6216667	-92.2888889
8	Villa Madero	3 507	19.5266667	-90.7013889
9	San Antonio Cárdenas	3 319	18.6141667	-92.2225
10	Palizada	3 061	18.2555556	-92.0916667
11	Sihochac	2 631	19.5013889	-90.5861111
12	Ley Federal de Reforma Agraria	2 398	19.0622222	-90.8080556
13	Atasta	2 096	18.6197222	-92.1041667
14	Checubul	1 541	18.8233333	-91.0116667
15	Francisco Villa (Mamantel)	1 208	18.5244444	-91.09
16	El Aguacatal (Chumpán)	1 189	18.2138889	-91.5105556
17	Emiliano Zapata	1 126	18.6652778	-92.3111111
18	CERESO San Francisco Kobén	1 072	19.9111111	-90.4213889
19	Imí	1 035	19.8722222	-90.4711111
Total		440 910		
%Pob.		58.41%		

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios mas detallados para conocer la topografía del terreno alejado a los núcleos de población importante con mejor precisión usando otras tecnologías como el LIDAR⁵. Lo anterior es necesario para conocer a detalle las zonas y sus niveles de impacto así como las zonas que podrían servir

para la instalación de nuevas zonas urbanas. En este caso, es importante que la reubicación sea lo mejor planeada y organizada posible con el fin de optimizar recursos y que se pueda resolver también el problema de la dispersión poblacional en las regiones rurales⁶.

⁵ Hinkel J., y R.J. Klein, 2009. Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, 19: 384-395.

⁶ Bosello, F., R. Roson, y R. Tol, 2007. Economy-wide estimates of the implications of climate change: sea level rise. *Environmental and Resource Economics*, 37: 549-571.

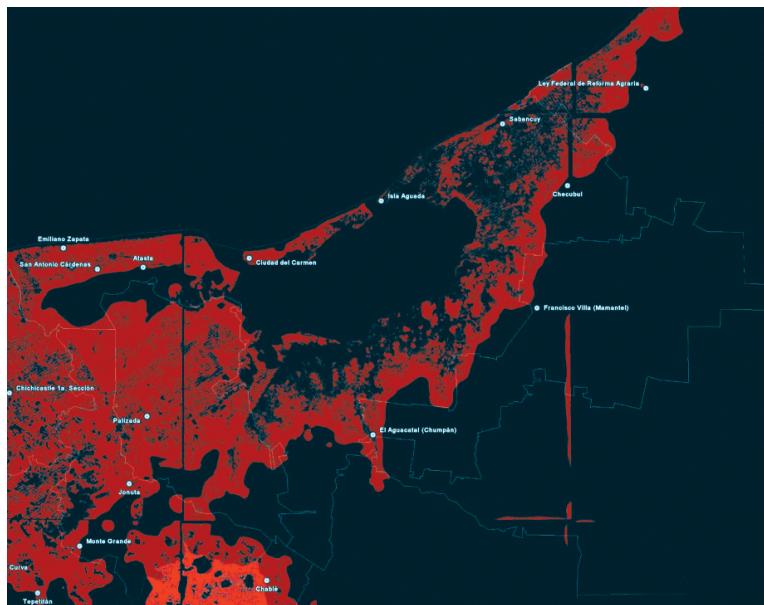


Figura 10. Campeche. Se observa la afectación de Ciudad del Carmen y Sabancuy.

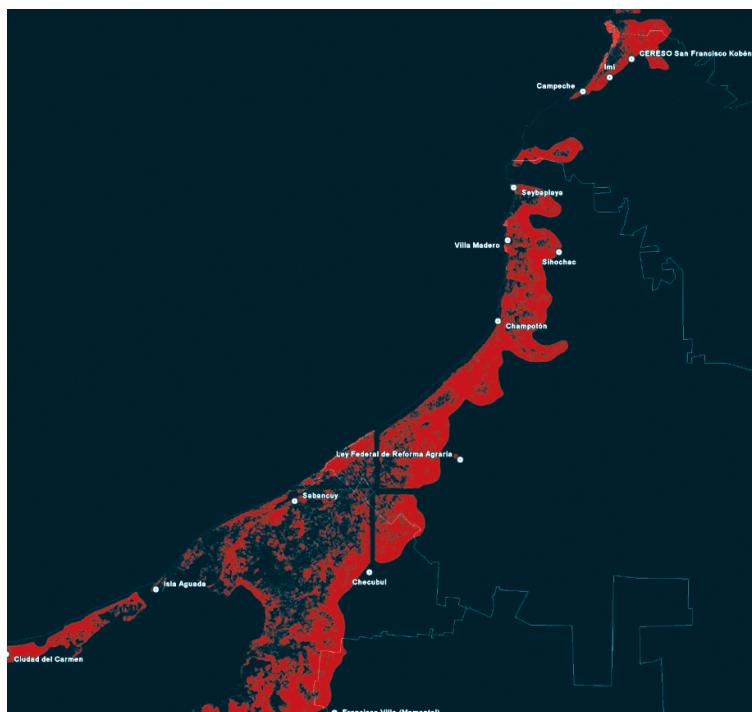


Figura 11. Campeche. Nótese la afectación sobre Campeche y Champotón.

Tabla 7. Resultados de población afectada por localidad para Yucatán.

	Nombre	Habitantes	Latitud	Longitud
1	Progreso	35 519	21.2827778	-89.6636111
2	Chicxulub (Chicxulub Puerto)	5 052	21.2938889	-89.6083333
3	Campesino Flamboyanes	3 022	21.21	-89.6577778
4	Chelem	3 017	21.2688889	-89.7430556
5	Dzilam de Bravo	2 188	21.3925	-88.8913889
6	Río Lagartos	2 127	21.5975	-88.1577778
7	San Felipe	1 769	21.5672222	-88.2311111
8	El Cuyo	1 748	21.5158333	-87.6783333
9	Chuburná	1 720	21.2533333	-89.8166667
10	Sisal	1 672	21.1652778	-90.0305556
11	Telchac Puerto	1 618	21.3405556	-89.2630556
12	Las Coloradas	1 068	21.6083333	-87.9897222
13	Celestún	6 243	20.8591667	-90.4
Total		66 763		
%Pob.		3.67%		



Figura 12. Yucatán. En este caso, se observa la afectación de Progreso y Celestún.

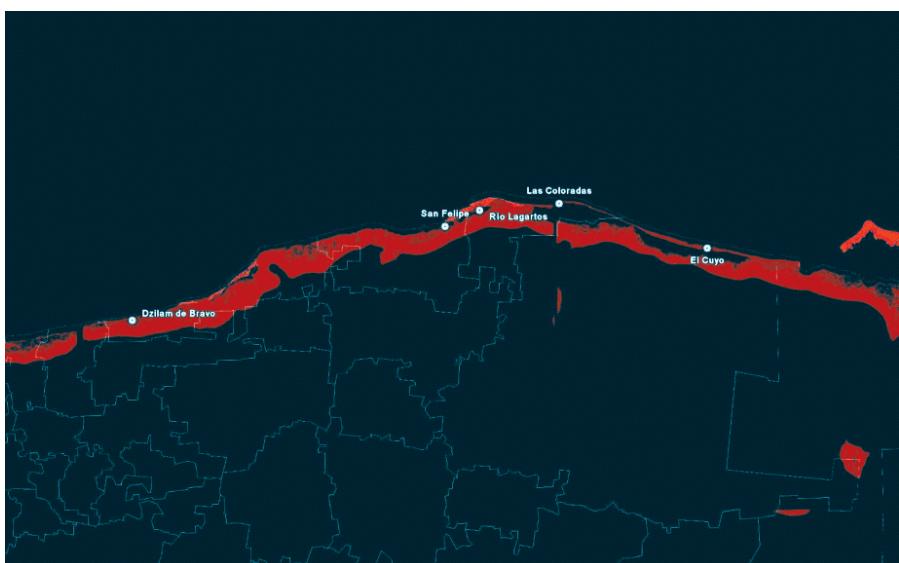


Figura 13. Yucatán. Se observa la afectación a todo lo largo de la costa aunque el avance de la línea costera es relativamente pequeño.



Figura 14. Quintana Roo. La mayoría de los municipios y las poblaciones más importantes son afectadas.

Tabla 8. Resultados de población afectada por localidad para Quintana Roo.

	Nombre	Habitantes	Latitud	Longitud
1	Cancún	526 701	21.1605556	-86.8475
2	Chetumal	136 825	18.5036111	-88.3052778
3	Playa del Carmen	100 383	20.6275	-87.0811111
4	Cozumel	71 401	20.5166667	-86.9416667
5	Tulum	14 790	20.2119444	-87.4658333
6	Alfredo V. Bonfil	13 822	21.0825	-86.8513889
7	Isla Mujeres	11 147	21.2355556	-86.7627778
8	Bacalar	9 833	18.6769444	-88.3952778
9	Joaquín Zetina Gasca	6 629	20.8536111	-86.8986111
10	La Guadalupana	5 892	20.6875	-87.0561111
11	Calderitas	4 446	18.5544444	-88.2583333
12	Limones	1 961	19.0241667	-88.1083333
13	Cacao	1 915	18.1927778	-88.695
14	Subteniente López	1 890	18.4936111	-88.3930556
15	Xul-Ha	1 838	18.5516667	-88.4638889
16	Carlos A. Madrazo	1 769	18.5022222	-88.5225
17	Pucté	1 757	18.2333333	-88.6613889
18	Puerto Aventuras	1 629	20.5116667	-87.2341667
19	Ucum	1 345	18.5030556	-88.5183333
20	Sabidos	1 265	18.3558333	-88.5894444
21	Ciudad Chemuyil	1 239	20.3486111	-87.3530556
22	Akumal	1 198	20.4	-87.3211111
23	Puerto Morelos	1 097	20.8536111	-86.8752778
Total		920 772		
%Pob		81.10%		

Se sugiere impulsar estudios orientados de forma que se comprenda los efectos locales del incremento del nivel del mar por mareas, corrientes marinas y procesos de erosión de la franja costera que permita tener una visión clara de la dinámica costera de cada lugar, principalmente, las más vulnerables⁷.

Es primordial el diseño de planes de desarrollo urbano que tomen en cuenta las zonas vulnerables aquí reportadas, de lo contrario, un número mayor de habitantes podrían verse afectados. De hecho se deberían considerar políticas que prohíban los asentamientos humanos en dichas áreas.

⁷ McGranahan, G., D. Balk, y B. Anderson, 2007. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19: 17-37.

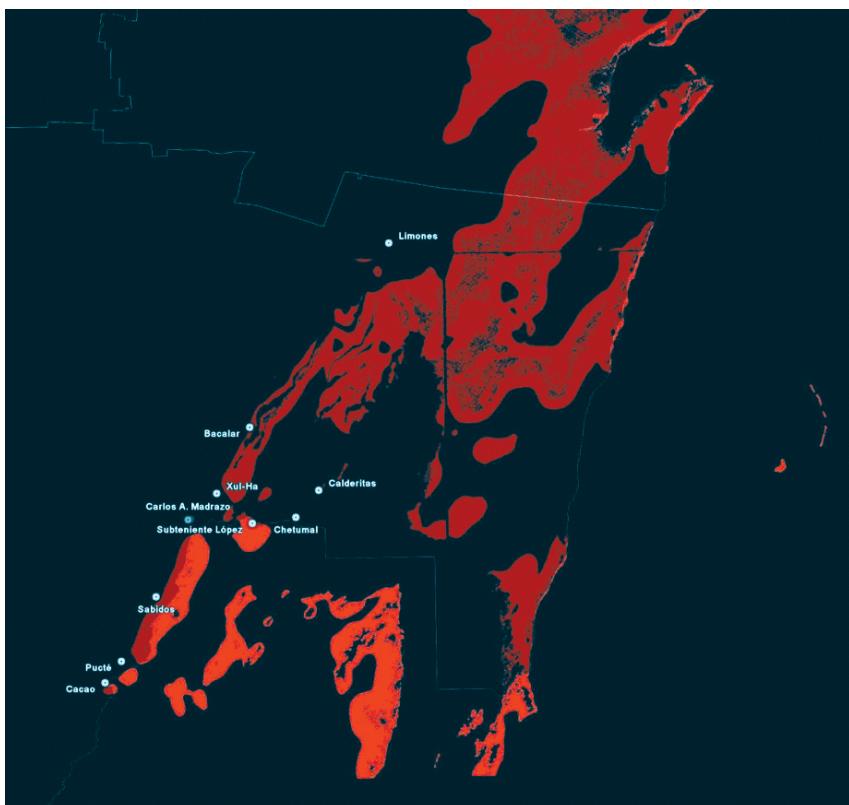


Figura 15. Quintana Roo. Se observa una gran vulnerabilidad alrededor de Chetumal.

Se debe hacer un inventario de infraestructura vulnerable y así realizar una mejor evaluación de los impactos y conocer que áreas se pueden proteger con defensas costeras y cuales son más rentables de dejar sin protección. De esta forma, los tomadores de decisiones tendrán información confiable que les permita decidir las estrategias a seguir, en términos de costo y seguridad de la población[12].

Es muy importante que con la información obtenida por estudios como el presente y posteriores, se desarrolle una sistema de información geográfica (SIG) dedicado a los problemas de cambio climático, de acceso público, para facilitar la educación de la población y la toma de decisiones.

⁸ Cayan, D., P. Bromirski, K. Hayhoe, M. Tyree, M. Dettinger, y R. Flick, 2008. Climate change projections of sea level extremes along the California coast. *Climatic Change*, 87: 57-73.

APÉNDICE I. LISTA DE ARCHIVOS HGT UTILIZADOS

N17W092.hgt	N20W087.hgt
N17W093.hgt	N20W088.hgt
N17W094.hgt	N20W090.hgt
N17W095.hgt	N20W091.hgt
N17W096.hgt	N20W097.hgt
N18W088.hgt	N20W098.hgt
N18W089.hgt	N21W087.hgt
N18W091.hgt	N21W088.hgt
N18W092.hgt	N21W089.hgt
N18W093.hgt	N21W090.hgt
N18W094.hgt	N21W091.hgt
N18W095.hgt	N21W098.hgt
N18W096.hgt	N21W099.hgt
N18W097.hgt	N22W098.hgt
N19W088.hgt	N22W099.hgt
N19W091.hgt	N23W098.hgt
N19W092.hgt	N23W099.hgt
N19W096.hgt	N24W098.hgt
N19W097.hgt	N24W099.hgt
N19W098.hgt	N25W098.hgt

Ramírez León, H., F. Torres Bejarano, E. Herrera Díaz y C. Rodríguez Cuevas, 2010. Hidrodinámica del río Coatzacoalcos y estimación de las posibles inundaciones ante escenarios del cambio climático. p. 381-402. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICM y L, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Hidrodinámica del río Coatzacoalcos y estimación de las posibles inundaciones ante escenarios del cambio climático

H. Ramírez León, F. Torres Bejarano, E. Herrera Díaz y C. Rodríguez Cuevas

RESUMEN

En el presente estudio se presentan las simulaciones numéricas para evaluar la variación del nivel de superficie libre del río Coatzacoalcos como consecuencia de una posible sobre elevación de 40, 60 y 100 cm, que son los valores determinados por el Instituto Nacional de Ecología. Esta variación se realiza en los últimos treinta kilómetros antes de su desembocadura. Se realizaron simulaciones para determinar las inundaciones que tendrían lugar por el aumento del nivel del mar en 10 m, en la zona aledaña al río y en las costas cercanas. La primera parte del estudio se realizó mediante la adaptación de un modelo numérico que resuelve las ecuaciones para las aguas someras. Se estudiaron tres diferentes épocas del año (secas, lluvias y nortes), para cada uno de los tres incrementos. Se utilizan los gastos hidrológicos correspondientes de la cuenca asociada y los niveles medios del nivel del mar en la desembocadura del río. Se simularon cinco días de las tres épocas del año; para cada época se diseñaron cuatro escenarios con diferentes condiciones iniciales y de frontera (gasto del río y nivel de marea). La principal conclusión obtenida fue que en ningún caso, la marea por sí sola podría provocar un desbordamiento del río, y que más bien, las inundaciones de carácter extremo podrían presentarse en un evento climatológico en el que se conjunten diferentes factores como, lluvias extremas, intensas y prolongadas, nortes, condiciones de suelo saturado, entre otras. Por otro lado, se presenta la estimación de las zonas potencialmente inundables con una sobre elevación del mar, los resultados muestran que esta zona no estaría sujeta a grandes inundaciones, comparada con otras regiones del país.

Palabras clave: modelación hidrodinámica, escenarios de cambio climático, inundaciones

INTRODUCCIÓN

En la primera parte de este estudio se realizan simulaciones numéricas para evaluar el incremento en el nivel de superficie libre del río Coatzacoalcos, mediante la aplicación de un modelo hidrodinámico que resuelve las ecuaciones para aguas someras (Ramírez *et al.*, 2007). Se construyen escenarios para tres diferentes épocas del año (secas, lluvias y nortes), en las cuales se utilizan los gastos hidrológicos correspondientes y los niveles medios del nivel del mar en la desembocadura del río. Se construyen también escenarios hipotéticos en los que se adicionan al nivel del medio del mar, valores de 40, 60 y 100 cm, observando con esto el comportamiento del incremento de la superficie libre en el río. En la segunda parte de este estudio se estima el impacto que tendría el aumento del nivel del mar en la zona aledaña al río y en la zona de la

desembocadura. Este estudio se llevó a cabo considerando un software especializado y disponible en la red. Los resultados mostraron que esta zona no está sujeta a fuertes impactos por el aumento del nivel del mar en la región de estudio, comparado con otras zonas potencialmente inundables como las regiones de Tabasco o Quintana Roo.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

EL río Coatzacoalcos tiene su nacimiento en la Sierra Atravesada del estado de Oaxaca y a la altura de la población de Suchiapa en Veracruz, adquiere una dirección NNE hasta su desembocadura en el Golfo de México (figura 1). Se caracteriza por formar uno de los sistemas estuarinos más grandes de México, ya que

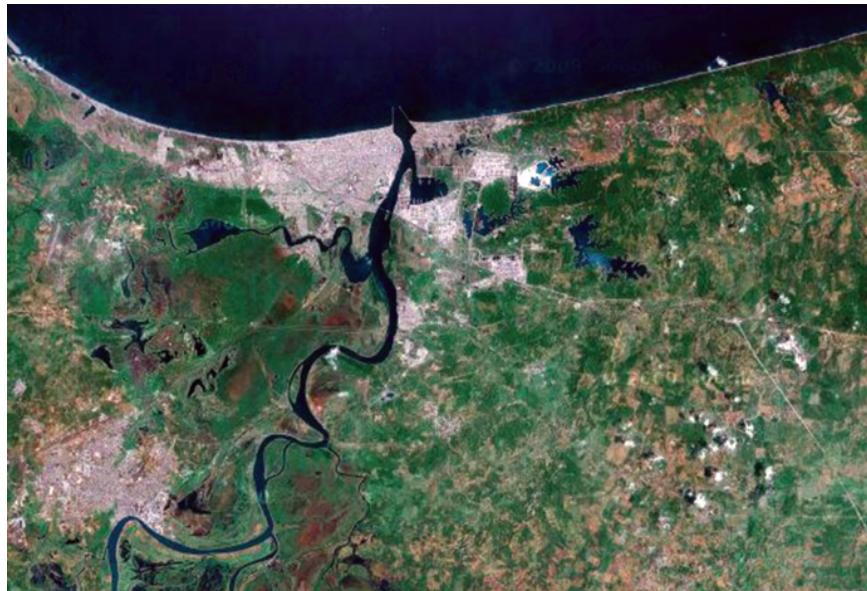


Figura 1. Río Coatzacoalcos, de Minatitlán a Coatzacoalcos.

durante la temporada de secas, la influencia de la cuña salina es detectable de 35 a 40 kilómetros río arriba, es decir a la altura de Minatitlán. Por otro lado, es el principal receptor de aguas residuales y desechos industriales que se producen en el área de Minatitlán, Cosoleacaque, Nanchital de Lázaro Cárdenas del Río y Coatzacoalcos, siendo por esto considerado como un estuario con características de deterioro irreversible (Bozada y Páez, 1986).

El río Coatzacoalcos ha servido como apoyo esencial en el desarrollo económico del suroeste mexicano, debido a las posibilidades que ofrece para la navegación y el movimiento portuario en la región; asimismo, continúa considerándose como una fuente de trabajo y desarrollo ya que, en su entorno se llevan a cabo diversas actividades productivas que involucran el uso y aprovechamiento de sus aguas.

OBJETIVO GENERAL

Mediante el análisis de la información hidrológica y oceanográfica generar los patrones

de corrientes y elevaciones de superficie libre del río Coatzacoalcos para tres épocas del año (secas, lluvias y nortes) para las sobreelevaciones del nivel del mar de 40, 60 y 100 cm. y determinar las zonas probables de inundación por el incremento en el nivel del mar en 100 cm.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Con la información hidrológica y oceanográfica, diseñar escenarios de modelación hidrodinámica representativos del río Coatzacoalcos.
- Adaptación del modelo hidrodinámico al río Coatzacoalcos y su interacción con el mar.
- Determinar la dinámica de la elevación de la superficie libre del río, provocada por las diferentes condiciones de marea y para los incrementos del nivel del mar de 40, 60 y 100 cm.
- Determinar las zonas potencialmente inundables con el incremento del nivel del mar en 100 cm.

DATOS DE REFERENCIA

La información analizada y procesada fue obtenida de diferentes estudios y herramientas disponibles. Se obtuvo información pertinente a las tres épocas del año de interés: secas, lluvias y nortes.

ESTIMACIÓN DE LA BATIMETRÍA

La batimetría se obtuvo mediante información propia generada en campo, a través de

mediciones realizadas en 10 secciones ubicadas a lo largo del tramo seleccionado (Torres, 2009) que posteriormente fueron regeneradas mediante un procedimiento de interpolación-extrapolación con ayuda del software especializado Surfer versión 8.0 de 2002. Los datos fueron procesados y adaptados para que pudieran ser leídos por el modelo, conforme a las mallas numéricas diseñadas.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

INTRODUCCIÓN

En esta sección se describe el procedimiento llevado a cabo para la recopilación y procesamiento de la información hidrológica y oceanográfica, de tal manera que se pueda disponer de los parámetros naturales que determinan el comportamiento hidrodinámico del sistema estudiado, tales como, precipitación, escurrimiento y niveles de marea.

En las siguientes secciones se detalla la información obtenida.

HIDROLÓGICA

Para el análisis de la información hidrológica, se utilizaron diferentes cartas digitales a escala 1:250,000 elaboradas por INEGI y manejadas a través del software ArcView 9.2, sobreponiendo las cartas hidrológicas, de escurrimiento medio anual, de cuencas y de regiones hidrológicas (figura 2). El río Coatzacoalcos

se ubica en la Región Hidrológica RH29 con una extensión de la cuenca de 5 915.15 km².

METEOROLÓGICA

La información meteorológica se obtuvo del software ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica), desarrollado por el IMTA y difundido por Conagua.

Inicialmente se localizaron mediante la carta digital de estaciones climatológicas a escala 1:250,000, las estaciones más cercanas a la zona de estudio en el estado de Veracruz, siendo preseleccionadas las que se presentan en la figura 3 y tabla 1.

Los resultados del procesamiento de la información de las estaciones seleccionadas, se muestra en la figura 4. El ERIC para dichas estaciones, cuenta con datos de precipitación, evaporación y temperatura desde el año 1963 hasta el año 2002.

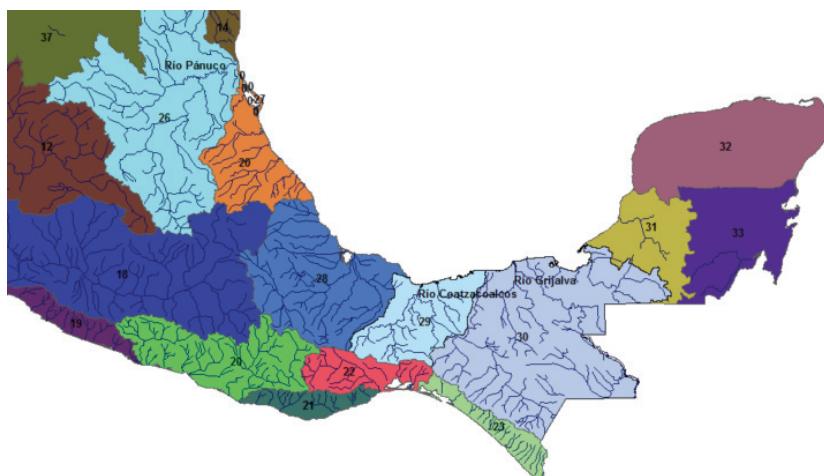


Figura 2. Regiones hidrológicas del centro y sur del país.



Figura 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas.

Tabla 1. Estaciones climatológicas.

No. Estación	Nombre	Estado	Latitud	Longitud
30214	Nanchital	Veracruz	18°3'58.756"N	94°23'2.283"W
30107	Cangrejera	Veracruz	17°58'57.65"N	94°31'51.499"W

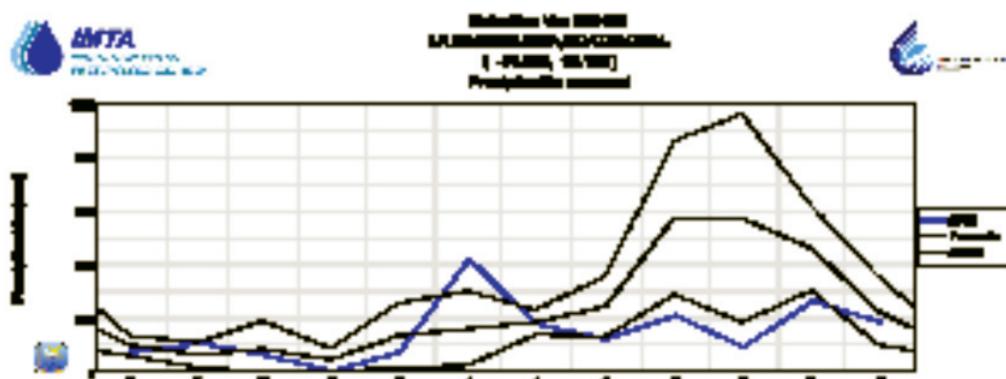


Figura 4. Evolución mensual de la precipitación en Coatzacoalcos.

OCEANOGRÁFICA

El Instituto de Geofísica de la UNAM, la Secretaría de Marina y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) mantienen estaciones de medición de alturas de mareas en los puertos principales de México en las costas del Pacífico, Golfo de México, Golfo de California y Mar Caribe. Fue necesario conocer la variación de la marea en la desembocadura, para lo cual se utilizó la información de la estación

Coatzacoalcos para el río Coatzacoalcos. Los datos de marea fueron obtenidos con el software para predicción de mareas: Mar V08 2008, desarrollado por el CICESE y descargado desde su página www.cicese.mx. Se obtuvieron datos de marea para los meses de abril, agosto y noviembre de 2008 correspondiente a la época de secas, lluvias y nortes, respectivamente. En las figuras 5, 6 y 7 se muestran las graficas de marea, en donde también pueden verse las predicciones para los ríos Grijalva y Pánuco.

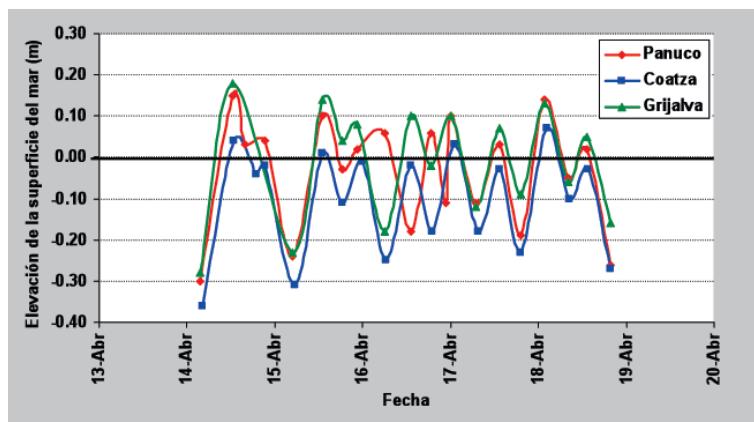


Figura 5. Grafica de predicción de marea (Abril de 2008).

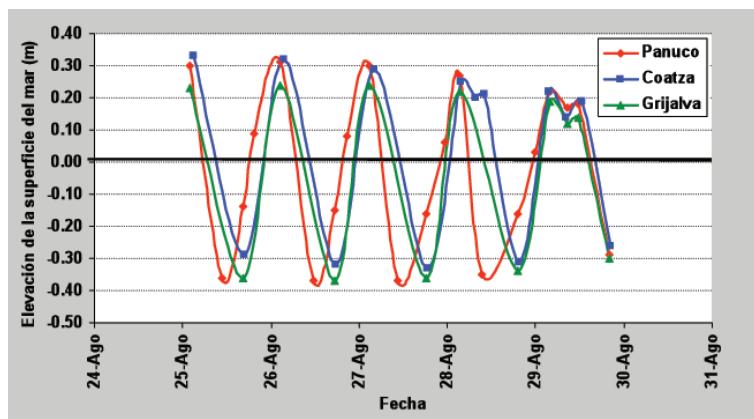


Figura 6. Grafica de predicción de marea (Agosto de 2008).

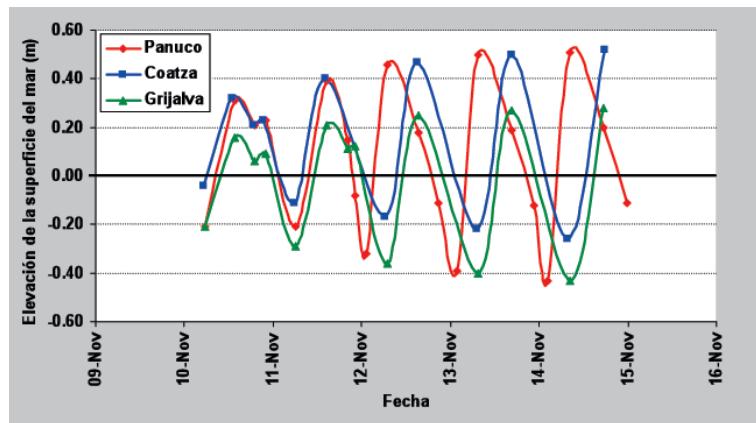


Figura 7. Grafica de predicción de marea (Noviembre de 2008).

MODELACIÓN DE LAS CORRIENTES HIDRODINÁMICAS

INTRODUCCIÓN

La metodología implementada en este trabajo consistió inicialmente en la generación de una malla numérica mediante un software especializado, se imponen condiciones iniciales y de frontera (marea, nivel de la superficie libre del agua, y estado hidrodinámico), se realizan simulaciones numéricas y finalmente, se comparan con las mediciones de velocidad disponibles. El procedimiento, y cada una de los puntos antes mencionados, se repiten tantas veces como sea necesario hasta encontrar las condiciones óptimas.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO

Siguiendo con los objetivos principales del estudio, se adaptó un modelo numérico integrado en la vertical. Dicho modelo permite tomar en cuenta, las variaciones en la profundidad o la profundidad media, así como los

contornos de la topografía. El modelo fue alimentado con la información recopilada en las campañas de medición (Torres, 209), así como los balances hidrológicos, para posteriormente determinar la hidrodinámica de la laguna.

El modelo numérico resuelve directamente las ecuaciones para la hidrodinámica de flujos con superficie libre en tres dimensiones con la integración en la vertical de multicapas, el programa fuente y sus subrutinas están escritas en lenguaje de programación Fortran 90.

DISEÑO DE LA MALLA NUMÉRICA DE CÁLCULO

Es posible realizar la malla de cálculo o numérica con el programa ARGUS ONE (<http://www.argusint.com>), que es un paquete comercial, el cual realiza de una manera muy rápida y fácil la división de cualquier ecosistema acuático en elementos (celdas) rectangulares. El tramo del río Coatzacoalcos modelado tie-

ne una longitud de 25 km aproximadamente. En la figura 8 se muestra la malla de cálculo de este sistema con un espaciamiento de $\Delta x = 200$ y $\Delta y = 100$. La malla se generó con un ángulo que se ajustó de acuerdo a la configuración del río para optimizar el rendimiento del modelo. Cuenta con 126 elementos en la dirección x, y 65 elementos en la dirección y, lo que da un total de 8190 elementos.

DISEÑO DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA EL RÍO COATZACOALCOS

De esta forma, se realizaron 12 escenarios de simulación, cuatro para cada una de las estaciones: secas, lluvias y nortes. En cada escenario, se incluyeron las forzantes (gasto hidrológico y marea) analizadas previamente. Los escenarios hipotéticos de incremento de marea son los mismos, marea normal, 40, 60 y 100 cm, con lo que se determinó el comportamiento del nivel de superficie libre del río bajo estas condiciones. Para la modelación el incremento de tiempo utilizado fue $\Delta t = 2.0$ s y se simuló un periodo de 5 días, para cada una de las épocas y los respectivos incrementos de la superficie libre del mar.

Escenario 1 Coatzacoalcos: época de secas

Se simuló del 14 al 18 de abril: los resultados para esta época son presentados de la figura 9 a la figura 13.

De acuerdo con la figura 9, con condiciones normales de marea no existe un incremento apreciable en la elevación de la superficie libre, aunque el gasto de 355.22 m³/s conduciendo por el río para esta época sea relativamente pequeño. Al adicionarle 40 cm a las condiciones normales de marea, se observa un leve aumento en el nivel de superficie libre del río que es visible hasta aproximadamente 4 000 m hacia la parte continental del río y con un valor máximo de 30 cm registrado en la zona de desembocadura (figura 10).

Al aumentar el nivel del mar 60 cm más, consecuentemente el nivel de la superficie libre del río también aumenta, ahora hasta alcanzar un nivel máximo de 50 cm, pero decayendo paulatinamente hacia aguas arriba del río, siendo visible solo hasta los 4000 m (figura 11). Lo mismo sucede al realizar las simulaciones con 100 cm de sobre-elevación de marea, la superficie del río se incrementa los primeros 4 000 m, apreciándose un máximo ahora de 85 cm solo en la zona de inter-

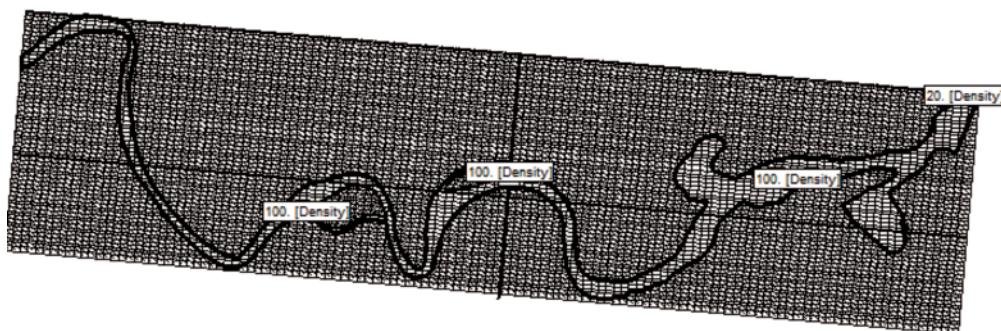


Figura 8. Malla numérica del Coatzacoalcos.

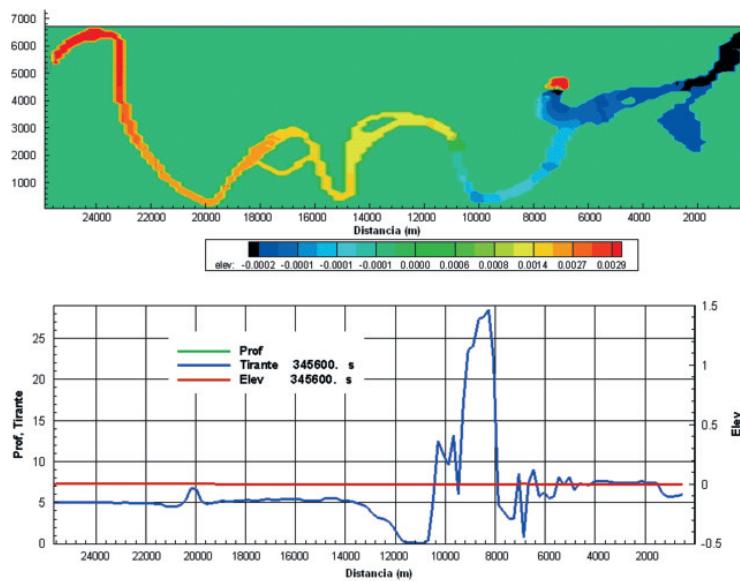


Figura 9. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para abril normal.

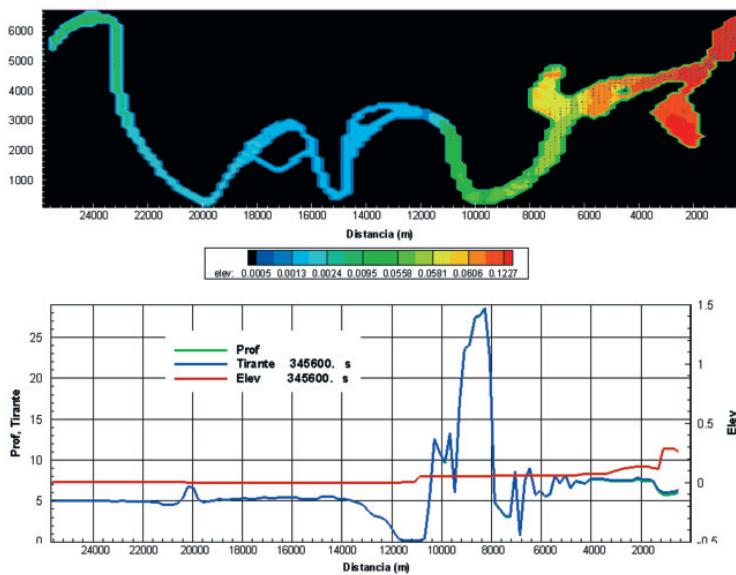


Figura 10. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para abril + 40 cm.

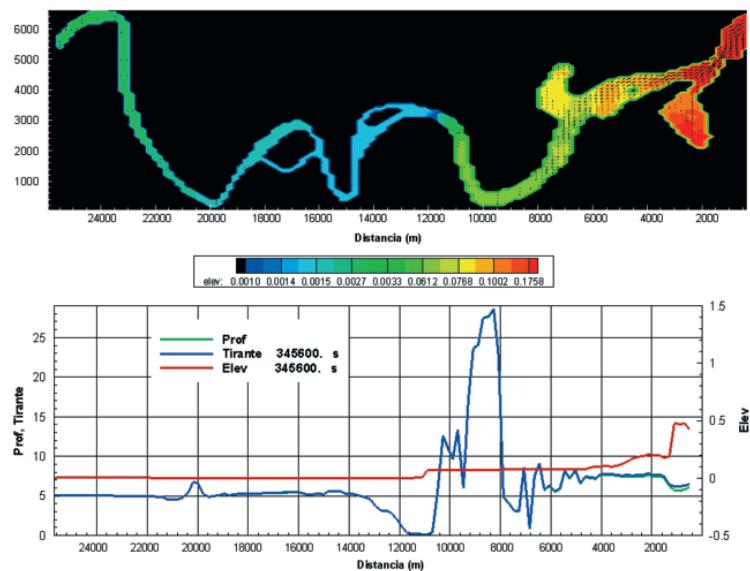


Figura 11. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para abril + 60 cm.

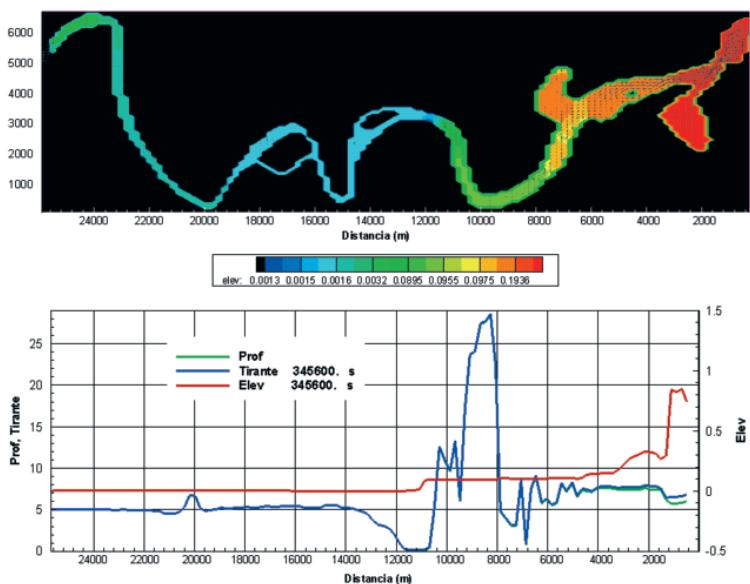


Figura 12. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para abril + 100 cm.

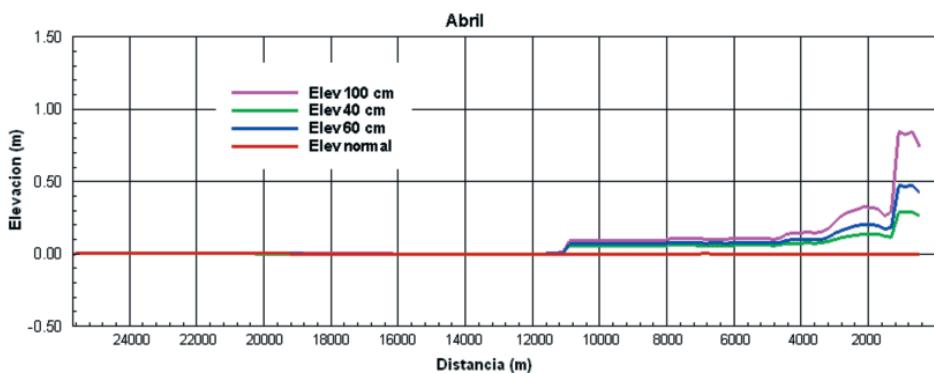


Figura 13. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para abril.

ración con el mar (figura 12). En la figura 13 se muestran los comparativos de las cuatro simulaciones realizadas para el mes de abril.

Escenario 2 Coatzacoalcos: época de lluvias

Los días simulados fueron del 25 al 29 de agosto; los resultados de estas simulaciones se presentan de la figura 14 a la figura 18.

De manera similar que para la época de secas, las simulaciones bajo condiciones normales de marea (figura 14), mostraron que no existe un aumento en la superficie libre del río, que ahora conduce un gasto aproximado de $1\ 704.7\ m^3/s$, que evidentemente hacen que el flujo del río sea dominante. La figura 15 se aprecia el segundo escenario simulado, que presenta un incremento máximo de 20 cm, siendo 10 cm menor que el incremento máximo presentado para este mismo escenario en la época de secas, lo cual se explica por mayor gasto que lleva el río en esta época.

Asimismo ocurre en el escenario con 60 cm adicionales a las condiciones de marea para agosto. El nivel del río incrementa ahora solo hasta 35 cm, reflejándose además menos distancia hacia la parte continental del río, sólo

aproximadamente 3 000 m aguas arriba (figura 16). El río se incrementa en 55 cm para la simulación considerando un incremento de 100 cm (figura 17). Finalmente, en la figura 18 se presentan las elevaciones para las cuatro condiciones simuladas para el mes de agosto.

Escenario 3 Coatzacoalcos: época de nortes

Se simularon condiciones representativas de esta época del 10 al 14 de noviembre; los resultados se presentan de la figura 19 a la figura 23.

La figura 19 presenta un comportamiento similar a los observados en las simulaciones anteriores para el escenario con condiciones normales de marea; no se aprecia influencia de ésta aguas arriba del río. Sin embargo, en los otros escenarios si existe tal influencia, incrementándose el nivel de superficie libre del río con valores máximos de 45, 75 y 115 cm observados en las figuras 20, 21 y 22, respectivamente. También se puede apreciar que aunque el gasto del río para esta época es mayor que el gasto de lluvias ($2056.5\ m^3/s$), los niveles máximos de superficie libre son también mayores, debiéndose a los niveles de

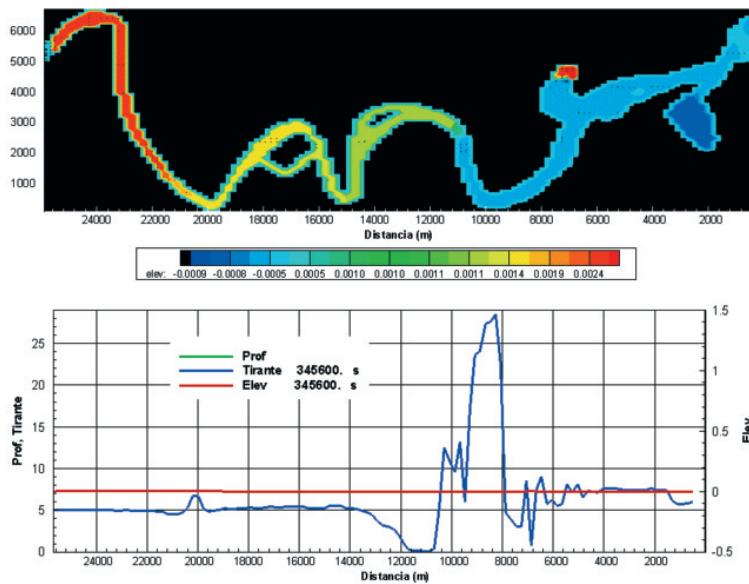


Figura 14. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para agosto normal.

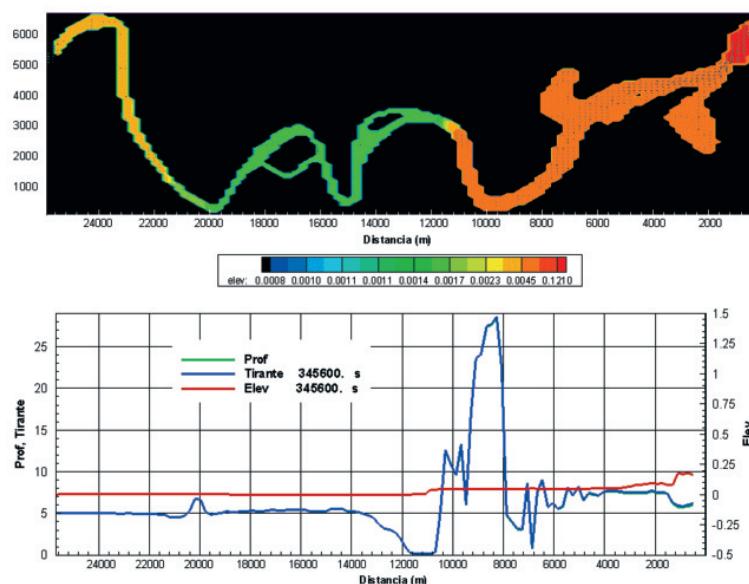


Figura 15. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para agosto + 40 cm.

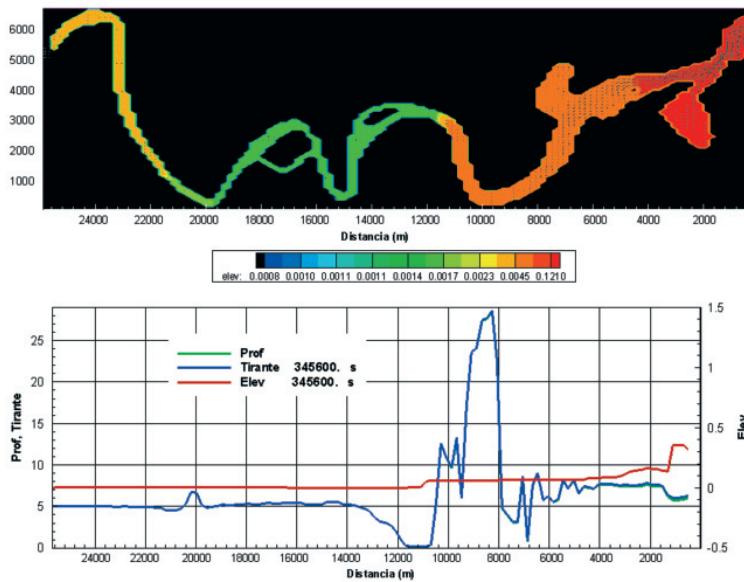


Figura 16. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para agosto + 60 cm.

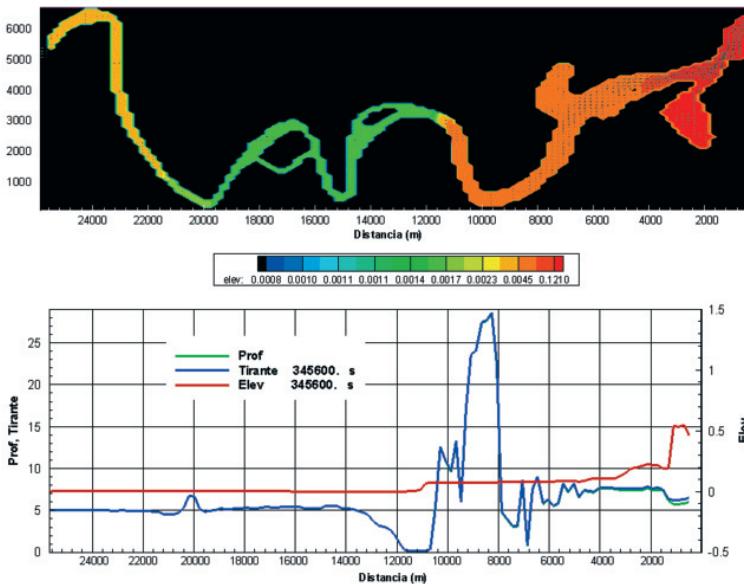


Figura 17. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para agosto + 100 cm.

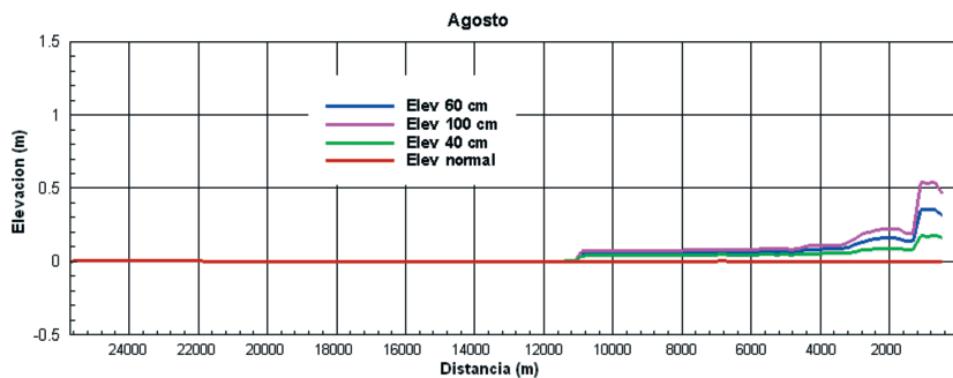


Figura 18. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para agosto.

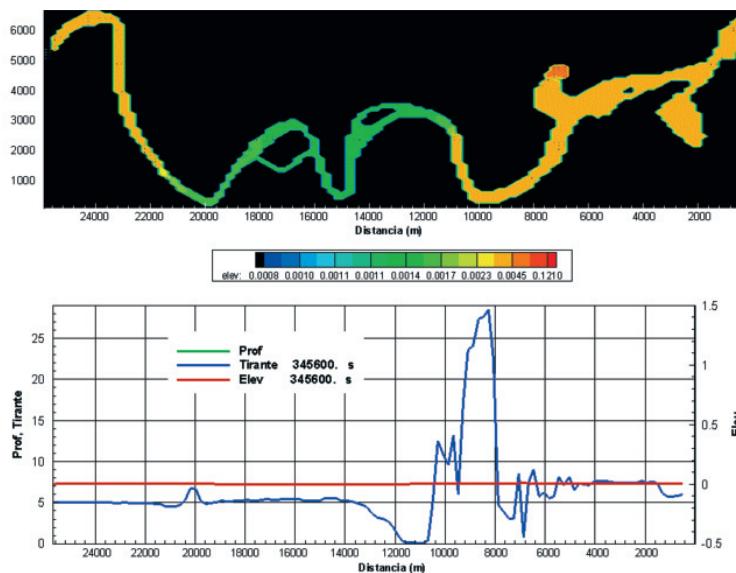


Figura 19. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para noviembre normal.

marea que para esta época son considerablemente mas grandes a los de época de lluvia. Finalmente, en la figura 23 se presentan las elevaciones para las cuatro condiciones simuladas para el mes de noviembre.

En las figuras 24, 25 y 26 se muestran los resultados de las comparaciones de las tres distintas sobreelevaciones y para los tres escenarios simulados.

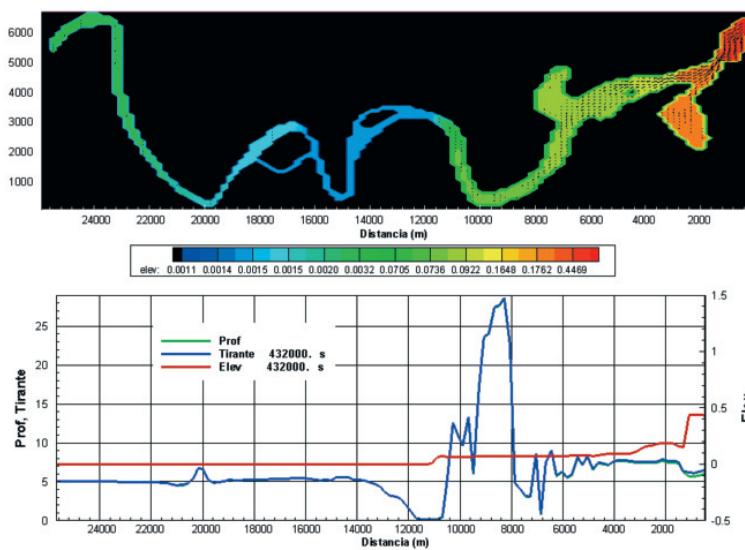


Figura 20. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para noviembre + 40 cm.

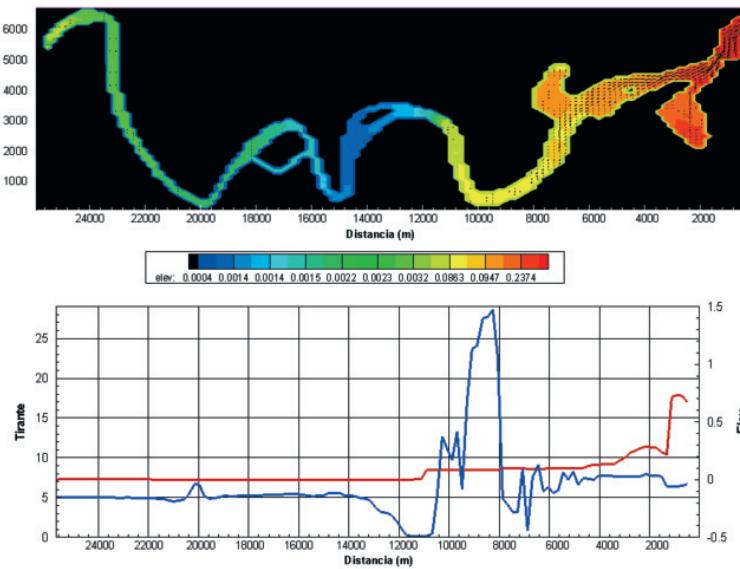


Figura 21. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para noviembre + 60 cm.

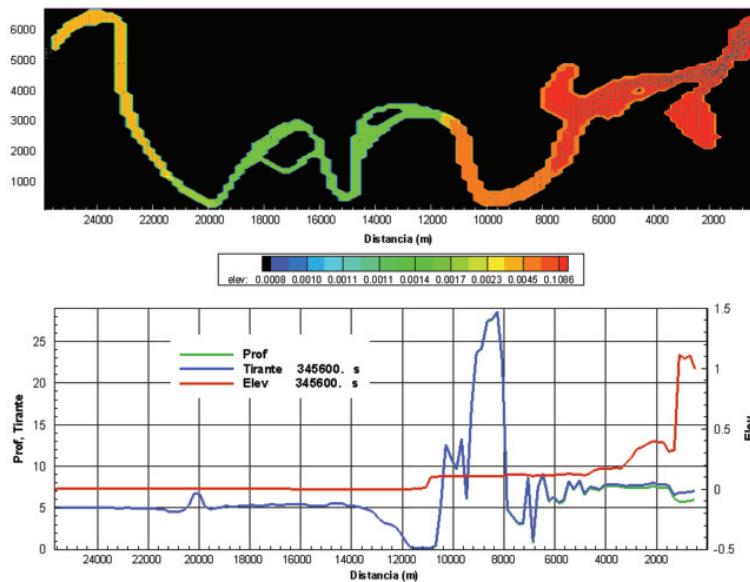


Figura 22. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para noviembre + 100 cm.

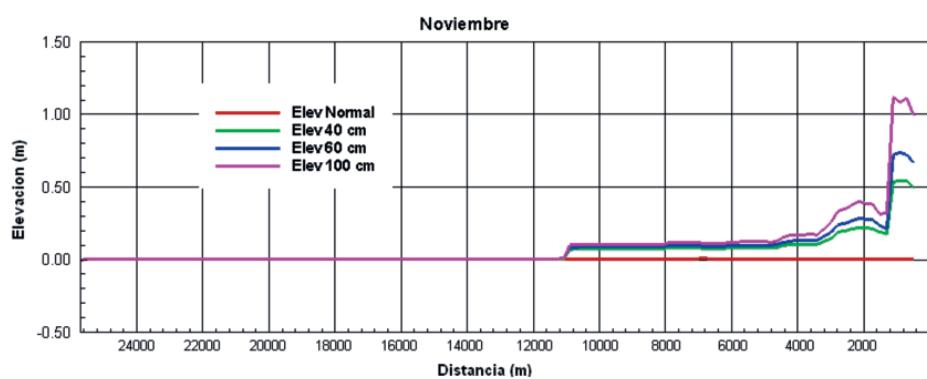


Figura 23. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para noviembre.

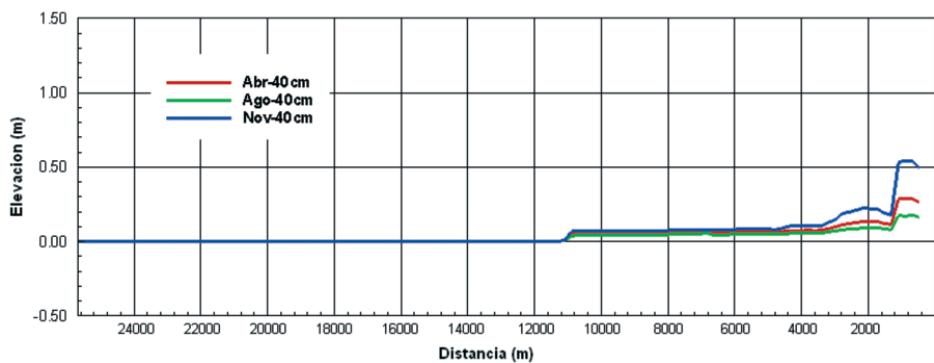


Figura 24. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para 40 cm.

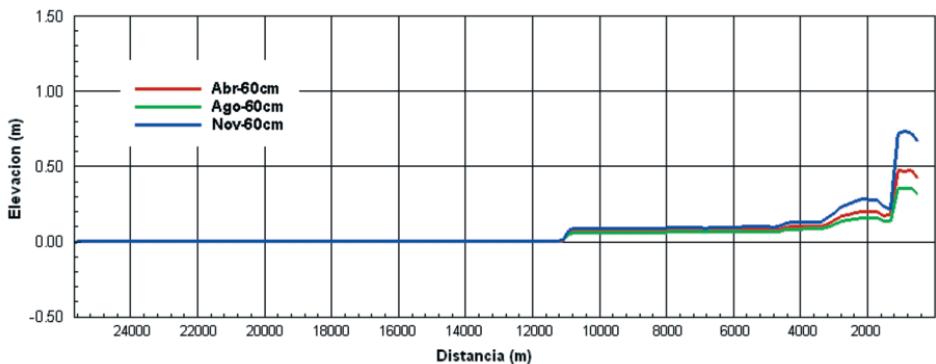


Figura 25. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para 60 cm.

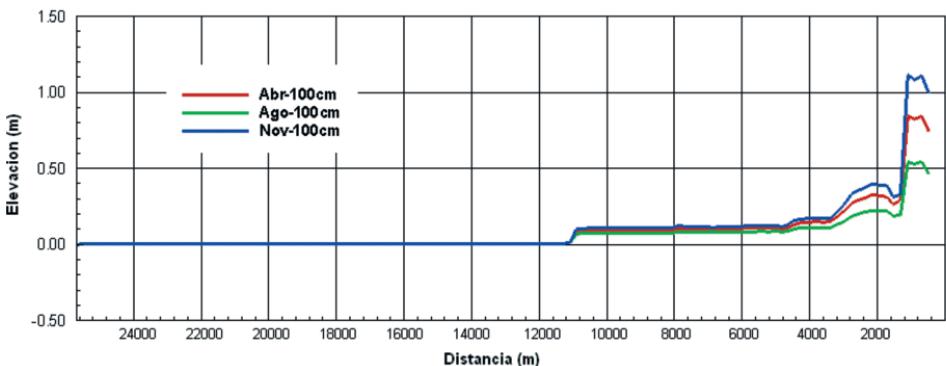


Figura 26. Elevación de la superficie libre en Coatzacoalcos para 100 cm.

ESTIMACIÓN DE LAS INUNDACIONES

EN LA REGIÓN DE VERACRUZ

Vulnerabilidad ante el cambio climático

En el estado de Veracruz, los gradientes de la línea de costa son pronunciados por la presencia de barreras arenosas y dunas que modifican el avance y penetración de la cuña salina. El aumento del nivel del mar afectará principalmente la zona aledaña a la laguna de Alvarado. Las condiciones de vulnerabilidad están dadas por una alta concentración demográfica, procesos de industrialización, incremento de vehículos automotores e incremento de población con niveles de pobreza altos. Los eventos hidrometeorológicos extremos dejan cuantiosas pérdidas agrícolas al provocar inundaciones y destrucción de los

cultivos debido principalmente al impacto de huracanes. Los tipos de vegetación más afectados por estas variaciones climáticas son los que están expuestos a condiciones más secas y más cálidas. Entre las zonas más sensibles en las cuales se ubican los bosques templados se encuentra la sierra de Zongólica. Los efectos del incremento en la temperatura en relación con el número de casos de dengue y paludismos están fuertemente relacionados y afectan principalmente las localidades rurales.

Estimación de las inundaciones

Un análisis de los últimos 20 años para esta zona permite ver que esta zona ha estado sujeta a eventos climáticos intensos de los cuales las inundaciones han sido las que tienen una consecuencia catastrófica, como lo muestra la figura 27 (www.ine.gob-mx).

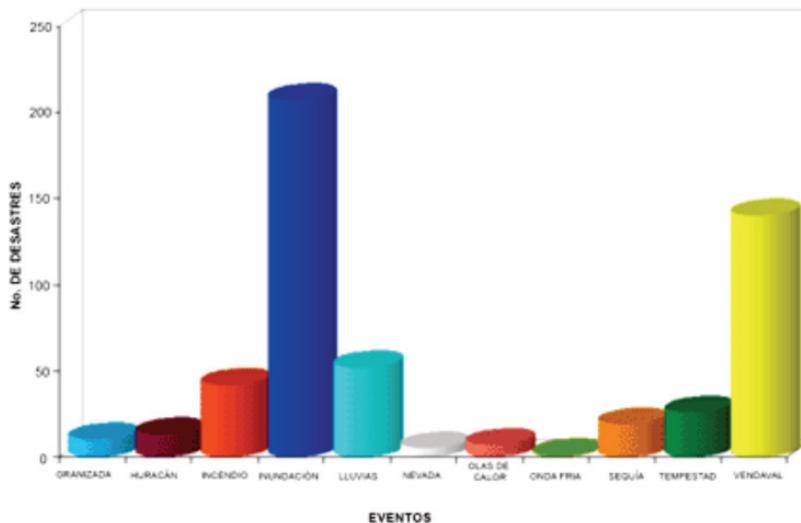


Figura 27. Desastres de origen hidrometeorológico 1980 – 2001 en el estado de Veracruz.

Por otro lado, se presenta una estimación de las inundaciones que podrían producirse para el estado de Veracruz (figura 28) y para la zona cercana a la desembocadura del río Coatzacoalcos (figura 29), considerando el evento mas desfavorable para este estudio que

es la de 100 cm de sobreelevación. El programa utilizado se encuentra disponible en la red (<http://geongrid.geo.arizona.edu>) el cual se apoya en bases de datos mundiales con una aproximación bastante robusta y por lo mismo, deben de tomarse como una estimación.



Figura 28. Zonas de riesgo por inundación en el estado de Veracruz por incremento del nivel del mar de 100 cm.

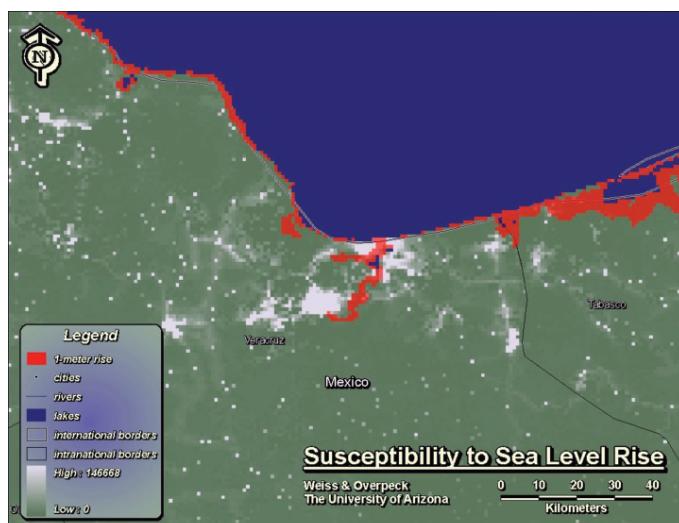


Figura 29. Zonas de riesgo por inundación en la desembocadura del río Coatzacoalcos por incremento del nivel del mar de 100 cm.

CONCLUSIONES

Con respecto a las simulaciones de los perfiles de la superficie libre del agua, se simularon cinco días de las tres épocas del año, para cada época se diseñaron cuatro escenarios con diferentes condiciones iniciales y de frontera (gasto del río y nivel de marea), y se realizaron simulaciones considerando sobre elevaciones con de 40, 60 y 100 cm respecto del mar medio; se modeló un total de 10 días donde se emplearon los primeros 5 días para calentar el modelo; esto es dejar que el modelo se establece bajo las condiciones normales para cada escenario; una vez realizado esto, se obtuvieron los resultados de los 5 días siguientes con los cuales se realizaron los perfiles y gráficos. El software utilizado permite la consideración de todas estas condiciones y transitar las diferentes condiciones de marea (Ramírez *et al.*, 2007)

Debido a que no se cuenta con información detallada de los bordes de los ríos y las elevaciones de las áreas circundantes, no se realizaron pronósticos de las inundaciones probables producidas por las sobre elevaciones consideradas. Otras variables que tampoco fueron consideradas en las simulaciones fueron fenómenos hidrometeorológicos locales (como viento y evaporación), una posible influencia por el oleaje local y tampoco la interacción con el subsuelo. Esta información no está disponible en ninguna fuente nacional y su estimación implicaría instrumentar las zonas y medirlas directamente, lo cual sale de los objetivos de este estudio.

En la época de secas se presenta una elevación máxima de la superficie libre de unos 80 cm aproximadamente, que ocurre en la simu-

lación con forzante de marea más 100 cm, esta elevación disminuye rápidamente hasta caer a unos 25 cm a unos 1500 m aguas arriba de la desembocadura, y desde ahí manteniéndose constante a unos 10 cm hasta una distancia de 5000 m aproximadamente.

En las simulaciones para época de lluvias, debido al mayor gasto que conduce el río, la máxima elevación presentada, que también ocurre para la sobre elevación de 100 cm, alcanza sólo unos 50 cm, presentando un comportamiento similar que la simulación anterior, siendo perceptible con unos 10 cm hasta 5000 m aguas arriba de la desembocadura.

En época de nortes nuevamente la elevación de la superficie libre alcanza más de 100 cm para la forzante de marea con el, escenario incrementado en 100 cm; disminuye rápidamente como en los escenarios anteriores y se disipa aproximadamente a los 5 000 m aguas arriba.

En este caso, la disipación de la energía se presenta debido a la batimetría del río, ya que en esa zona se da una disminución significativa de la profundidad del tirante de agua, pasando del orden de metros a centímetros en un tramo muy corto.

Debido a todo lo anterior, se puede decir que en ningún caso, la marea por si sola podría provocar un desbordamiento de alguno del río. Este tipo de situaciones podrían presentarse con incremento en las precipitaciones y consecuentemente de los escurrimientos en la cuenca hidrológica asociada. No obstante, se requiere información detallada de la zona como topografía, hidrología, meteorología, etc.

Finalmente para la estimación de las inundaciones se utilizó el software de la Universidad de Arizona disponible en red (<http://geongrid.geo.arizona.edu>) el cual tiene la capacidad de predecir inundaciones de las zonas costeras a nivel mundial en base a información disponible en las bases de datos globales; por ello, la precisión de estas estimaciones de-

pende de la calidad de la información disponible. La aplicación de este software permite estimar la influencia de las inundaciones para un aumento del nivel del mar de 100 cm. Las inundaciones que se producen año con año son los eventos catastróficos más frecuentes en los últimos 20 años en la región (www.ine.gob.mx).

RECOMENDACIONES Y REQUERIMIENTOS

La falta de información de base para llevar a cabo un estudio integral de vulnerabilidad ambiental integral por efecto del aumento del nivel del mar es la limitante más importante para alcanzar los objetivos perseguidos en este estudio. En lo que a esta parte se refiere, los datos han sido tomados de bases de datos completamente heterogéneos, las cuales fueron analizadas para eliminar relaciones espiras. Evidentemente, con esta información es complicado realizar estudios de prospección como el que aquí se desarrolla y los resultados solo deben de tomarse como indicativos. De lo anterior se emiten los siguientes requerimientos y recomendaciones.

Con respecto a la información

- Necesidad de generar información básica actualizada:
 - Topográfica, batimetría
 - Cartografía refinada donde se aprecien curvas de nivel a un metro cuando menos
 - Actividades y uso de las cuencas hidrográficas por sector (agrícola, industrial, turístico, etc)
- Instrumentación de las zonas, falta de mediciones regulares permanentes.

Incremento de puntos de medición y control de la información

- Generación de bases de datos disponibles en red o bien manejadas por los sectores correspondientes (CNA, INE, Semarnat, INEGI, etc); existen infinidad de estudios que se han realizado por diferentes instituciones públicas, privadas, universidades, centros de investigación y organizaciones no gubernamentales, la información no siempre es accesible y se encuentra dispersa
- Ordenamiento territorial costero, falta del seguimiento y organización; de igual forma que en el punto anterior existen infinidad de estudios que se han realizado por diferentes instituciones públicas, privadas, universidades, centros de investigación y organizaciones no gubernamentales, la información no siempre es accesible y se encuentra dispersa
- Aplicación de la legislación ambiental costera correspondiente
- Identificación de la infraestructura hidráulica existente (represas, bordos, canales de derivación, obras de contención, etc).

- Otros

Con respecto a los estudios por realizar

- Financiamiento para la promoción de estudios de vulnerabilidad costera en toda la zona marítima mexicana.
- Promover la colaboración de equipos y proyectos multidisciplinarios e interinstitucionales para el desarrollo de estudios integrales.
- Identificación de asentamientos humanos irregulares y los requerimientos para su posible desalojo y reubicación

- Adaptación y/o desarrollo de software específico para estudios de eventos hidrometeorológicos extremos
- Elaboración de planes de contingencia por eventos hidrometeorológicos extraordinarios a corto, mediano y largo plazo
- Implementación de políticas, públicas y privadas, para la adaptación y mitigación ante los efectos del cambio climático.
- Otros

LITERATURA CITADA

- Aguilar G., 1995. México ante cambio climático. Segundo Taller de Estudio de País, México. En: Semarnap-UNAM-US Country Studies. México ante cambio climático. Segundo Taller de Estudio de País, México.
- Bozada y Páez, 1986. La fauna acuática del río Coatzacoalcos. Serie medio ambiente en Coatzacoalcos. México. Universidad Veracruzana. 131 p.
- Comisión Nacional del Agua, 2003. Programa Hidráulico Regional 2002-2006. Región X Golfo Centro. México.
- EEA Briefing 2005. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Europa. Agencia Europea de Medio Ambiente.
- Frattini R. A., 2002. Vulnerabilidad de las zonas costeras próximas a grandes centros urbanos. AA-AGOSBA-ILPLA-SIHN.
- Ramírez León H., C. Couder Castañeda, F. Torres Bejarano, E. Herrera Díaz, y H. Barrios Piña, 2007. Dinámica de Fluidos Computacional Aplicada a los Ecosistemas Acuáticos. En: Notas de Modelación y Métodos Numéricos. Centro de Investigación en Matemáticas (Cimat). ISBN 978-84-96-736-39-9
- Semarnap, 1997. México. Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático
- Torres F, 2009. Desarrollo de un sistema de información ambiental para el estudio integral de ecosistemas acuáticos vinculados a la industria petrolera. Tercer informe del reporte de tesis doctoral. Doctorado en Fisicoquímica con especialidad en Ingeniería Ambiental, por el Instituto Mexicano del Petróleo.
- Villers, L., y I. Trejo, 1995. Vegetación actual de México y escenario aplicando un incremento de 2°C en temperatura y disminución del 10% en la precipitación. En: Semarnap-UNAM-US Country Studies. México ante cambio climático. Segundo Taller de Estudio de País, México.
- Direcciones de internet:
- www.ine.gob.mx/cclimatico/edo_sector
<http://geongrid.geo.arizona.edu>

Ramírez León H., y F. Torres Bejarano, 2010. Metodología para evaluar vulnerabilidad costera por los efectos del cambio climático. p. 403-426. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICM y L, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Metodología para evaluar vulnerabilidad costera por los efectos del cambio climático

H. Ramírez León y F. Torres Bejarano

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para estimar y evaluar la vulnerabilidad costera por el incremento del nivel del mar en las costas mexicanas del Golfo de México. Dicha propuesta está basada en el manejo y procesamiento masivo de información relevante para la construcción de indicadores de vulnerabilidad en las zonas costeras potencialmente en riesgo ante el ascenso del nivel del mar. Se describen los pasos necesarios, así como la información básica que deberá ser analizada y procesada para la delimitación y caracterización de las zonas en riesgo y para la construcción de los diferentes indicadores, ambientales, sociales, de población e infraestructura. Asimismo, se describen las ventajas del uso de sistemas de información ambiental como herramienta para el manejo masivo de dicha información, para su ordenamiento, organización y representación visual. Las evaluaciones de la vulnerabilidad de recursos costeros a los impactos del cambio climático deben poder distinguir entre *vulnerabilidad natural del sistema* y *vulnerabilidad socioeconómica del sistema*, aunque claramente ambos están relacionados y son interdependientes. Ambos son dependientes en sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación. Un análisis apropiado de vulnerabilidad socioeconómica a la elevación del nivel del mar, sin embargo, requiere de una comprensión previa de cómo el sistema natural será afectado.

Palabras clave: vulnerabilidad costera, indicadores ambientales, informática ambiental, modelación numérica

INTRODUCCIÓN

Se define la vulnerabilidad como el grado en que un ecosistema natural o social podría resultar afectado por el cambio climático. La vulnerabilidad está en función de la sensibilidad de un sistema a los cambios del clima y de su capacidad para adaptarse a dichos cambios. En este contexto, un sistema muy vulnerable sería aquel que fuera muy sensible a pequeños cambios en el clima, incluyéndose en el concepto de sensibilidad la posibilidad de sufrir efectos muy perjudiciales, o aquel cuya capacidad de adaptación se hallara seriamente limitada.

Existe mucha complejidad en el concepto de vulnerabilidad frente a riesgos naturales en los distintos ámbitos geográficos, culturales, socioeconómicos, etc. Por tanto, se puede entender la dificultad derivada para la elección de variables que ayuden a una medida precisa, especialmente si han de ser susceptibles de georeferenciarse. En este sentido las variables que se utilizan con mayor frecuencia para medir la vulnerabilidad en su dimensión espacial son variables sociodemográficas, económicas, culturales, y territoriales (Bayo *et al.*, 1995) que recogen aspectos de la población, su sistema socioeconómico e infraestructura, principalmente. No existe en México ninguna clasificación que contemple todos los posibles factores de vulnerabilidad y que permita aplicarla de forma sistemática en el análisis de vulnerabilidad del territorio para riesgos de inundación y ascenso del nivel del mar. Se han desarrollado algunos propuestas para riesgos de este tipo como por ejemplo: Vulnerabili-

dad y Adaptación Regional Ante El Cambio Climático y sus Impactos Ambiental, Social y Económicos (Magaña y Gay, sin año).

La vulnerabilidad de México, es de particular importancia debido a sus 11 000 km de litoral; además de que la configuración topográfica y batimétrica del Golfo de México es extremadamente compleja. Al igual que en el resto de los países en desarrollo, es mayor que la de los países desarrollados. La razón básica de esta diferencia reduce en los recursos disponibles para adaptarse al cambio, que son mucho mayores en los países industrializados.

El aumento del nivel del mar debido al calentamiento global impactaría casi la mitad del litoral del Golfo de México. El estudio de Ortiz y Méndez (1999) se estima que 46.2% de la costa del Golfo de México, sobre todo del centro hacia el sur, “es susceptible al ascenso del nivel del mar”. Entre las zonas más vulnerables están las lagunas costeras y los pantanos. “Otras áreas importantes son los pastizales y tierras agrícolas, los cuales también se contaminan con la intrusión salina y son remplazados por ambientes costeros”.

Así, la elevación del mar por el cambio climático no sólo alteraría radicalmente sistemas de gran productividad biológica como las lagunas costeras, sino que también provocaría un impacto irreversible sobre la rica biodiversidad de zonas de pantanos, como la Reserva de la Biosfera de Pantanos de Centla y el Área de Protección de Flora y Fauna de Laguna de Términos, por citar algún ejemplo.

JUSTIFICACIÓN

En la determinación de la vulnerabilidad de los ecosistemas costeros, el manejo y análisis de la información ambiental, generalmente representa un arduo problema debido a la gran cantidad de información generada en los programas de monitoreo, que pueden llevarse a cabo en uno o varios de los siguientes ecosistemas caracterizados por la presencia de numerosos sistemas lagunares, estuarios, humedales (llanuras, pantanos, marismas, etc.), áreas agropecuarias y de alto potencial de explotación industrial. En todos los casos, la cantidad de información a procesar es considerable, demandando mucho tiempo para el análisis, que generalmente debe realizarse por personal calificado, lo cual implica además mayores costos. Por esto, los indicadores son importantes para el uso sostenible y el manejo de los recursos ambientales ya que pueden orientar la formulación de políticas al proporcionar una valiosa información acerca del estado actual de los recursos a evaluar y de la intensidad y la dirección de los posibles cambios, subrayando además, los temas prioritarios (Segnestam *et al.*, 2000).

Está claro que varios problemas en la protección, planeación, investigación e ingeniería ambiental, podrían ser resueltos sobre la base de una información confiable y comprensible. El estado y la dinámica del ambiente están descritos por datos biológicos, físicos, químicos, geológicos, meteorológicos y socio-económicos, que son dependientes del tiempo y el espacio y nos conducen a situaciones pasadas o actuales. El procesamiento de estos datos y la producción de información ambiental, en su factor de esfuerzo y en la influencia mutua de los mecanismos de interacción, son fun-

damentales para cualquier clase de planeación ambiental y medidas preventivas. Por lo tanto, la solución de problemas ambientales es principalmente una actividad de manejo y procesamiento de información en un gran rango de datos ambientales, socioeconómicos y culturales. La solución para los problemas ambientales es fuertemente dependiente de la calidad de fuentes accesibles de información, además de ser un factor muy crítico en las acciones de toma de decisiones políticas e influye en las personas acerca de su actitud sobre el medio ambiente. Esta información acerca de aspectos ambientales, es solo una base importante en las acciones de prevención y toma de decisiones en la protección ambiental, así como en la adquisición de un mayor conocimiento en la investigación ambiental.

En la tabla 1 se presentan algunas de las principales fortalezas que confiere el uso y aplicación de indicadores ambientales e índices de calidad del agua en la evaluación ambiental en general.

En la solución de problemas de recursos ambientales, se hace necesario tanto la representación espacial del sistema como el entendimiento de tales problemas. En este aspecto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden representar las características y relación espacial georeferenciada del sistema, sin embargo, las capacidades predictivas y analíticas relacionadas son más útiles y requeridas en la solución de la planeación y manejo de problemas complejos del recurso acuático (Walsh, 1992). Para sacar provecho de los SIG y mejorar la planeación y manejo del recurso acuático, la vinculación del SIG con la modelación matemática tradicional, se convierte en una idea atractiva.

Tabla 1. Resumen de fortalezas de los indicadores e índices ambientales.

Indicadores/índices
Valiosos como herramienta de comunicación
Entendibles por No expertos
Flexibles
Fáciles de usar y calcular
Permite comparación de varios sitios y regiones

Una herramienta como la que se propone en este proyecto, que integra los SIG, indicadores ambientales, la modelación y los sistemas de manejo de bases de datos, permite que la información generada sea accesible y entendible por cualquier persona, además de que puede ser difundida a través de cualquier medio electrónico, facilitando a instituciones y población en general, el conocimiento del estado del ambiente en general.

OBJETIVO GENERAL

Establecer una metodología integral para el desarrollo de indicadores de vulnerabilidad para zonas costeras que serían potencialmente afectadas ante el incremento del nivel del mar, describiendo cada una de las etapas requeridas para este efecto, incluyendo recopilación, procesamiento, construcción de indicadores y representación mediante SIG.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Especificar la información básica necesaria para la construcción de indicadores de vulnerabilidad de zonas susceptibles a inundación por incremento del nivel del mar.
- Describir los pasos necesarios para la construcción de indicadores de vulnerabilidad para zonas costeras mexicanas
- Puntualizar las capacidades y potencialidades del uso de Sistemas de Información Geográfica para el manejo, procesamiento y representación de información ambiental, social, económica, etc. en el estudio de la vulnerabilidad.

ALCANCES

Uno de los alcances más relevantes de este proyecto está en el desarrollo tecnológico al diseñarse una herramienta que integrará el análisis de la vulnerabilidad en zonas costeras mexicanas a través del cálculo de indicadores de vulnerabilidad y el manejo de la informa-

ción a través de SIG, para el diagnóstico y evaluación de los potenciales riesgos ante un incremento del nivel del mar. Con esto se prefiere además:

- Un mejor entendimiento de los aspectos hidrológicos, climatológicos,

- ambientales y socioeconómicos de las zonas de estudio, así como su importancia, distribución geográfica de la población y potenciales riesgos de ser afectados por el ascenso del nivel del mar.
- El desarrollo de indicadores ambientales, sociales, económicos para la asistencia de la gestión y toma de de-

cisiones referente a las medidas necesarias que deben ser establecidas ante un evento como el estudiado.

- Vinculación a un Sistema de Información Geográfica de los indicadores desarrollados para optimizar el manejo de la información ambiental y el despliegue de resultados.

METODOLOGÍA

Se propone implementar la metodología planteada por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático – IPCC (por sus siglas en Inglés), que se compone de una secuencia de siete diferentes pasos interrelacionados, que tienen como objetivo producir un plan de acción enfocado a proveer mecanismos que disminuyan los posibles impactos provocados por el aumento del nivel del mar y en la identificación de alternativas de respuesta ante este fenómeno.

Los siete pasos del IPCC establecen un proceso para estimar los impactos provocados por el aumento del nivel del mar. La figura 1 presenta la secuencia de esta metodología, modificada de Alonso *et al.* 2001:

Los principales pasos metodológicos para el análisis de la vulnerabilidad de zonas costeras son los siguientes: adquisición y manejo de la información, análisis y definición de las zonas susceptibles de riesgo, desarrollo de indicadores de vulnerabilidad y definición de los escenarios. La metodología propuesta para el desarrollo de este proyecto se describe a continuación.

PASO 1. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la zona donde se determinará la vulnerabilidad ante un posible incremento del nivel del mar. Puede definirse como una región específica dentro del país o como la totalidad del mismo y sus límites se determinan tanto en la parte terrestre como marina.

La zona de estudio hacia la parte del continente, debe incluir aquellas áreas que serían afectadas físicamente por el posible aumento del nivel del mar. Por otro lado, la extensión de la zona de estudio marina se basará en los impactos ambientales ocasionados por el cambio climático sobre los ecosistemas allí presentes, tales como arrecifes de coral, lagunas costeras, estuarios, manglares, playas, (IPCC, 1992).

Para elegir los límites terrestres y marinos del área de interés se deben evaluar criterios físicos, biológicos, sociales, económicos y políticos, al igual que la disponibilidad de la información concerniente a los mismos. La tabla 2 muestra los criterios utilizados.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS

mexicanas ante el cambio climático

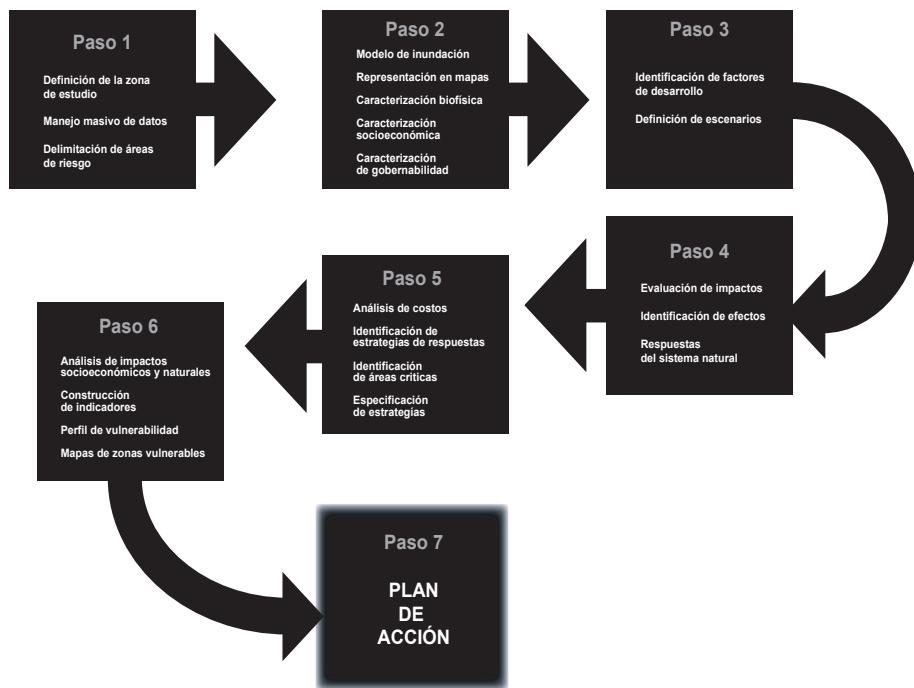


Figura 1. Metodología propuesta por el IPCC (1992).

Tabla 2. Criterios de evaluación para la elección del área de estudio.

Físicos	Biológicos	Sociales	Económicos	Políticos
Fenómenos meteorológicos.	Extensión de los ecosistemas costeros que dependen del mar.	Extensión de los asentamientos humanos costeros.	Infraestructura (Puertos, vías, sistema eléctrico, industria).	Desarrollo sostenible.
Intrusión salina.	Extensión máxima de los ecosistemas de arrecife.	Límites político administrativos.	Zonas de ganadería.	Límites político-administrativos.
Erosión y/o acreción.		Identidad étnica y cultural costera.	Zonas agrícolas.	Presencia de áreas protegidas.
Subsidiencia.			Zonas de pesca y acuicultura.	Límites y tratados internacionales.
Mareas.			Turismo.	
Corrientes.			Zonas de extracción minera.	
Movimientos tectónicos.			Zonas de extracción maderera.	

La definición de estas zonas de influencia puede realizarse mediante la utilización de la cartografía de la zona, incluyendo mapas batimétricos y curvas de nivel, para establecer los límites en una línea específica batimétrica mar afuera y cota de nivel tierra adentro.

En las siguientes secciones se describen algunas de las actividades necesarias en esta primera etapa de la metodología.

Delimitación de las zonas de riesgo

Aunque existen mapas de las cuencas hidrológicas y curvas de nivel para todo el territorio mexicano, será necesario delimitar específicamente el área de interés que sería potencialmente afectada por un ascenso del nivel del mar. Esto puede realizarse mediante el uso de la cartografía topográfica a escala 1:20.000 con curvas de nivel cada 10 m, ya que no existe actualmente cartografía a una mejor escala; si se cuentan con los recursos económicos suficientes, lo recomendable es generar curvas de nivel cada un metro, debido a que muchas de las zonas costeras más susceptibles de ser inundadas por un incremento del nivel del mar, se caracterizan por ser planicies muy extensas y tener una pendiente muy baja. Asimismo se debe analizar y realizar una caracterización de la zona costera incluyendo información referente a la fisiografía de las zonas de interés, el uso de suelo y manejo de la zona, actividades principales, aspectos hidrológicos, climatológicos, condiciones oceanográficas, etc.

Debido a la ausencia de una cartografía detallada que muestre curvas de nivel inferiores a 20 m, será necesario desarrollar un modelo basado en la construcción de representaciones digitales de elevación, que permiten comparar los valores de altura del terreno con los de frecuencia de inundación de acuerdo

con el área geográfica estudiada, generando como resultado un mapa de áreas de riesgo para cada caso. Para generar este modelo, será indispensable contar con el conocimiento y caracterización del área de estudio, lo cual se describe en el paso 2 de esta metodología (IPCC, 1994).

PASO 2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA

En este paso se debe realizar la colección de información y datos relevantes para caracterizar el área de estudio definida en el paso 1. Sobre la cual se definirá una línea base teniendo como ejes temáticos los componentes biótico, físico, social, económico y de gobernabilidad. Dicha caracterización da la posibilidad de conocer la dinámica de los procesos costeros y la identificación de los servicios ambientales de los ecosistemas marinos y costeros, la tendencia poblacional y indicadores de calidad de vida, así como la evolución de los sectores económicos, con el fin de generar escenarios futuros que sirvan de soporte a la evaluación temporal.

Manejo masivo de datos

En la actualidad, para administrar o analizar eficientemente la cada vez más compleja información disponible para la planificación y el manejo de ecosistemas, muchos de ellos considerados como áreas protegidas, se hace indispensable el uso de programas especiales provenientes de la informática ambiental, campo que muestra un creciente potencial en los últimos años. El desarrollo de la informática ha abierto espacios para el análisis geográfico, biológico, químico y socioeconómico, así como para el estudio de bases de datos especializadas. Entre ellos podemos mencionar:

los sistemas de información geográficos con ArcView, ArcInfo, la creación de bases de datos, o sencillamente el rastreo de bancos de datos especializados por medio de Internet.

Para el análisis de la vulnerabilidad de las zonas costeras por el ascenso del nivel del mar se debe compilar y procesar toda la información base que puede integrar geomorfología, geología, morfodinámica, estudios de población, actividades económicas, cartografía de base, curvas de nivel, uso y tipos de suelo, hidrología, climatología, etc., incluso, imágenes de satélite. Toda esta información puede ser manejada a través de cualquier paquete informático especializado en información geográfica como los arriba mencionados.

PASO 3. IDENTIFICACIÓN DE FACTORES DE DESARROLLO Y DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

Dentro del concepto de vulnerabilidad, la naturaleza de las actividades humanas juega un papel crítico. La vulnerabilidad del sistema se estudia en concordancia con el desarrollo de las actividades humanas a través del tiempo y el espacio, debido a que la evaluación de impactos se ve influenciada por el desarrollo demográfico y económico de la región (Alonso *et al.* 2001).

La necesidad de considerar una escala de tiempo que conecte el escenario actual con posibles escenarios futuros es inherente al estudio de los efectos del cambio climático en el tiempo. En este sentido, se reconoce que la vulnerabilidad ante un aumento del nivel del mar no solo depende de la magnitud de los cambios físicos que genera sino también de la senda tomada en materia de desarrollo socioeconómico ya que este define el escena-

rio sobre el cual tendrán lugar los impactos potenciales.

En este paso, la metodología del IPCC recomienda plantear un escenario de variables con un horizonte de tiempo de máximo 30 años; se considera que la proyección realizada para un período superior arroja resultados con un alto margen de incertidumbre. Para plantear los escenarios se deben considerar elementos que determinantes que definan el desarrollo socioeconómico del país en el mediano y largo plazo. Se deben formular al menos dos escenarios, uno que considere el estado actual y uno futuro bajo un modelo de inundación (*e.g.* 1 m de ascenso del nivel del mar).

PASO 4. IDENTIFICACIÓN DE LOS CAMBIOS FÍSICOS Y NATURALES RESULTANTES

El análisis de vulnerabilidad comienza con la cuantificación de cambios físicos y respuestas del sistema natural, seguida de la evaluación de impactos sobre el sistema socio-económico y ecológico, resultante de los cambios y respuestas de los sistemas ante un posible ascenso del nivel del mar.

Las zonas costeras ya están bajo tensiones debido a una combinación de factores tales como presión poblacional creciente, destrucción de hábitat, aumento de la contaminación de origen terrestre y crecientes insumos de nutrientes y otros contaminantes a través de los ríos. En consecuencia los efectos del cambio climático podrían representar una serie de impactos mezclados y probablemente sinérgicos sobre un recurso ya sobretensionado. Además de la antes mencionada vulnerabilidad de la zona costera, el aumento del nivel del mar y la creciente actividad de tormentas tendrían

consecuencias adversas para las actividades de extracción fuera de la costa, el transporte marítimo, la salud humana, las actividades re-creativas y el turismo.

Los principales efectos sobre las costas que se deben considerar ante un posible ascenso del nivel del mar son:

- La intensificación de la erosión de las zonas litorales
- La inundación de las zonas litorales bajas
- La salinización de terrenos y acuíferos, como resultado tanto de la inundación, como de la intrusión de la cuña salina

El acelerado ascenso en el nivel del mar tiene el potencial de alterar muchos de los ecosistemas naturales de la zona costera tal cual los conocemos hoy en día. Sin embargo, dichos cambios no son una nueva influencia en la biosfera, por lo cual se podría pensar que todos los sistemas estarían en la capacidad de adaptarse sin efectos significativos en su forma o productividad.

Existen tres razones principales por las cuales dicha adaptación no ocurre en la forma descrita:

- La tasa de cambio climático global y como consecuencia la tasa de ascenso del nivel del mar, tiene una proyección más rápida que ninguna otra registrada en los últimos 10000 años.
- La población humana ha alterado la estructura de muchos de los ecosistemas que existen.
- La polución, al igual que otros efectos indirectos provenientes de la mala utilización de los recursos naturales, se ha incrementado desde los inicios de la revolución industrial.

En consecuencia, es muy probable que los ecosistemas no se logren adaptar al estrés adicional que causa el cambio climático, sin perder muchas de las especies que albergan o muchos de los servicios que ofrecen.

Construcción de indicadores de vulnerabilidad

El concepto de vulnerabilidad es definido en esta evaluación como el grado de daño o perdida de un elemento (corporal, estructural, social o económico) expuesto como resultado de la ocurrencia de un fenómeno amenazante. Inicialmente para la construcción de los diferentes indicadores de vulnerabilidad, se deberá realizar una evaluación de los elementos potencialmente expuestos, estos elementos pueden ser personas, bienes, servicios y actividades socioeconómicas. El avance de la investigación contendrá el censo alfanumérico y/o espacial de los siguientes elementos expuestos.

- Población: cantidad y distribución, caracterización socioeconómica
- Construcciones: materiales de construcción
- Elementos naturales: playas, ciénagas, manglares, ríos, etc.
- Elementos socioeconómicos: áreas cultivadas e industriales
- Elementos estructurales: corredores viales y zonas de puertos

Se debe evaluar asimismo el nivel de daño probable de cada elemento potencialmente expuesto. Para este análisis se recomienda el uso de técnicas de evaluación ambiental, con las que se podrá obtener el nivel de impacto ambiental que tendrían los diferentes escenarios posibles. La metodología considerada como la más adecuada para cumplir esta fase

del proyecto sería mediante la aplicación de la Matriz de Evaluación Rápida de Impactos (RIAM por sus siglas en inglés). RIAM permite total transparencia en las decisiones tomadas en las evaluaciones de impacto ambiental y provee una investigación holística que cubre cuatro categorías ambientales:

- Aspectos físicos y químicos
- Aspectos biológicos y ecológicos
- Aspectos sociales y culturales
- Aspectos económicos y operacionales

Esta metodología intenta superar los problemas de registrar juicios subjetivos, como se realiza en las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) utilizadas convencionalmente, definiendo los criterios y las escalas contra los cuales estos juicios deben ser hechos y poniendo los resultados en una matriz simple que permite un registro permanente de los argumentos en el proceso del juicio.

La vulnerabilidad se puede determinar mediante la aplicación de la relación entre la resistencia del elemento potencialmente expuesto y la magnitud del fenómeno amenazante como sigue:

$$V = R \times M$$

donde:

V = Vulnerabilidad,

R = resistencia del elemento expuesto y,

M = Magnitud de la amenaza.

Debe realizarse un análisis específico de la vulnerabilidad e impactos que pueden sufrir cada uno de los elementos naturales y socioeconómicos que sean afectados por el posible aumento del nivel del mar, que deberán englobar:

- Ecosistemas terrestres (bosques, tierras de pastoreo, desiertos, ecosistemas de montaña, etc.)

- Hidrología, recursos hídricos y pesquerías de agua dulce
- Océanos, pesquerías de mar y zonas costeras
- Agricultura
- Salud humana
- Asentamientos humanos
- Industria, energía y transporte
- Análisis integrado de impactos y alternativas de adaptación

PASO 5. FORMULACIÓN

DE ESTRATEGIAS DE RESPUESTA

La formulación de las estrategias de respuesta incluye tres opciones principales: acomodar, proteger o retirar. La posibilidad real de ejecución y el efecto sobre el sistema hacen parte integral de la evaluación de la vulnerabilidad. Por lo tanto, un estimativo de los costos y una evaluación de los efectos de las opciones seleccionadas deben ser incorporados dentro del estudio.

Para determinar cuáles son esas posibles estrategias y medidas de adaptación, en la actualidad se están efectuando estudios que se denominan de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático (Lim *et al.* 2004).

Los nuevos estudios (figura 2) requieren, por supuesto, que se propongan posibles escenarios de cambio climático a futuro (CC). También se siguen necesitando los modelos que permitan evaluar los posibles impactos de ese cambio climático en los sistemas biofísicos (vegetación, caudales y agricultura, etc.). Incluir estudios de Variabilidad Climática (VC), es decir, la historia del clima de una región o sitio incluyendo las variaciones del clima con respecto a las condiciones normales.

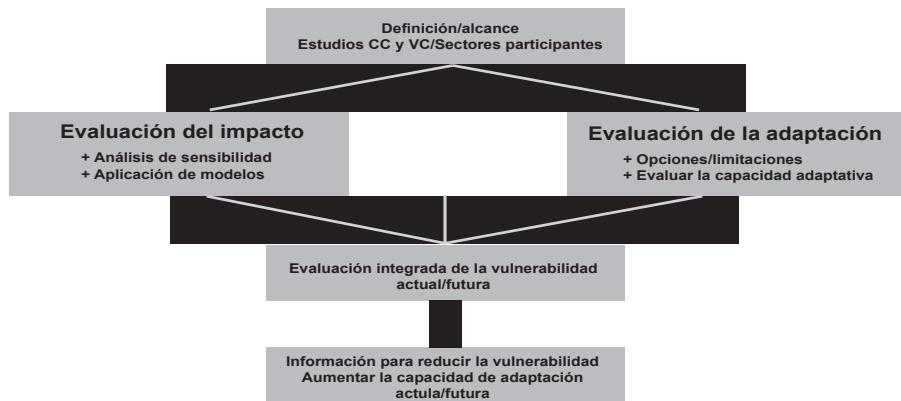


Figura 2. Método seguido por los nuevos estudios de cambio climático.

Además se requiere contar con equipos de investigación fuertemente interdisciplinarios, que establezcan el alcance y definición del proyecto involucrando a los actores clave (tomadores de decisiones y grupos o sectores afectados) de la región y sector de estudio. Así como involucrar en cada paso del estudio a los actores clave, que determinarán la evolución de la investigación hasta el punto en que serán ellos los que evalúen y apliquen las medidas que aumentarán su capacidad de adaptación actual y futura.

Finalmente, plantear la posibilidad de que dichas medidas o estrategias de adaptación sean incorporadas a las políticas de cada sector y a los programas de biodiversidad, combate a la desertificación y reducción de la pobreza. Esto es, conjuntar los esfuerzos que se están haciendo en esa diversidad de políticas, con el fin de optimizar y hacer coherentes los esfuerzos hasta hoy dispersos.

PASO 6. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

En esta etapa se define la vulnerabilidad de una zona costera mediante la determinación

de la factibilidad de implementación de las estrategias de respuesta. Debido a la gran variedad de factores a tener en cuenta, se sugiere seguir los lineamientos del IPCC, que exhortan a la implementación de una estructura de aspectos relacionados con cuatro categorías principales:

- Legislativa/ institucional/ organizacional
- Económica/ financiera
- Técnica
- Cultural y social

Los impactos asociados al aumento del nivel del mar tienen sus efectos mayores sobre la infraestructura agrícola y los recursos naturales a lo largo de la línea de costa, causando efecto inmediato sobre las condiciones socioeconómicas las zonas afectadas. El aumento del nivel del mar exacerbaría los procesos de erosión costera y salinización de acuíferos, y aumentaría los riesgos de inundación y de impactos de tormentas severas a lo largo de las costas (Canziani y Díaz, 2000).

Generación de mapas de riesgo y zonas vulnerables

Para la evaluación de la vulnerabilidad se deberán considerar tres aspectos principales: la base espacial y categorizada de la amenaza; la identificación, localización y caracterización de los elementos expuestos que se podrían ver afectados; y la valoración cualitativa del daño y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, de acuerdo con la valoración del daño en su dimensión corporal, funcional, estructural y de vulnerabilidad social. Para esta última evaluación se considerarán principalmente las características socioeconómicas de los hogares, las cuales hacen a la población más o menos vulnerable a los impactos del ascenso del nivel del mar e inciden en su capacidad de recuperación. Para cada uno de los indicadores desarrollados, se deben elaborar mapas que representen la distribución geográfica de las áreas vulnerables de acuerdo a sus características particulares.

PASO 7. PLAN DE ACCIÓN

El desarrollo de un plan de acción dirigido a proponer acciones para contrarrestar, mitigar y alertar las zonas costeras de los efectos del aumento en el nivel del mar, es el último paso de la metodología propuesta por el IPCC.

En resumen, el plan de acción de la metodología propuesta se puede representar esquemáticamente como se muestra en la figura 3, donde se presentan los principales factores que se contemplan en la valoración de riesgos ambientales; resaltando la componente espacial de cada uno de ellos y sus posibilidades cartográficas, los focos de peligro con sus niveles y escalas, la exposición que hace referencia a la intensidad de los impactos, finalmente

los mapas de vulnerabilidad que representan el estado real del ecosistema.

LA ENVIROMATICS PARA ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD AMBIENTAL

Debido a la gran cantidad y diversa información que se debe manipular y procesar en la realización de estudios de vulnerabilidad, relacionada con aspectos climatológicos, socioeconómicos, biofísicos, etc., se hace necesario la implementación de herramientas integrales adecuadas y diseñadas para enfrentar problemáticas de este tipo, por tal motivo se describe en esta sección la que se considera la herramienta más apropiada para este estudio.

La informática ambiental es un campo relativamente nuevo con raíces en la computación, ciencias ambientales y sociales (denominada usualmente por su contracción en inglés: *Enviromatics*). Conjuga diversas disciplinas como ecológicas, económicas, planeación, química, física, climatológicas, etc., y sus practicantes deben ser capaces de trabajar con grupos profesionales de varias áreas ambientales (Schimak, 2005).

Esta nueva disciplina de informática ambiental comenzó a emergir en Europa central hace aproximadamente 15 años con la intención de contribuir al desarrollo de una sólida base conceptual para el tratamiento de la información ambiental sobre bases científicas (figura 4). Sin embargo, la Informática Ambiental no se considera a sí misma como una mera disciplina de apoyo en las ciencias ambientales que provee herramientas informáticas, sino mucho más, ofrece una amplia gama de métodos de Informática poderosos y probados para la reducción de la complejidad



Figura 3. Aspectos metodológicos considerados para la determinación de la vulnerabilidad.

y la resolución de problemas que pueden ser también útiles en los diversos ámbitos medioambientales.

En definitiva, la *Enviromatics* es de suma importancia para casos donde no es posible resolver el problema con una única herramienta y se hace necesario combinar al menos dos o más herramientas en una solución.

Los Sistemas de Información Ambiental

En el conocimiento del ambiente, los Sistemas de Información Ambiental (EIS, por sus siglas en inglés) aunado a factores humanos, son las principales piedras angulares en la ciencia y manejo ambiental en la actualidad (Schimak, 2005 y Denzer, 2005). De acuerdo con Denzer (2005), se consideran cuatro módulos que están soportados principalmente en el uso de modelos matemáticos, sistemas de información geográfica, sistemas de soporte de decisiones (evaluación ambiental) y sistemas

de manejo de datos. Los sistemas de información ambiental son sistemas muy complejos que requieren la integración de manejo de datos, sistemas de metadatos, modelos, sistemas de información geográfica (SIG), y otros componentes como procesamiento de imágenes, todos interactuando entre sí con el objetivo común de apoyar al usuario en la toma de decisiones para la implementación de medidas y acciones de control y restauración (figura 5).

Esto básicamente significa que hay cuatro principales metodologías o tecnologías que pueden ser encontradas en los EIS:

- una aproximación numérica (modelos matemáticos),
- una aproximación geográfica (SIG),
- una aproximación basada en análisis de impactos (sistemas de soporte de decisiones),
- una aproximación basada en manejo de base de datos (sistemas de manejo de datos),

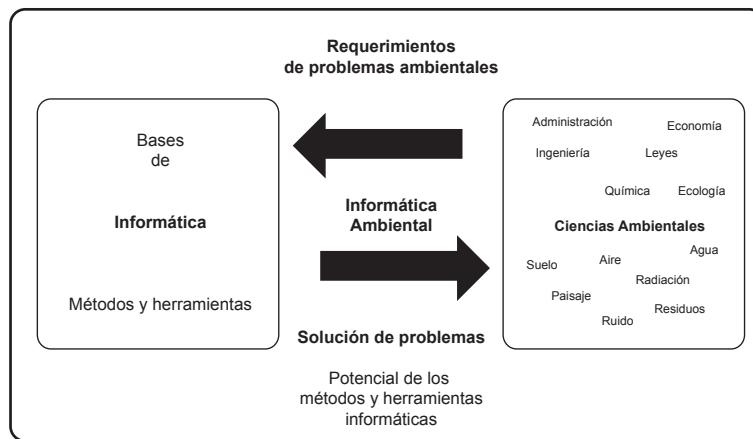


Figura 4. La Enviromatics llena el vacío entre el campo ambiental y la metodología informática.
(Fuente: Rautenstrauch y Patig, 2001).

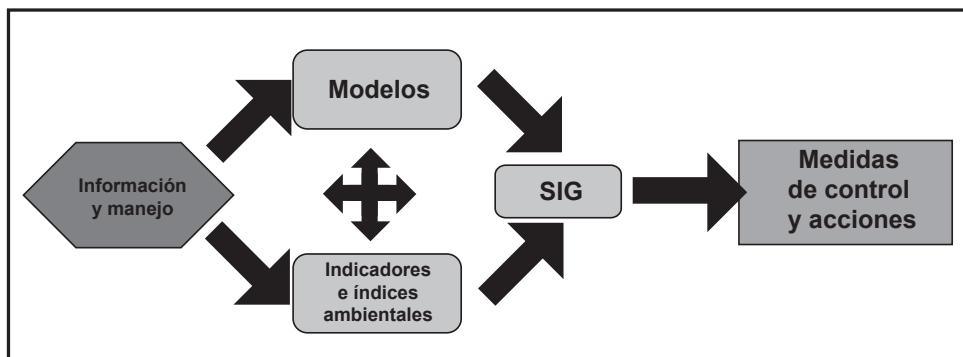


Figura 5. Principales componentes de lo EIS

Muchas de las aplicaciones tienen una combinación de al menos dos de las metodologías mencionadas (*e.g.* modelos y SIG), además deben contar con al menos un sistema de manejo de datos.

Los EIS son entonces un conjunto de elementos y herramientas que interactúan y trabajan de manera conjunta para manipular, procesar, generar y desplegar datos e información en una forma práctica y sencilla para di-

ferentes tipos de usuarios, información y procesos. El hecho de que integre diversos tipos de herramientas, demanda también la participación cercana y mancomunada de diferentes disciplinas, tanto para el desarrollo mismo del sistema, como para su implementación, aplicación y uso.

El manejo, evaluación y protección ambiental actual es impensable realizarlo sin el uso de sistemas de información y herramientas.

tas computacionales para procesos de toma de decisiones (Denzer, 2003). Por ejemplo, la modelación ambiental tal como se aplica para la estimación del potencial de escurrimiento e inundación por ríos (*Ver capítulo: Hidrodinámica del río Coatzacoalcos y estimación de las posibles inundaciones ante escenarios del cambio climático*), requiere de largos procesos iterativos de suministro, reformateo e introducción de varios tipos de datos al modelo. Lo cual ocurre para una amplia gama de geociencias (climatología, geomorfología, hidrología, etc.), cada una con múltiples modelos de datos y formatos. Esto implica realizar tareas complicadas para los científicos tales como la ubicación y recopilación de conjuntos de datos geoespaciales apropiados para los modelos (modelos digitales del terreno, imágenes de satélite, estaciones de medición, etc.).

Para superar estas limitaciones se ha planteado la necesidad de una nueva generación de sistemas ambientales, cambiando de aplicaciones de escritorio centralizadas hacia la prestación de servicios y componentes geoespaciales distribuidos (Mineter *et al.*, 2003). Esto prevé el uso de tecnologías emergentes como los servicios de internet y enfatizan la necesidad de la modularidad y la reutilización de software a través de la estructuración de aplicaciones como un conjunto de servicios relacionados. En consecuencia, los sistemas de información ambiental actuales operan efectivamente en ambientes distribuidos y abiertos, ya no es necesario su implementación y desarrollo en sistemas locales y centralizados.

Lo anterior, implica que al implementar sistemas de información ambiental, se deben entender conceptos relacionados como la computación distribuida, la disponibilidad de datos, la arquitectura orientada a servicios

(SOA, por sus siglas en inglés), servicios interoperables (interoperabilidad), geoportales, “Open GIS”, Servidores de Mapas en la Web (Web Map Server), Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), entre otros.

Asimismo, se considera de gran importancia el entendimiento de estos conceptos por su importante utilidad en casos como el estudiado en este trabajo, relacionado con la vulnerabilidad debida a potenciales eventos de inundación ocasionada por el aumento del nivel del mar o por eventos meteorológicos, los cuales involucran la participación de especialistas e información de áreas heterogéneas.

Algunos de estos conceptos se describen brevemente en las siguientes secciones, no obstante y debido a que no es el alcance de este trabajo, se recomienda consultar bibliografía especializada para acceder a información más detallada referente a su desarrollo, uso y aplicación.

Arquitectura orientada a servicios (Service Oriented Architecture)

Actualmente el desarrollo de los sistemas de información están siendo conducidos por la aplicación de la Arquitectura Orientada a Servicios (Service Oriented Architecture, SOA), la cual se enfoca a un estilo de arquitectura para diseñar aplicaciones basadas en una colección de prácticas, principios, interfaces y estándares relacionados al concepto central de servicio.

La SOA es un paradigma para organizar y utilizar capacidades distribuidas que pueden ser independientes y aplicar sus funcionalidades accediendo desde la Internet, ofrecidas como servicios.

La estrategia de orientación a servicios permite la creación de servicios y aplicaciones

compuestas que pueden existir con independencia de las tecnologías subyacentes. En lugar de exigir que todos los datos y lógica del sistema residan en un mismo ordenador, el modelo de servicios facilita el acceso y uso de los recursos de la Tecnología de la Información (TI) a través de la red.

El concepto de SOA no es nuevo, las arquitecturas orientadas a servicios se han utilizado durante años. Lo que distingue una arquitectura SOA de otra es su acoplamiento flexible; esto significa que el usuario de un servicio es básicamente independiente del servicio. La forma en que un usuario (que puede ser otro servicio) se comunica con el servicio, no depende de la aplicación del servicio. Esto significa que el usuario no tiene que saber mucho sobre el servicio para usarlo. Por ejemplo, no necesita saber en qué lenguaje está codificado el servicio o en qué plataforma corre. El usuario se comunica con el servicio a través de una interfaz bien definida y específica, y simplemente le deja al servicio ejecutar los procedimientos necesarios. Si la implementación del servicio cambia, el usuario se comunica con el servicio de la misma manera que anteriormente, toda vez que la interfaz permanece siendo la misma.

Esencialmente, SOA introduce una nueva filosofía para la distribución de aplicaciones distribuidas, donde los servicios pueden ser descubiertos, agregados, publicados, reusados e invocados al nivel de interfaz, independientemente de la tecnología específica utilizada internamente para implementar cada servicio.

Interoperabilidad

Cuando se utiliza información geográfica, se hace necesario considerar dos aspectos que

afectan de manera importante su aplicación y uso:

- *Variabilidad.* La Información Geográfica (IG) es altamente cambiante, puede ser debido a la acción humana o debido a causas naturales, en tanto que las condiciones de la Tierra son poco estables.
- *Acceso.* En casos críticos, en los que se deben tomar decisiones inmediatas (e.g. casos de emergencia, derrames de petróleo) se requiere que la información esté disponible al instante.

Para resolver esta situación, es necesario acceder inmediatamente a la información más actual posible. Tal actualización y accesibilidad de la IG se puede realizar accediendo la información proporcionada por el proveedor vía Internet. No obstante, el uso de sistemas en red implica nuevos inconvenientes que se deben resolver. Es entonces cuando se manejan conceptos como Interoperabilidad.

La interoperabilidad busca resolver la posibilidad de comparar y unir datos provenientes de diversas fuentes. Se puede definir como la condición mediante la cual, sistemas heterogéneos pueden funcionar como si formaran parte de un mismo sistema, y así intercambiar datos y distribuir procesos.

La interoperabilidad de sistemas de información se refiere a la habilidad de compartir información en ambientes computacionales distribuidos, particularmente:

- Para encontrar información cuando sea necesitada, independientemente de su ubicación.
- Para entender la información descubierta, sin importar la plataforma y/o formato en que se encuentra, o si es local o remota.

“Open GIS” y Servidores de Mapas en la Web (Web Map Server)

Un Web Map Server, tal como su nombre lo indica, es un servidor que provee mapas en la Web, los cuales pueden ser simplemente mapas estáticos, pero que se puede interactuar con ellos. Asimismo, ofrecen una forma de permitir la superposición visual de información geográfica compleja y distribuida en Internet.

Un Servidor de Mapas puede hacer esencialmente tres cosas:

1. Produce un mapa (como una imagen, como una serie de elementos gráficos, o como un paquete de datos de objetos geográficos).
2. Responde a preguntas básicas sobre el contenido del mapa, y
3. Comunica a otros programas qué mapas puede producir y cuales de ellos pueden ser consultados después.

La intención de la cartografía (mapas) en la Web es representar información espacial rápida y fácilmente para la mayoría de los usuarios, requiriéndose para tal propósito solamente la habilidad para leer mapas.

Entre los servicios más relevantes especificados por el OGC están los siguientes:

Servicio de Mapas en Red (Web Map Service, WMS)

El WMS, proporciona una interfaz sencilla Http para solicitar imágenes de mapas georeferenciados de una o mas bases de datos geoespeciales distribuidas. Una requisición WMS define las capas geográficas y el área de interés a ser procesada. La respuesta a la requisición es uno o más imágenes de mapas georeferenciados (retornados como JPEG, PNG, etc.) que pueden ser desplegados en un

explorador web. La interfaz también admite la posibilidad de especificar si la imagen retornada debe ser transparente para que las capas de diferentes servidores puedan ser combinadas o no. La imagen de mapa puede provenir de un fichero de datos de un SIG, un mapa digital, una ortofoto una imagen satelital, etc. (OGC, 2006).

Servicio de Objetos en Red (Web Feature Service, WFS)

El objetivo del WFS es permitir acceder y consultar todos los atributos de un objeto geográfico, también puede ser usado para satisfacer el servicio de descarga. Un objeto geográfico puede ser, por ejemplo, un río, una delimitación estatal, o una ciudad representada en modo vectorial, siempre con una geometría asociada descrita por un conjunto de coordenadas. De tal manera que el WFS no solo permite visualizar la información, sino que además permite consultar los atributos asociados y realizar algunas operaciones de manipulación de datos. El WFS soporta operaciones como Insertar, Actualizar, Eliminar, Bloquear, Buscar y Descubrir, usando Http como plataforma distribuida de computación (OGC, 2005).

Infraestructura de datos espaciales (IDE)

Las IDE son sistemas de información en colaboración basados en Internet, diseñados para facilitar el intercambio de datos geoespaciales mediante la armonización de especificaciones de datos y disponiendo de la accesibilidad más amplia y al menor costo posible. Una infraestructura de datos espaciales es una iniciativa que reúne acuerdos políticos, tecnologías, datos y servicios estandarizados que permiten el

acceso e intercambio a diferentes niveles de uso de información geográfica.

De lo anterior se deriva la justificación de la creación y establecimiento de infraestructuras de datos espaciales en base a dos necesidades:

- **Fácil acceso.** Se debe acceder de una forma fácil, y eficaz a los datos geográficos existentes. Facilitar su acceso hace posible una mayor eficacia de los procesos donde estos datos sean utilizados.
- **Reutilización:** la información geográfica de poder reutilizarse una vez que ha sido usada para un proyecto para el cual ha sido obtenida. Se debe utilizar para otras finalidades, debido al alto coste de producción.

Una IDE esta integrada por recursos técnicos como catálogos, servidores, programas, datos, aplicaciones, paginas Web, etc. que están dedicados a gestionar eficazmente la información geográfica disponible en la Red, tales como mapas, ortofotos, imágenes de satélite, y que cumple con una serie de condiciones de interoperabilidad (estándar, especificaciones, protocolos, interfaces, etc.). Más específicamente, una IDE se compone esencialmente de: datos, metadatos, servicios, hardware, software, de personal, de una organización (figura 6).

Por tanto, una IDE es un conjunto de servicios que ofrece una serie de funcionalidades útiles a la comunidad de usuarios de información geográfica. Anteriormente los usuarios se enfocaban más que nada en los datos a los que podía acceder. Actualmente se hace más énfasis en los servicios. Ahora, el usuario no tiene tanto interés en descargar los datos a su sistema, sino obtener directamente las respuestas que un determinado servicio ofrece a sus requerimientos.

Infraestructura de datos espaciales en México

De acuerdo con Álvarez (2009), particularmente en Latinoamérica se identifican grandes contrastes, basados principalmente en las significativas diferencias en: la economía, el tamaño de los países, el acceso a la Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC), la disponibilidad de recursos humanos capacitados, las competencias profesionales de quienes lideran organizaciones con algún mandato en el territorio y en el valor que se le otorga a la información geográfica para la toma de decisiones.

En el caso particular de México, se cuenta con la Infraestructura de Datos Espaciales de México (IDEMEX), la cual es desarrollada y manejada desde hace mas de 5 años por el

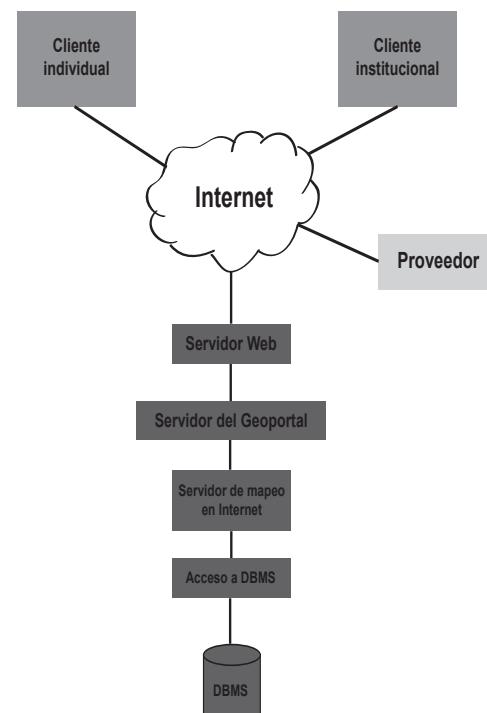


Figura 6. Arquitectura del sistema para un Geoportal IDE.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Para lo cual se promulgó la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (LSNIEG) publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 16 de abril de 2008, y entró en vigor el 15 de julio del mismo año.

El artículo 26 de la LSNIEG establece que “el Subsistema Nacional de Información Geográfica y del Medio Ambiente, en su componente geográfico, generará como mínimo los siguientes grupos de datos: marco de referencia geodésico; límites costeros, internacionales, estatales y municipales; datos de relieve continental, insular y submarino; datos catastrales, topográficos, de recursos naturales y clima, así como nombres geográficos. A este componente también se le denominará Infraestructura de Datos Espaciales de México.”

IDEDEX es el conjunto de recursos, normas, tecnologías, políticas, marcos legal, administrativo y organizacional, necesarios para la efectiva creación, recopilación, manejo, acceso, distribución y uso de datos espaciales (IDEDEX, 2009).

Geoportales

Los portales son sitios Web que actúan como una puerta o acceso a una colección de recursos de información, incluidos conjuntos de datos, servicios, noticias, tutoriales, herramientas y una colección organizada de enlaces a muchos otros sitios por lo general a través de catálogos. En ese sentido, un Portal es un entorno Web que permite a una organización o una comunidad de usuarios y proveedores de información, agregar, compartir contenido y crear consenso.

Por lo tanto un geoportal puede ser definido como “un sitio Web considerado un punto

de acceso al contenido geográfico en la Web, o simplemente, un sitio Web donde se puede encontrar contenido geográfico”. Dentro una Infraestructura de Datos Espaciales, los geoportales resuelven la conexión física y funcional entre los almacenes de datos geográficos y los usuarios de Información Geográfica.

Los geoportales e IDE han hecho una contribución importante en la simplificación del acceso a la información geográfica y con esto, han logrado estimular a las personas que desean usar conceptos de información geográfica, bases de datos, técnicas y modelos en sus trabajos (Maguire y Longley, 2005). Los geoportales pueden además conectar proveedores y usuarios de IG distribuidos vía Internet. Facilitan asimismo el intercambio de IG, evitan la duplicación de información y ofrecen, hasta la fecha, geoservicios con metadatos asociados a la calidad y ajuste para diferentes propósitos.

Un ejemplo de geoportal en México es el Atlas Nacional Interactivo de México (<http://www.atlasdemexico.gob.mx/index1.cfm>), el cual ha sido concebido como expresión concreta de la Infraestructura de Datos Espaciales de México (IDEDEX), desde el punto de vista técnico este geoportal es un servicio distribuido de consulta de información geográfica en la que el usuario tiene acceso a través de la Web a los diferentes temas presentados en capas específicas de información, todas las capas se complementan entre sí, ofreciendo una visión más completa de la realidad. Integra información que describe las características del territorio en términos de población, carreteras y autopistas, clima, vegetación y fauna, biodiversidad, locación de servicios, sitios vulnerables, etc. (figura 7).

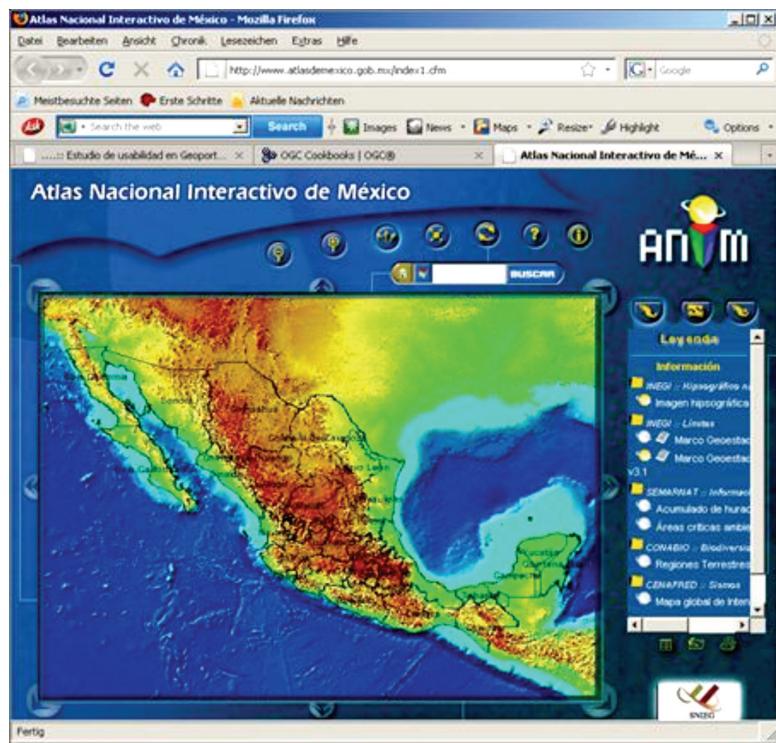


Figura 7. Página de inicio del Atlas Nacional Interactivo de México.

En resumen, algo común en cada uno de estos geoportales, es la aplicación de sistemas de información geográfica en ambientes computacionales distribuidos. Hoy en día, la implementación de geoportales se basa en la implementación de tecnologías SIG distribuidas. Además, el éxito de la implementación de un SIG distribuido, cae en aplicaciones de geoportales bien definidos para asegurar la relevancia del sistema a las comunidades de usuarios que lo utilizan (Tait, 2005).

Incorporación de los indicadores a un Sistema de Información Ambiental

Uno de los mayores atractivos de la línea de investigación en vulnerabilidad y riesgos am-

bientales por el aumento del nivel del mar y su incorporación a un sistema de información ambiental, reside en su carácter esencialmente aplicado. Se podrían distinguir dos grandes orientaciones en las aplicaciones: la planificación de emergencias (destinada a organizar la respuesta ante una catástrofe), y el ordenamiento territorial en general (que intentaría evitar o prevenir los sucesos catastróficos).

Teniendo en cuenta las tecnologías y herramientas que han sido descritas previamente, disponibles en el desarrollo e implementación de EIS, y de acuerdo a las características ambientales y socio-económicas particulares en vueltas en el estudio y análisis de la vulnerabilidad costera debido al cambio climático, así como las necesidades y objetivos requeridos

en este tipo de estudios, se presenta en la figura 8 un esquema propuesto para la arquitectura de un Sistema de Información Ambiental que podría hacer parte de la metodología de evaluación de la vulnerabilidad costera en

México, que integra elementos esenciales tales como el manejo de base de datos, los SIG y el uso de modelos, constituidos mediante la conceptualización de la arquitectura orientada a servicios.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Necesidad de generar información básica actualizada:
- Topográfica, batimetría
- Cartografía refinada donde se aprecien curvas de nivel a un metro cuando menos
- Actividades y uso de las cuencas hidrográficas por sector (agrícola, industrial, turístico, etc.)
- Instrumentación de las zonas, falta de mediciones regulares permanentes. Incremento de puntos de medición y control de la información
- Generación de bases de datos disponibles en red o bien manejadas por los sectores correspondientes (CNA, INE, Semarnat, INEGI, etc.); existen infinitud de estudios que se han realizado

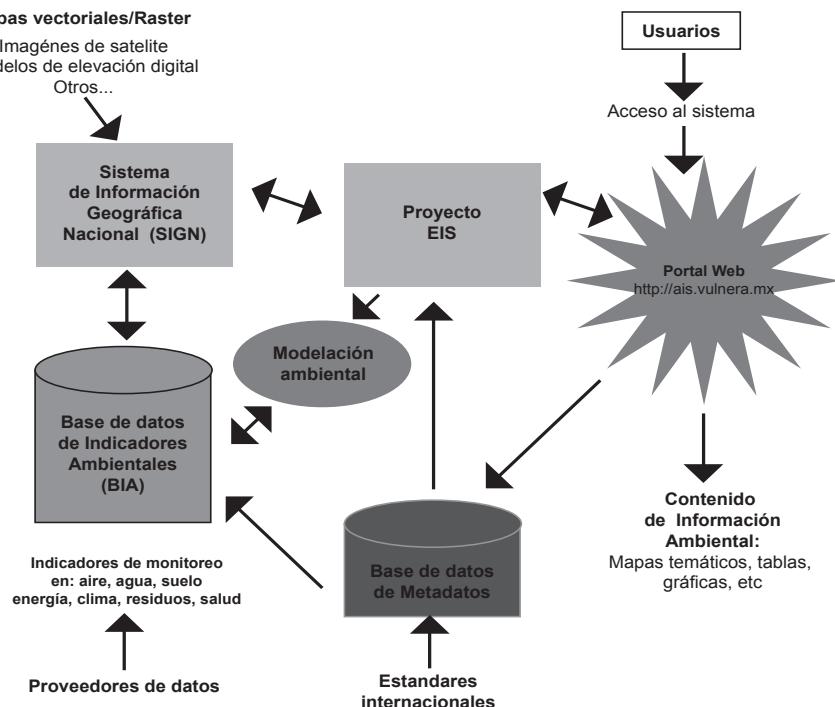


Figura 8. Esquema de la arquitectura del sistema.

por diferentes instituciones públicas, privadas, universidades, centros de investigación y organizaciones no gubernamentales, la información no siempre es accesible y se encuentra dispersa.

- Ordenamiento territorial costero, falta del seguimiento y organización; de igual forma que en el punto anterior existen infinidad de estudios que se han realizado por diferentes instituciones públicas, privadas, universidades, centros de investigación y organizaciones no gubernamentales, la información no siempre es accesible y se encuentra dispersa.
- Desarrollo de un sistema con la capacidad de manejo de información heterogénea y masiva, que permita optimizar el procesamiento de la información en forma abierta, flexible y organizada a través del manejo de bases de datos estandarizadas, así como su representación en sistemas de información geográfica. Esto es, desarrollar un sistema de información ambiental de vanguardia.

- Aprovechando la capacidad de los sistemas de información ambiental, integrar la modelación numérica para evaluar la respuesta de los ríos en las zonas costeras, con lo cual los efectos del cambio climático se verán reflejados en que tan vulnerables pueden ser los ecosistemas a dicho cambio y por otro lado a su poder de adaptación ante dichos cambios.

Se considera que para el estudio y análisis de la vulnerabilidad costera, es necesario un equipo compuesto por el tipo y número adecuado de especialistas con la experiencia apropiada. Los siguientes tipos de profesionales, entre otros, son requeridos en dicho equipo:

- Especialistas/científicos/modeladores con dominio interdisciplinario.
- Desarrolladores de sistemas de software, flexibles y altamente calificados.
- Especialistas en comunicación profesional.
- Un administrador de proyecto experimentado.

LITERATURA CITADA

Alonso D. A., M. P. Vides y M. Londoño, 2001. Amenazas y riesgos ambientales en las zonas costeras colombianas. En: Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVERMAR. Colombia.

Bayo García, N., E. Chicharro Fernández, y A. Galve Martín, 1995. Aspectos teóricos en la medición de los impactos en el medio social de los residuos tóxicos y peligrosos. *Serie Geografía*, 5: 69-96.

Canziani O. y S. Díaz, 2000. Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad. Capítulo 6: América latina. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Conde A. C., (sin año). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: descripción de un estudio de caso y los retos en las investigaciones actuales. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. pp 157 – 171.

- Denzer R., 2003. Computing Programs for Scientists and Engineers - What is the Core of Computing?.p. 69-75. In: L. Cassel, R. Reis (eds.). *Informatics curricula and teaching methods*, Kluwer, IFIP Series
- Denzer R., 2005. Generic integration of environmental decision support systems – state-of-the-art. *Environmental Modelling & Software*, 20: 1217–1223.
- Díaz M. M. y C.C. Díaz, 2001. El análisis de la vulnerabilidad en la cartografía de riesgos tecnológicos. Algunas cuestiones conceptuales y metodológicas. Departamento de Geografía Universidad de Alcalá. *Serie Geográfica*, 10: 27 – 41.
- Frattini R. A., 2002. Vulnerabilidad de las zonas costeras próximas a grandes centros urbanos. AA-AGOSBA-ILPLA-SIHN.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2001. Vulnerabilidad y adaptación de la zona costera colombiana al ascenso acelerado del nivel del mar. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IPCC, 1992. Climate Change, the Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. J. T. Houghton, B. A. Callendar, and S. K. Varney, eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 200 p.
- IPCC, 1994. Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations with a Summary for Policy Makers and a Technical Summary. T.R. Carter, M.L. Parry, H. Harasawa, S. Nishioka. Eds. Department of Geography, University College London, UK. and the Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Japan. 59 p.
- Lim, B., I. Burton y S. Huq, 2004. Adaptation policy frameworks for climate change. Developing strategies, policies and measures. Cambridge University Press.
- Magaña V. y C. Gay , (sin año) Vulnerabilidad y Adaptación Regional Ante El Cambio Climático y sus Impactos Ambiental, Social y Económicos. Instituto Nacional de Ecología.
- Maguire D.J., y P.A. Longley, 2005. The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29 (1): 3-14.
- Mineter, M.J., C.H. Jarvis, y S. Dowers, 2003. From stand-alone programs towards grid-aware services and components: a case study in agricultural modelling with interpolated climate data. *Environmental Modelling & Software* 18 (4): 379-391.
- Ortiz P. M. y L.A. Méndez, 1999. Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. Instituto de Geografía. UNAM. Investigaciones Geográficas Boletín 39.
- Rautenstrauch C., S. Patig, 2001. Environmental Information Systems in Industry and Public Administration. IIDEA Group Publishing, Hershey PA, USA.
- Schimak G., 2005. Environmental Knowledge and Information Systems. *Environmental Modelling & Software*, 20: 1457 – 1458.
- Segnestam L., M. Winograd, y A. Farrow, 2000. Desarrollo de indicadores: Lecciones Aprendidas de América Central. Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo / Banco Mundial. Washington, D.C.
- Smith J., H. J. Schellnhuber y M. M. Qader Mirza, 2001. Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis. In: IPCC. Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO.UNEP.
- Tait M. G., 2005. Implementing geoportals: applications of distributed gis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29: 33–47.
- Walsh, M.R., 1992. Toward spatial decision support systems in water resources. *J. Wat. Resour. Plan. Mgmt*, 109 (2): 158–169.

Sitios de Internet

Álvarez M., 2009. Las Infraestructura de Datos Espaciales en Iberoamérica. http://www.mundogeo.com.br/revistas-interna.php?id_noticia=12927&lang_id=2

OGC (Open Geospatial Consortium), 2005. Web Feature Service Implementation Specification. Disponible en: <http://www.opengeospatial.org/standards/wfs>

OGC (Open Geospatial Consortium), 2006. OpenGIS Web Map Server Implementation Specification. Disponible en: <http://www.opengeospatial.org/standards/wms>

IDEDEX, 2009. Infraestructura de datos espaciales de México. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/espanol/IDEMex.pdf?s=geo&c=1352>

Rodríguez Herrero H., y L. Bozada Robles, 2010. Vulnerabilidad social al cambio climático en las costas del Golfo de México: un estudio exploratorio. p. 427-468. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMyl, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Vulnerabilidad social al cambio climático en las costas del Golfo de México: un estudio exploratorio

P. H. Rodríguez Herrero y L. M. Bozada Robles

RESUMEN

El objetivo general del presente estudio fue determinar mediante la aplicación de indicadores socio-económicos, las áreas de alta vulnerabilidad social en la zona costera del Golfo de México y Mar Caribe ante los eventos extremos del cambio climático. Se construyó un índice compuesto de vulnerabilidad social considerando 11 variables: Producto interno per cápita ajustado a dólares, porcentaje de población femenina que participa en la población económicamente activa, porcentaje de población mayor de 15 años alfabetizada, porcentaje de población femenina mayor a los 15 años alfabetizada, porcentaje de población bajo pobreza alimentaria, índice de sobrevivencia infantil, porcentaje de hogares con acceso a servicio de salud, hogares que tienen tv dividido por población total, hogares que no cuentan con agua potable, localidades rurales dentro del municipio, grado de acceso a infraestructuras de comunicación. La aplicación del índice permitió detectar diversos niveles de vulnerabilidad, el cual fue cartografiado a fin de apreciar la forma en que se distribuye a lo largo del Golfo de México. Las áreas que registran muy alta vulnerabilidad se ubican en las zonas de la Sierra Madre Oriental, es decir, en áreas que por su difícil topografía poseen problemas de aislamiento. Al contrastar las zonas de vulnerabilidad social con las zonas de riesgo, puede apreciarse que las zonas de baja vulnerabilidad se hallan asociadas con las zonas de desarrollo urbano, ya que éstas concentran gran parte de los procesos de modernización (infraestructura y servicios de salud, educación, comunicación) y desarrollo económico. Sin embargo, ello no impide que también se encuentren amenazados por situaciones de riesgo.

Palabras claves: vulnerabilidad, cambio climático, capital social, Golfo de México.

INTRODUCCIÓN

El propósito fundamental del presente estudio fue determinar mediante la aplicación de indicadores socio-económicos y demográficos, las áreas de alta vulnerabilidad en la zona costera del Golfo de México ante los eventos extremos del cambio climático.

La vulnerabilidad social señala situaciones en las cuales la población se encuentra expuesta a fenómenos (un evento natural) que pueden causar daños que podrían ser evitados. La razón por la cual la población se encuentra en esa situación de vulnerabilidad o riesgo puede ser resultado de un problema de percepción (qué tan informada está de las amenazas) o bien un problema de cálculo de la seguridad (qué tan aceptable es el riesgo considerando una evaluación de la situación y de las defensas disponibles).

La razón por la cual la población se encuentra en situación de vulnerabilidad, puede obedecer no a un problema de *percepción*, sino a un problema *práctico*. Como se ha visto recientemente en México (2007), las situaciones *prácticas* que generan amenazas están cambiando rápidamente y han adquirido gran complejidad. El término “cambio climático” puede estar cubriendo, en su simpleza, una diversidad de fenómenos de gran complejidad: cambios en las temperaturas, cambios en las mareas, cambios en los patrones de precipita-

ción pluvial, cambios en los ecosistemas, cambios en las capacidades del suelo para asimilar la creciente humedad, cambios en la magnitud de los huracanes, etc. La coincidencia o confluencia de algunos de estos fenómenos, es lo que explica en un momento dado la envergadura de una amenaza, la cual adquiere, de manera súbita, proporciones que rebasan la capacidad de respuesta del grupo social.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los ejes centrales de la presente investigación son las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la vulnerabilidad de las poblaciones humanas de las áreas costeras del Golfo de México ante los eventos extremos del cambio climático?
- ¿Cuáles son los factores de desarrollo que determinan las áreas de alta vulnerabilidad en la zona costera del Golfo de México?

La primera parte del presente informe comprende una robusta revisión de los estudios de vulnerabilidad. En una segunda parte, se propone un índice de vulnerabilidad social para los estados que conforman la zona costera del Golfo de México.

JUSTIFICACIÓN

En la presente investigación se examinan las consecuencias que tiene para los grupos humanos un cambio en el entorno con los si-

guientes rasgos: incremento del nivel del mar, intrusión salina sobre los cuerpos de agua tierra adentro, cambio del patrón de lluvias,

incremento en la frecuencia, fuerza e impacto de los meteoros (tormentas tropicales, huracanes), inundaciones, cambios en la biodiversidad (ecosistemas costeros y marinos).

Las implicaciones o consecuencias de estos fenómenos, en el ámbito social y económico, pueden ser:

- Sobre áreas de cultivo agrícola y sobre áreas de alimentación del ganado.
- Sobre vías de comunicación.
- Sobre áreas de pesquerías.
- Sobre manglares.
- Sobre áreas de asentamiento humano.
- Sobre infraestructuras y equipamientos.
- Sobre áreas de actividad industrial, comercial y de servicios.
- Sobre áreas de actividad portuaria.
- Sobre áreas de extracción y distribución (oleoductos) de hidrocarburos.
- Sobre áreas que ofrecen servicios fundamentales (educación, salud, comercio).

El análisis de los impactos que pueden tener estos fenómenos sobre la vida social, indica la necesidad de tener en cuenta los puntos geográficos en los cuales estará presente el impacto; pues los grupos de población habitan localidades de diverso tamaño. La vulnerabilidad

de estas localidades deriva de su posición geográfica (proximidad a la línea de costa y a los cuerpos de agua) y de su forma de articulación con la actividad económica y con las vías de comunicación. La vulnerabilidad de los grupos humanos puede derivar de la presencia de un déficit en factores como la educación, la participación femenina en la vida social, el desarrollo institucional, situaciones que se encuentran expresadas en el concepto de Desarrollo Humano.

En la investigación se exploran algunos aspectos reconocidos como ingredientes del Capital Social, el cual alude a la presencia de redes de información y hábitos de confianza y cooperación (y solidaridad) entre los miembros de una sociedad.

La revisión de la literatura a nivel nacional e internacional determinó la necesidad de aplicar y analizar los Indicadores de Desarrollo Humano y el Índice de Rezago Social en la zona costera del Golfo de México en diferentes escalas: estatal, municipal y local, realizando su representación en un sistema de información geográfica; sin embargo, para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto general se requirió construir un índice de vulnerabilidad social adecuado a las áreas costeras mexicanas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar mediante la aplicación de indicadores socio-económicos y demográficos, las áreas de alta vulnerabilidad en la zona costera del Golfo de México y Mar Caribe, ante los eventos extremos del cambio climático.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Identificar los indicadores socio-económicos y demográficos que configuran a las áreas de alta vulnerabilidad en la zona costera del Golfo de México y Mar Caribe.

- b) Caracterizar las áreas de alta vulnerabilidad del Golfo de México y Mar Caribe ante los eventos del cambio climático.
- c) Analizar los factores socio-económicos y ambientales que influyen en la vulnerabilidad de la zona costera y los deltas más vulnerables al incremento del mar.

CONSIDERACIONES TEÓRICAS Y CONCEPTUALES

Sobre la definición de zona costera, Casco (2004) hace referencia a la propuesta efectuada por la Dirección General de Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambiente Costero, en los siguientes términos: *Hacia el mar la zona costera abarca desde el límite marino de la plataforma continental y mar territorial –frontera ecosistémica y jurídica- hasta los límites geopolíticos tierra adentro de los municipios que tienen litoral (167 municipios) o están contiguos (463 municipios)-frontera sociodemográfica* (Casco, 2004).

Una definición equivalente, estructurada en conceptos geo-ecológicos, describe a la zona costera como un conjunto donde mar y tierra ejercen una intensa influencia mutua, formado por las aguas marinas hasta el límite de la plataforma continental y la franja de tierra adyacente hasta el límite municipal, incluida en este conjunto la totalidad de las islas, cayos y arrecifes, las zonas de transición e intermareales, las marismas, los humedales, las playas, el suelo y el subsuelo de los vascos marinos y el espacio aéreo correspondiente (Casco, 2004).

Yáñez-Arancibia, Lara-Domínguez, Sánchez-Gil y Day (2004), consideran a 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, el*

agua dulce, la atmósfera y el mar adyacente. Incluye por lo general la planicie costera, la cuenca baja de los ríos, humedales hidrófitos, manglares, selva baja inundable, dunas, lagunas costeras, estuarios, playas y la pluma estuarina sobre la plataforma continental nerítica. En la práctica y para propósitos de manejo en un marco legal, [...] incorporan municipios [...] con frontera geográfica-política hacia el continente, y la plataforma continental como extensión hacia el mar. En México la Zona Federal Marítimo Terrestre (Zofemat) de 20 m queda incluida como una pequeña franja de este concepto de zona costera.

León y Rodríguez (2004) anotan que el límite del Golfo de México y lo que se considera la zona costera del mismo fue definido *a priori*. Señalando que tiene un carácter operativo para la conjugación de tres dimensiones, el paisaje terrestre analizado como eco regiones, la dinámica sociodemográfica analizada a través de las unidades municipales y los núcleos urbanos o ciudades que permiten visualizar fácilmente la concentración de la población. Señalando que no es necesariamente una región en el sentido económico o geográfico, sino que probablemente esté conformado por unidades territoriales y políticas asimétricas con implicaciones de conectividad entre las unidades. Estos autores, también exploran la dinámica sociodemográfica y su expresión

espacial, como una forma de ver las tendencias y pensar en las implicaciones ambientales asociadas. Asimismo, proponen una definición costera arbitraria donde las unidades analíticas territoriales se conforman con los municipios y las ecorregiones o paisajes que se encuentran en un cinturón de 130 km de ancho. La ventaja de emplear este criterio, fue permitir una comparación internacional a lo largo de los litorales (así como entre ambos océanos) y fue establecida como criterio para uniformar y permitir un análisis continental. Dado que las unidades de paisaje se sobreponen y traslanan con la información de los límites municipales, el ancho del cinturón varía para poder contener unidades municipales completas.

León y Rodríguez (2004) efectúan adicionalmente dos anotaciones de gran importancia. La primera es que las costas del Golfo y el mar Caribe constituyen un espacio natural donde la urbanización ocurrió de manera relativamente tardía. Aunque la emergencia de las localidades urbanas tiene su origen en la época de la colonia, su crecimiento demográfico sobre el territorio no ocurrió sino hasta mediados del siglo XX. La segunda, hace referencia al señalamiento que los principales problemas marinos y particularmente los costeros tienen su origen en las actividades localizadas en tierra y que la apreciación generalizada de este fenómeno surge formalmente en 1995, en el contexto de la Organización de las Naciones Unidas.

La inducción humana del cambio climático asociada al incremento del nivel del mar puede tener las mayores consecuencias adversas para la sociedad y los ecosistemas de las zonas costeras. El IPCC (2003) proyectó un incremento promedio global de la temperatura superficial

de 1.4 a 5.8 °C durante el periodo de 1990 a 2100. Basados sobre estas proyecciones, el nivel medio global del mar está estimado con un incremento de 9 a 88 cm en el mismo periodo, con un valor central de 48 cm, que corresponde 2.2 - 2.4 veces la tasa observada en el siglo XX. Incluso con drásticas reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero, el nivel del mar seguirá aumentando durante siglos, más allá del año 2100 debido al largo periodo de respuesta del sistema global de los océanos. Un último incremento del nivel del mar de 2 a 4 metros parece posible debido a la concentración del CO₂ atmosférico, siendo 2 y 4 veces los niveles pre-industriales, respectivamente (Church *et al.*, 2001). Sin embargo, con el uso generalizado de las evaluaciones de vulnerabilidad, sus limitaciones se han vuelto cada vez más evidentes debido a la obsolescencia de las fuentes de información sobre el fenómeno del cambio climático, el incremento del nivel del mar como variable única que determina la vulnerabilidad costera y las suposiciones arbitrarias sobre el desarrollo socioeconómico y su adaptación (Ninkel y Klein, 2003).

Se reconoce que una importante problemática, se deriva de la definición que cada disciplina científica hace del término vulnerabilidad, donde su connotación generalmente es incompatible o contradictoria (León, 2008). En el informe sobre Impactos Regionales del Cambio Climático: evaluación de la vulnerabilidad del Informe especial del Grupo de trabajo II del IPCC (1997), se anota que la vulnerabilidad está en función de la sensibilidad de un sistema a los cambios del clima, y de su capacidad para adaptar el sistema a dichos cambios. Por otra parte, considera que los estudios disponibles de vulnerabilidad no están

basados en un conjunto común de escenarios del clima ni de métodos, y dadas las incertidumbres existentes respecto de la sensibilidad y adaptabilidad de los sistemas naturales y sociales, una evaluación de las vulnerabilidades regionales es necesariamente cualitativa (Watson *et al.*, 1997).

Se puede considerar que la vulnerabilidad corresponde a la probabilidad de que una comunidad, expuesta a una amenaza natural, tecnológica o antrópica más frecuente en su tipo, según el grado de fragilidad de sus elementos (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta, desarrollo político institucional entre otros), pueda sufrir daños humanos y materiales en el momento del impacto del fenómeno. Donde la magnitud de estos daños está asociada con el grado de vulnerabilidad. Una forma resumida de definir la vulnerabilidad puede ser la probabilidad de que, debido a la intensidad del evento y a la fragilidad de los elementos expuestos, ocurran daños en la economía, la vida humana y el ambiente. Ser vulnerable es ser susceptible de sufrir daño y tener dificultad en recuperarse de ello; inflexibilidad o incapacidad en adaptarse. Este enfoque hacia la vulnerabilidad contempla factores físicos, sociales, políticos, tecnológicos, ideológicos, institucionales, culturales y educativos que, a su vez, se relacionan dentro de la realidad de la vulnerabilidad (Chardon y González Manizales, 2002).

En la revisión del concepto de vulnerabilidad (Chardon y González Manizales, 2002) citan que autores como Davidson (2000) y Michellier (1999) consideran que en el campo de la vulnerabilidad, es necesario contemplar dos elementos: *los elementos vulnerables* (es decir expuestos: población, obras de infra-

estructura, bienes, actividades, líneas vitales, elementos sociales, económicos, culturales, ambientales) y *la vulnerabilidad* como tal. Para Maskrey (1993), ser vulnerable equivale a ser susceptible de sufrir daño y tener dificultad en recuperarse de ello; es decir “inflexibilidad o incapacidad en adaptarse”. Precisando que si los hombres no crean un hábitat seguro es por necesidad extrema e ignorancia. Considera que la vulnerabilidad puede ser matizada, al emplear el concepto de vulnerabilidad *progresiva* que hace referencia a que los elementos expuestos, con el tiempo, se vuelven cada vez más vulnerables (por ejemplo: una edificación que no ha recibido mantenimiento, por falta de recursos) y por otra parte que la vulnerabilidad no debe considerarse sin una visión sistémica.

Chardon y González Manizales (2002) en su estado del arte sobre vulnerabilidad anotan toda una serie de definiciones, sobresaliendo las siguientes:

“Incapacidad de una comunidad para “absorber” mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente. Inflexibilidad ante el cambio. Incapacidad de adaptarse al cambio que, para la comunidad, constituye por las razones expuestas, un riesgo” (Wilches-Chaux, 1988).

“Un factor de riesgo interno de un sujeto o sistema expuesto a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o a ser susceptible de sufrir una pérdida. Es el grado estimado de daño o pérdida de un elemento o grupo de elementos expuestos como resultado de la ocurrencia de un fenómeno de una

magnitud o intensidad dada, expresado usualmente en una escala que varía desde cero, o sin daños, a uno” (Cardona, 1993).

“La falta de acceso de una familia, comunidad, sociedad, a los recursos que permiten seguridad frente a determinadas amenazas. También es vista como la incapacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza (es decir, la capacidad de protegerse y restablecer sus medios de vida), por tanto la vulnerabilidad depende en gran parte de la flexibilidad de la comunidad” (Blaikie, 1996; GTZ, 2002).

“La predisposición, susceptibilidad o factibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir daños en caso de que un fenómeno desestabilizador de origen natural o antrópico se manifieste. Dicha comunidad carece entonces de la capacidad para adaptarse o ajustarse a determinadas circunstancias” (Cardona, 2001).

“La probabilidad de que una comunidad expuesta a una amenaza natural, según el grado de fragilidad de sus elementos (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta, desarrollo político institucional...), pueda sufrir daños humanos y materiales” (CEPAL, 2000; BID, 2000).

León (2008) registra que si bien no existe consenso sobre la definición de los términos vulnerabilidad y adaptación, se pueden considerar algunas referencias importantes:

El IPCC (2001) define la vulnerabilidad como “el grado por el cual un sistema es susceptible o incapaz de enfrentarse a efectos adversos del cambio climático, incluidas la variabilidad y los fenómenos extremos del clima”. La vulnerabilidad es función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático y de la variación a la que un sistema está expuesto, así como de su sensibilidad y de su capacidad de adaptación. Mientras que la capacidad de adaptación, la define como la habilidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad del clima y sus extremos) para moderar cambios posibles, aprovecharse de oportunidades o enfrentarse a las consecuencias; será el mecanismo para reducir la vulnerabilidad. La aceptación de los conceptos anteriormente definidos; nos hace aceptar que el riesgo climático depende de la intensidad y frecuencia de la amenaza, pero también de la vulnerabilidad, es decir, la medida en que los sectores pueden ser afectados por la fragilidad de sus componentes.

El IPCC (2001) define la adaptación como “los ajustes en sistemas ecológicos, sociales o económicos que le dan respuesta a los estímulos climáticos actuales o esperados y sus efectos o impactos. Se refiere a los cambios en los procesos, prácticas y estructuras para moderar los daños potenciales o para beneficiarse de las oportunidades asociadas al cambio climático”.

En otro escenario, es conveniente explorar la forma en que se *construye*, de modo social, la *percepción* del riesgo y la vulnerabilidad.

La antropología ha contribuido al estudio de la construcción social del riesgo de diversas maneras. En un artículo reciente, García (2004) ha señalado algunas de las principales contribuciones que se han hecho en este terreno. Aquí conviene rescatar algunas de ellas. Douglas (1986) es una de las referencias básicas en este terreno. A fin de determinar los elementos cognitivos que permiten captar el peligro, esta antropóloga “eligió analizar las formas cómo el hombre distingue entre lo que es y lo que no es riesgoso, e, incluso, lo que acepta o no como riesgoso” (García, 2004). Así, Douglas (1986) escribió que cada “forma de organización social está dispuesta a aceptar o evitar determinados riesgos [...] Los individuos están dispuestos a aceptar riesgos a partir de su adhesión a una determinada forma de sociedad”. El planteamiento de Douglas es que el riesgo es una construcción colectiva y cultural. El riesgo, en esta perspectiva, no es un ente material objetivo, sino una elaboración, una construcción intelectual, que permite evaluaciones sociales de probabilidades. Por ello, es importante indagar la forma en que cada sociedad interpreta, valora, califica el riesgo. Y esto implica ver el proceso social bajo el cual se incuba la noción de riesgo o peligro. Además, de aquí se deriva la imposibilidad de una definición única del riesgo, ya que los individuos sociales negocian respecto de lo que es aceptable como peligro, y respecto de lo que conviene definir como margen de seguridad. Hay pues una *relatividad cultural* de la percepción del riesgo.

En este sentido, podría plantearse que un primer problema que debe esclarecer la investigación social es la forma en que se determina el *umbral* de riesgo en las poblaciones locales que se encuentran habitando en las zonas cos-

teras. Es importante indagar la forma en que socialmente se ha ido configurando la noción de peligro o riesgo, ante fenómenos que pueden ser atribuidos al cambio climático.

Douglas y Wildavsky (1982) refieren tres sistemas de valor dentro del conjunto social en relación al riesgo:

- a) el individualista, heroico y competitivo, que sólo es sensible a los riesgos económicos que acepta correr y que es inestable;
- b) el burocrático, que sólo percibe el riesgo por medio de las amenazas de guerra o de desestabilización de las instituciones, y que es jerárquico o autoregulador;
- c) el sectario que, por el contrario, sobreestima el riesgo tecnológico ya que el catastrofismo le permite reforzar su estatus marginal; consiste en una organización fundada con base en la adhesión voluntaria en la que el reclutamiento de miembros es precario.

Cada uno de estos sistemas de valores o puntos de vista dan pie a diferentes formas de percibir el riesgo. Así, algunos individuos pueden percibir el riesgo como un elemento de crítica al orden social, mientras que otros pueden disculpar al orden social aceptando los riesgos. La percepción de los riesgos resulta de las creencias y visiones que dominan a una sociedad concreta.

En la actualidad, ha ganado presencia la percepción de que los desastres tradicionalmente atribuidos a causas naturales no son sino resultado de prácticas sociales relacionadas con la degradación ambiental, el crecimiento demográfico, la urbanización, el incremento de las desigualdades sociales y económicas.

En esta perspectiva, se plantea que no hay desastres naturales: lo que hay son situaciones de vulnerabilidad que la sociedad propicia y que puede corregir. Puede afirmarse que el atacar los fenómenos de vulnerabilidad, contribuye a reducir la ocurrencia de desastres.

En términos temporales, esto implica reconocer que los desastres no son eventos (inesperados) sino *procesos* que se van gestando a lo largo del tiempo (a medida que se acumulan rezagos o imprudencias) hasta derivar en sucesos desastrosos para las poblaciones.

Kenneth Hewitt, en *Interpretations of Calamity* (1983) y en *Regions of Risk* (1997) ha contribuido a desarrollar este enfoque del desastre, el cual pone énfasis en examinar el *contexto* del desastre, para lo cual insiste en incorporar las variables socioeconómicas de los grupos a los cuales afecta. De esta forma, la amenaza (natural o antropogénica) no es el único agente activo del desastre; es indispensable ver a esta amenaza junto con los elementos que conforman el riesgo, entre los cuales la vulnerabilidad ocupa un lugar preeminente. Y hay que añadir que más que vulnerabilidad, se trata de vulnerabilidades: sociales, económicas, educativas, institucionales, las cuales se acumulan y originan, en un momento dado, al entrar en contacto con la amenaza, eventos desastrosos.

García (2004) recapitula estas ideas y plantea que el riesgo y el desastre constituyen procesos *multidimensionales y multifactoriales*, resultantes de la asociación entre las amenazas y determinadas condiciones de vulnerabilidad que se construyen y reconstruyen con el paso del tiempo.

De esta forma, llegamos a reconocer que un fenómeno (sea un huracán o un sismo, una escasez o un exceso de lluvias) que perturba

o desestabiliza al cuerpo social, intensifica o amplifica sus efectos gracias a que se han creado condiciones de vulnerabilidad o riesgo. La construcción social del riesgo indica entonces que hay procesos donde se generan o recrean condiciones de vulnerabilidad o fragilidad, situaciones de desigualdad social y económica, que vuelven al colectivo humano susceptible de padecer desastres (destrucciones).

De acuerdo con la OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico), un indicador puede definirse, de manera general, como un parámetro o valor, derivado de parámetros generados que señalan o proveen información o describen el estado de un fenómeno dado del ambiente o de un área específica, con un significado que trasciende el valor específico del parámetro (Semarnap, 2000).

León (2008), en su reporte anota que uno de los problemas que enfrenta la construcción de un Sistema de Información Geográfica (SIG) es la forma en que se construyen los índices y variables asociados a cada dimensión. Es por ello que los aspectos o procesos sociales, económicos y biofísicos son interpretados por distintas disciplinas y resultan difíciles de integrar. De ahí la propuesta de emplear indicadores que regional o mundialmente, han sido utilizados para denotar cambios sociales o ambientales. Un ejemplo es el Índice de Desarrollo Humano (mundial, regional y nacionalmente definido y documentado), el cual ha sido recomendado como eje del SIG para que cada unidad territorial o sitio piloto seleccionado, pueda construir un parámetro que exprese su condición actual y tendencias. Esto permitirá comparar sitios o grupos de municipios con respecto a si mismos, y a los estados del país.

El Índice de Desarrollo Humano (IDH) mide el logro medio de un país, estado o municipio en cuanto a las dimensiones básicas del desarrollo humano: una vida larga y saludable, los conocimientos y un nivel decente de vida. Por cuanto se trata de un índice compuesto, el IDH contiene las siguientes variables:

- Esperanza de vida al nacer (años)
- Tasa de alfabetización de adultos (%)
- Tasa bruta de matriculación combinada (%)
- PIB per cápita (dólares PPC)

El IDH es una aproximación al nivel de desarrollo que no considera las desigualdades entre hombres y mujeres, las cuales pueden diferir regionalmente. Para incorporar estas diferencias, en 1995 el PNUD propuso el Índice de Desarrollo relativo al Género (IDG) el cual mide el logro en las mismas dimensiones y con las mismas variables que el IDH, pero toma en cuenta la desigualdad de logro entre mujeres y hombres. Mientras mayor sea la disparidad de género en cuanto al desarrollo humano básico, menor es el IDG de un país en comparación con su IDH. El IDG es simplemente el IDH descontado, o ajustado en forma descendente, para tomar en cuenta la desigualdad de género.

- Esperanza de vida al nacer. Mujeres (años)
- Esperanza de vida al nacer. Hombres (años)
- Tasa de alfabetización de adultos (%)
- Tasa bruta de matriculación combinada (%)
- Estimación del ingreso obtenido (dólares PPC)

Por otra parte, el Índice de Potenciación de Género (IPG) mide la desigualdad de género en esferas clave de la participación económica

y política, y del acceso a espacios donde se da la adopción de decisiones. El IPG, se centra en las oportunidades de las mujeres en las esferas económica y política, se diferencia de esta manera del IDG, un indicador de la desigualdad de género en cuanto a capacidades básicas.

En la determinación de este índice se evalúan tres dimensiones; con las variables con que se miden:

- Participación política y poder para tomar decisiones. Porcentaje de hombres y mujeres que ocupan escaños parlamentarios.
- Poder sobre los recursos económicos. Ingreso estimado proveniente del trabajo femenino e ingreso estimado proveniente del trabajo masculino.
- Participación económica y poder para tomar decisiones. Porcentaje de mujeres y hombres en cargos de legisladores, altos funcionarios y directivos.
- Porcentaje de mujeres y hombres en puestos profesionales y técnicos.
- Poder sobre los recursos económicos. Ingreso estimado proveniente del trabajo femenino e ingreso estimado proveniente del trabajo masculino.

En el Golfo de México, se ha empleado de manera general el Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) o Índice de Susceptibilidad (Gornitz *et al.*, 1994), construido específicamente con variables físicas de la costa. Determinándose a partir de los mismos, áreas amenazadas o en peligro, identificadas como zonas más o menos vulnerables. Debe señalarse que la principal limitación del IVC es que no considera los aspectos poblacionales, organización social, economía, valores culturales, ni considera los efectos ecológicos, sino que el elemento vulnerable ante un posible ascenso

del nivel mar tal como lo utiliza Gornitz *et al.* (1994), lo constituye la costa de estudio. El objetivo del cálculo del IVC es la obtención de un índice que refleje la real vulnerabilidad y que ésta no sea valorada con exageración por un inadecuado balance de las variables involucradas. Asimismo, indica los posibles cambios de la costa debido al futuro aumento del nivel mar. La realización de un mapa puede servir de base para desarrollar un inventario de variables más completo que pueden influenciar el IVC.

Díaz *et al.* (2008), aplican el IVC en el Golfo de California asociado al incremento del nivel del mar, registrando que la región del Alto Golfo se puede considerar altamente vulnerable, mientras que la región de Mazatlán resulta vulnerable. La superficie menor a 10 m de altura sobre el nivel del mar en el Alto California comprende 478 378.67 has, debido a que se trata de una región muy baja, con una gran amplitud de marea, con un uso de suelo de tipo urbano muy bajo en esta región. Mientras que la región de Mazatlán comprende una superficie de 31 647.78 has de superficie menor a 10 metros sobre el nivel del mar.

Sánchez-Gil *et al.* (2004) emplean algunos indicadores basados en características ambientales y socioeconómicas del área costera del Golfo de México, fundamentados en experiencias previas en los Estados Unidos de Norteamérica. Los indicadores empleados comprenden: población costera, valores de volúmenes de producción pesquera y agrícola, volúmenes de la producción petrolera e infraestructura turística.

Chang (2005) registra que los eventos naturales son ineludibles, pero la ocupación desordenada del territorio, los transforma

en verdaderas catástrofes, afectando con mayor intensidad a los grupos que se sitúan por debajo de la línea de pobreza, asentamientos humanos desordenados, con viviendas precarias localizadas dentro de zonas de riesgo y peligros. Con respecto a los desastres naturales, García (2007) señala críticamente que la terminología que se sigue empleando en la actualidad, insiste en designar a la naturaleza como responsable directo.

Chang (2005) anota que un Sistema de Indicadores de Vulnerabilidad y Desastres, es un sistema enfocado hacia la respuesta / prevención a los desastres. El interés es el de concentrarse en la etapa previa de los eventos y los indicadores seleccionados tienen que ser de utilidad clara, de manera que los tomadores de decisiones y la sociedad civil en su conjunto se alerte ante la lectura simple y la fácil comprensión que debe extraerse de los indicadores. En América Latina se han utilizado indicadores de vulnerabilidad y desastres empleando, para su cálculo, la Tecnología Devinfo V4.0, la realización de esta metodología está basada en la revisión de fuentes secundaria a escala nacional. Los indicadores son evaluados en dos fases: la primera fase es de orden cualitativo, seleccionándose con base a si cumplen con el objetivo de investigación, enfoque de los organismos regionales y de los investigadores. Si los indicadores identificados responden al enfoque, son extraídos y luego sometidos a una segunda evaluación, la cual resulta cuantitativa. La evaluación cuantitativa se aplica empleando los criterios derivados del Marco Causal (Estado, Presión, Respuesta); los criterios empleados para escoger los indicadores comprenden los siguientes aspectos: validez científica, representatividad, Sensibilidad a cambios, Fiabilidad de los da-

tos, relevancia, predictivo, metas, comparable, cobertura geográfica, y costo-beneficio. Para transformar los criterios de evaluación en instrumentos de ponderación cuantitativa, a cada criterio se le asignó una escala numérica que va de 0 hasta 3. Los indicadores se ordenan de acuerdo al formato del Programa Devininfo. Es decir, se ordenan en sectores y estos a su vez en clases. Incorporándose como un valor agregado el Marco Causal, para los indicadores de vulnerabilidad. Este Marco está basado en la causalidad y supone que los niveles de pobreza, degradación socioambiental, carencia de planificación y ordenación del territorio y, en su conjunto, las actividades generan desastres naturales o antrópicos o bien los agudizan. Estos ejercen una presión sobre las dimensiones socioambiental/socioeconómica. Presiones que provocan cambios de estado y ante los desastres la sociedad ofrece respuesta.

El sistema de indicadores ha sido organizado de la siguiente manera:

SECTOR: Generales¹

Clase: Perfil país

Indicadores

- (E) Esperanza de vida al nacer
- (E) Población total
- (E) Porcentaje población urbana
- (E) Superficie total
- (E) Tasa de mortalidad infantil
- (E) Índice de Vulnerabilidad

SECTOR: Vulnerabilidad y Desastres

Clase: Ambientales

Indicadores:

- (P) Emisiones de CO₂
- (P) Proporción de la superficie de tierras cubiertas por bosques
- (R) Relación entre zonas protegidas para mantener la diversidad biológica

Clase: Desastres

Indicadores:

- (P) Personas afectadas por actividad volcánica
- (P) Porcentaje de población expuesta a ciclones tropicales
- (P) Porcentaje de población expuesta a terremotos
- (P) Promedio de sismos mayores o iguales a 5.5 en la escala de Richter

Clase: Resilencia

Indicadores:

- (R) Coeficiente de GINI
- (R) Gasto Social
- (R) Huella Ecológica
- (R) Índice de Desarrollo Humano
- (R) Número de receptores de radio por mil habitantes
- (R) Percepción de Corrupción

Clase Salud:

Indicadores:

- (P) Porcentaje de población por debajo del nivel mínimo de consumo de energía alimentaría
- (P) Tasa de mortalidad por homicidio por cada 100 000 habitantes
- (R) Porcentaje de población con acceso a servicios de agua potable
- (R) Porcentaje de población con acceso a servicios de eliminación de excreta

¹ Se anticipa a cada indicador las letras E, P o R, a fin de clasificarlas y corresponde a Indicadores de Presión, Estado o Respuesta.

- (R) Porcentaje de población con acceso a servicios de salud
- (R) Porcentaje de población rural con acceso a servicios de eliminación de excretas.
- (R) Porcentaje de población urbana con acceso a servicios de eliminación de excretas.
- (R) Porcentaje de población rural con acceso a servicios de agua potable
- (R) Porcentaje de población urbana con acceso a servicios de agua potable

Clase: Socioeconómicas

Indicadores

- (P) Porcentaje de la población en situación de indigencia
- (P) Producto interno bruto por capita
- (R) Tasa de alfabetización de adultos

Desde nuestra perspectiva, el Índice propuesto por Chang (2005) registra limitaciones, al emplear una escala basada preferentemente en promedios; y omite aspectos fundamentales para entender la vulnerabilidad, al no considerar la equidad de género (indicadores de potenciación de género), el capital social (redes de información y movilidad), la sustentabilidad de los sistemas productivos y la calidad de los sistemas de alerta.

En México el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), ha desarrollado una serie de investigaciones para la estimación de la pobreza, a nivel estatal y municipal, empleando un procedimiento econométrico que permite combinar la información de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH), donde se detallan los ingresos de las familias, con la información censal del II Conteo de Población y Vivienda, 2005.

Con fundamento en la metodología para la medición de la pobreza por ingresos, se definen tres niveles de pobreza.

- 1) La pobreza alimentaria: incapacidad para obtener una canasta básica alimentaria, aun si se hiciera uso de todo el ingreso disponible en el hogar para comprar sólo dicha canasta.
- 2) La pobreza de capacidades: insuficiencia del ingreso disponible para adquirir el valor de la canasta alimentaria y efectuar los gastos necesarios en salud y educación, aun dedicando el ingreso total de los hogares nada más que para estos fines.
- 3) La pobreza de patrimonio: insuficiencia para adquirir la canasta alimentaria, así como realizar los gastos necesarios en salud, vestido, vivienda, transporte y educación, aunque la totalidad del ingreso del hogar fuera utilizada exclusivamente para la adquisición de estos bienes y servicios.

Para la construcción del Índice de Rezago Social se consideraron los siguientes indicadores.

Educativos:

- Porcentaje de la población de 15 años y más analfabeta.
- Porcentaje de la población de 6 a 14 años que no asisten a la escuela.
- Porcentaje de los hogares con población de 15 a 29 años, con algún habitante con menos de 9 años de educación aprobados (este indicador de rezago educativo, se empleó para los niveles estatal y municipal).
- Porcentaje de la población de 15 años o más con educación básica incompleta

(este indicador se empleó como indicador de rezago educativo en los niveles de localidad).

Calidad y espacios en la vivienda:

- Porcentaje de las viviendas particulares habitadas con piso de tierra.
- Promedio de ocupantes por cuarto.

Servicios básicos en la vivienda:

- Porcentaje de las viviendas particulares habitadas que no disponen de excusado o sanitario.
- Porcentaje de las viviendas particulares habitadas que no disponen de agua entubada de la red pública.
- Porcentaje de las viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje.
- Porcentaje de las viviendas particulares habitadas que no disponen de energía eléctrica.

Activos en el hogar:

- Porcentaje de las viviendas particulares habitadas que no disponen de lavadora.

- Porcentaje de las viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigeradores.

El Índice de Rezago Social se construye como una suma ponderada de los diferentes indicadores. En su construcción se utilizan como ponderadores los coeficientes de la primera componente, estandarizado de manera tal que la media sea cero y su varianza unitaria. Por otra parte, el Índice de Rezago Social, por la forma de su construcción, cumple con el propósito de ordenar las diferentes unidades de observación (localidades, municipios y estados); éstas se estratificaron en cinco categorías, de tal forma que dentro de cada categoría las unidades fueran lo más homogéneas posible y entre los estratos lo más distintos posibles. Construyéndose cinco estratos que son: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto rezago social, que dan la idea de grupos de localidades, municipios y estados que van de aquellos que muestran un menor a una mayor carencia en los indicadores que conforman el Índice (CONEVAL, 2007a, b, c).

MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual fue estructurado con los conceptos de Desarrollo Humano y Capital Social para explicar la vulnerabilidad de las poblaciones humanas ante los eventos extremos del cambio climático. El PNUD (2005), define al desarrollo humano desde una perspectiva multidimensional como:

“La libertad de las personas para llevar la vida que consideren valiosa es indicativa del desarrollo de una sociedad. Un individuo es libre según lo significa-

tivas que le sean sus opciones de vida y el número de opciones para escoger. La libertad cobra forma si existen los medios para plantearse propósitos propios y actuar en consecuencia. Si los individuos de una sociedad pueden evitar el hambre o ser víctimas de enfermedades, y si son capaces de mantener una vitalidad biológica que les permita ejercer sus facultades físicas e intelectuales, tienen bases para ser libres. Sin embargo, la li-

bertad también involucra la existencia de oportunidades para que las personas puedan reflexionar sobre su condición, plantearse planes de vida y llevarlos a cabo. Asimismo, involucra las posibilidades que tienen los individuos para definir sus convicciones, transmitir sus valores, cooperar con otros, integrarse a la vida de su comunidad, participar políticamente y contribuir a definir los derechos e instituciones con los que han de vivir. A un mayor potencial para llevar una vida plena corresponde un mayor nivel de desarrollo humano”.

Rodríguez (2006) considera que un desastre constituye una ruptura en la estabilidad y la seguridad de un grupo, es decir, de las condiciones que hacen posible el desarrollo humano.

- La primera premisa establece que un desastre equivale a una línea de negatividad que resta a todos los individuos dimensiones del desarrollo humano.

Un desastre ataca las bases del desarrollo: debido a que puede incidir negativamente en la salud y en la seguridad (destruyendo los soportes de la esperanza de vida); puede deteriorar severamente el tiempo y el espacio en el que se despliega la formación de los recursos humanos (pérdida de recursos humanos, pérdida de horas clase, pérdida de establecimientos, etc.); un desastre puede destruir condiciones de producción (vías de comunicación, infraestructura, dispositivos que conducen energía, agua, instalaciones productivas, recursos naturales).

- La segunda premisa establece que el desarrollo humano postula la posibilidad de que los individuos cuenten con las capacidades para enfrentar, en condi-

ciones de autonomía, los siguientes desafíos: conservar la integridad física y espiritual de las personas (la salud), apropiarse y diversificar los sentidos y los significados del mundo (cultura), aprovechar las oportunidades de generación de riqueza (producción de bienes de consumo y de producción).

El análisis de estos tres desafíos pone de relieve la importancia de la organización social, de las instituciones de cooperación y participación. A través de las instituciones y redes que permiten la asociación y la solidaridad, pueden ser superados los retos que plantea la vida social de manera perdurable, equitativa e inclusiva.

- La tercera premisa anota que las políticas de desarrollo deben incluir la reducción del riesgo de desastre en el planteamiento de su planificación social, considerando que al hacerlo protegen los logros en materia de desarrollo y evitan que se generen otros tipos de amenazas para la población a corto, mediano y largo plazo.

Reducir los riesgos y promover la sostenibilidad contribuye a mitigar la pobreza, promueve la participación de los grupos sociales marginados y suscita equidad entre los géneros. Dicha equidad permitirá a los agentes sociales de todos los estratos sociales acceder a las mismas oportunidades de elevar su nivel de vida en todos los sectores de atención.

- La cuarta premisa propone que el Capital Social puede ser considerado como el principal recurso no sólo para enfrentar desafíos del desarrollo, sino también de la vulnerabilidad por el cambio climático.

Bagnasco *et al.* (2003) apuntan que el concepto de Capital Social no se usa de un modo unívoco ni con precisión. En algunos casos se hace referencia a él como sinónimo de capacidad de cooperación, de confianza, conciencia cívica, algo parecido a una forma de cultura local; otras veces se alude a él como indicador sintético de economías externas ricas, inmateriales o materiales. En algunas otras ocasiones se hace referencia a la red de relaciones que liga a sujetos individuales y colectivos, y que pueden alimentar la cooperación y la confianza, así como la producción de economías externas.

En la perspectiva de comprender el papel que juega el Capital Social en el proceso de responder y prevenir un desastre, Rodríguez (2006) registra que puede aceptarse que el Capital Social es el conjunto de relaciones sociales de las que en un momento determinado dispone un sujeto individual o un sujeto colectivo. Siendo a través de este conjunto de relaciones, que se vuelven disponibles los recursos cognitivos, como la información, o normativos, como la confianza, que permiten a los actores realizar objetivos que de otro modo no serían alcanzables, o lo serían pero con costos más altos. Desplazándonos del nivel individual al colectivo, se podrá decir que un determinado contexto territorial resulta más o menos rico en Capital Social, si los sujetos individuales o colectivos que residen allí estén implicados en redes relationales más o menos difundidas (Bagnasco *et al.*, 2003).

Los estudios sociales han mostrado que las repercusiones de una amenaza natural dependen no sólo de la resistencia física de las estructuras de comunicación, de producción o de vivienda, sino también de la capacidad de las personas para desarraigarse de ciertos

valores o creencias que los mantienen en ese espacio físico, aunque sea zona de peligro. Actualmente se ha demostrado que el riesgo de desastres se acumula históricamente por la realización de prácticas desacertadas, asumidas y tomadas por las personas que tienen el control y la decisión sobre diversas dimensiones del desarrollo social de los centros poblacionales. Y en las cuales prevalece el interés económico y personal más que el encauzado al desarrollo sostenible.

Un aspecto importante que el análisis social ha de detectar tiene que ver con el grado de organización social, la presencia de instituciones que sean respetadas y reconocidas por la población, la fuerza de las regulaciones y ordenamientos, el nivel de participación de la ciudadanía en actividades sociales e institucionales. Donde una sociedad cuenta con lazos y recursos de información, confianza y solidaridad, la respuesta social a los fenómenos de cambio climático puede ser más exitosa. Si hay un débil desarrollo del Capital Social, eso indica que los grupos humanos no poseen redes de apoyo, hábitos de trabajo colectivo, sistemas de información y experiencias de solidaridad y socorro mutuo. La presencia de estructuras de cooperación puede favorecer la construcción de espacios sociales de participación, puentes de comunicación dentro de la comunidad y hacia fuera de ella, formas de mediar entre las familias, los espacios públicos y las instancias del poder político local y supralocal. Estas estructuras de cooperación constituyen un recurso importante en situaciones como las que puede generar el cambio climático, debido a que ante posibles rupturas súbitas de las áreas de comunicación y transporte o el quebranto de espacios productivos, distributivos o de las infraestructuras de salud

y educación, la sociedad ha de implementar mecanismos de autoayuda. Estos son tanto más exitosos si se cuenta con trayectorias, experiencias, procedimientos probados, de cooperación, reciprocidad y confianza entre los miembros de la sociedad local.

Las aplicaciones de los Conceptos de Desarrollo Humano y Capital Social en México han sido recientemente efectuadas y entre las mayores contribuciones registramos las siguientes.

Esquivel *et al.* (2003), anotan que no existe un análisis de largo plazo de los indicadores de desarrollo humano a nivel nacional y por regiones que puedan verificar las tendencias e iniciar algunas acciones de políticas sociales.

En otro escenario, Ostrom y Ahn (2003), citados por Natal y Sandoval (2004), abordan el tema de Capital Social en relación a la acción colectiva. Estos autores tratan el concepto en relación a los problemas de la acción colectiva en grupos de pescadores y otros en lucha por el recurso del agua. Subrayan la importancia del Capital Social en la solución de problemas de acción colectiva y señalan que las normas compartidas, y los patrones de comportamiento que los propietarios desarrollan con el tiempo, son formas de Capital Social con las cuales pueden construir arreglos institucionales para resolver dilemas relacionados con el recurso de un acervo común.

López y de la Torre (2004) en su investigación sobre la estimación del nivel y los determinantes socioeconómicos del Capital Social en México, concluyen que esta forma de capital ha venido disminuyendo desde 1998; que mientras el Desarrollo Humano presentaba una tendencia creciente el Capital Social iba en descenso a partir de 1999; que el Capital Social es fundamental para salir de la pobre-

za y que su oferta primero disminuye con la edad y luego aumenta con ésta; que su oferta aumenta con la escolaridad, con la menor movilidad física y con el tamaño de su localidad pero se reduce con el ingreso. El Capital Social es mayor en los estratos con menos ingresos en las zonas urbanas que en las rurales. Las mujeres presentan una mayor oferta de Capital Social que los hombres, los solteros menos que los casados y los propietarios de vivienda más que los que no la poseen.

El PNUD (2008) ha elaborado un Informe sobre Desarrollo Humano y Capital Social para Michoacán, México. El informe muestra por primera vez, con información reciente y metodológicamente sólida, el estado del Capital Social en la entidad, y evidencia los bajos niveles de confianza entre los ciudadanos, aunque, estima considerable la potencialidad de la acción colectiva para promover el desarrollo de la entidad en el ámbito local.

En las líneas que siguen a continuación, se propone explorar las dimensiones en las que una sociedad local puede colocarse en condiciones de vulnerabilidad. Sobre esta base, se lograrían precisar condiciones donde el riesgo es latente y predecible. “Dicha predecibilidad está determinada por la posibilidad de presencia de amenazas y la exposición a ellas en espacios definidos y vinculada con determinadas dimensiones de la vulnerabilidad” (García, 2004).

¿Qué factores han contribuido al crecimiento de la vulnerabilidad y la formación de contextos de fragilidad? Por un lado, observamos el proceso que ha permitido la localización de los asentamientos humanos en áreas que no son adecuadas para ello. La distribución de la población en el territorio de acuerdo a patrones que no respetan ordenamientos, es

en parte responsable de esta situación: grupos humanos colocados en lugares de riesgo (laderas, orillas de cuerpos de agua, zonas sísmicas, zonas de humedales o antiguos lechos de ríos, etc.). Por otro, observamos procesos de empobrecimiento de importantes segmentos de la población, utilización de sistemas de construcción de vivienda y de infraestructura que no respetan parámetros de seguridad, incumplimiento de normas institucionales y defectuosos sistemas de control y organizacionales, que impiden la configuración de barreras de protección frente a diversos eventos (amenazas) físico-naturales.

En su conjunto, ello plantea no sólo problemas para la seguridad de las poblaciones, sino también para formular modelos de prevención y manejo de los desastres. Al lado de las diferencias de percepción e interpretación del riesgo, se encuentran las diferencias de vulnerabilidad, que corresponden a diferentes experiencias del desastre y a diferentes interpretaciones del mismo. Frente a esta diversidad de situaciones, es preciso reconocer que ésta es reflejo de la desigualdad social y económica bajo la cual se distribuyen las oportunidades para prevenir (y manejar) el riesgo. Los grupos humanos acumulan ventajas y desventajas, y éstas se manifiestan de modo dramático ante eventos como los que ahora agrupamos bajo el término “cambio climático”.

Esto explica también las diferentes capacidades de respuesta o adaptación a las consecuencias de un evento. La capacidad adaptativa está íntimamente relacionada con el desarrollo social y económico, aunque se halla desigualmente distribuida tanto entre las sociedades como en el seno de éstas. Un tema importante a explorar consiste en determinar qué elementos limitan la aplicación y la efec-

tividad de las medidas de adaptación. La capacidad de adaptación responde a un proceso de aprendizaje y experimentación, y por tanto es dinámica. Depende en parte de la base productiva social, y descansa en la presencia de bienes de capital natural y artificial, las redes y prestaciones sociales, el capital humano (educación) y las instituciones, el sistema de gobierno, los ingresos a nivel nacional y local, la salud y la tecnología.

¿Cuáles son los observables para examinar la vulnerabilidad?

Fragilidad en los sistemas de alerta:

- Disposición de sistemas de comunicación
- Hábitos de información actualizada entre la población
- Accesibilidad de las poblaciones más vulnerables a los sistemas de información
- Acceso a recursos que permiten la seguridad frente a las amenazas (Acceso a servicio médico, acceso a albergues, acceso a transporte, acceso a áreas de refugio y atención, acceso a vías de comunicación, acceso a dispensarios o reservorios de medicinas, acceso a sistemas de primeros auxilios).

Fragilidad en las instancias institucionales:

- ¿Cómo medir el desempeño de autoridades?
- ¿Cómo medir su capacidad de gestión ante los problemas que plantea un desastre?
- ¿La autoridad local está capacitada, tiene una división del trabajo, posee una estrategia, un entrenamiento para hacer frente a un problema de esta índole (ocasionado por el ‘cambio climático’), posee buenos sistemas de educación?

Presencia de instancias de planeación:

- ¿Se cuenta con un plan de uso del suelo?
- ¿Se cuenta con un mapa que indique áreas de riesgo?
- ¿Se cuenta con sistemas que den seguridad en la tenencia de la tierra y los activos?

Grado de participación de la ciudadanía en procesos democráticos

- Participación de la población en procesos electorales recientes
- Presencia de mecanismo clientelares
- Presencia de mecanismos de corrupción
- Presencia de espacios para asuntos públicos (asambleas, foros, medios de comunicación dedicados a ventilar problemas colectivos).

Presencia de capital social:

- Redes de información, apoyo, solidaridad, movilidad, de acceso a la ayuda;
- Fragilidad en la organización social
- Presencia de diversos tipos de asociaciones y grado de convocatoria: Iglesias, cooperativas de producción, sindicatos, ligas agrarias, organizaciones vecinales, organizaciones políticas, asociaciones civiles, asociaciones deportivas, organizaciones no gubernamentales, organizaciones juveniles, redes de mujeres, grupos de crédito, etc.

Actividades que llevan a cabo la iglesia y las asociaciones civiles que trabajan con temas ambientales, de salud, de solidaridad, educación, género, derechos humanos.

Limitaciones en el campo educativo:

- Grado de escolaridad: diferencias de género

- Capacidad de interpretación de los procesos de riesgo (explicaciones que la misma gente puede ofrecer sobre la naturaleza de las amenazas)
- Cuentan las escuelas con algún programa que fomente la prevención?

Fragilidad en infraestructura:

- Posibilidades de movilidad (transporte), condiciones de tránsito de los caminos
- Disponibilidad de opciones técnicas para enfrentar el desastre (presas, diques, etc.)
- Manejo de bordes de ríos, cuencas, laderas, etc.
- Manejo de litoral, manglares, humedales, formas de construcción
- Disponibilidad y señalamiento de rutas de evacuación.

Fragilidad en vivienda:

- Sistemas constructivos
- Calidad de los materiales
- Reglas de urbanización
- Localización en zonas de riesgo

Fragilidad en el sistema productivo:

- Vulnerabilidad de las actividades productivas al riesgo
- Diferenciación de los sistemas productivos
- Impactos en la economía local (ingresos, ventas, capital fijo, inversiones, crédito)

Otras dimensiones de la vulnerabilidad:

Flexibilidad al cambio

- Posibilidades que presenta el sistema productivo para *transitar* hacia otros cultivos, hacia otros mercados, hacia otras tecnologías.
- Capacidad para *anticipar*, sobrevivir, resistir y *recuperarse* del impacto de

una amenaza (es decir, la capacidad de protegerse y *restablecer* sus medios de vida), flexibilidad de la comunidad.

Autonomía o autarquía en el metabolismo social

- ¿Grado de dependencia respecto de insumos externos?
- ¿Tipo de reservas (alimentos, energía, materias primas) constituidas?
- ¿Formas de abasto del consumo (alimentos) local?
- ¿Origen de las materias primas empleadas en la industria local?
- ¿Mecanismos de transporte o conexión con el mercado más próximo?

- ¿Formas de abasto de la energía consumida en el ámbito local?
- Activos de los que dispone el grupo doméstico y que puede vender para obtener alimentos, reconstruir su hogar o atender una enfermedad o lesión.

Algunos de los indicadores apuntados permitirían precisar situaciones de riesgo que pueden clasificarse por una escala temporal (duración y tipo de impacto) y una espacial (tipo de amenaza y área geográfica de vulnerabilidad).

METODOLOGÍA

DISEÑO METODOLÓGICO

La presente investigación se considera cuantitativa y comprendió el cálculo y la creación de un índice compuesto para determinar la vulnerabilidad de las poblaciones humanas de la zona costera del Golfo de México y Mar Caribe ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático.

En el presente estudio se incluyen territorios donde figuran, como rasgos de diferenciación, el peso de la población rural, el de la población indígena, y la diversidad de paisajes utilizados para desarrollar la industria petrolera y petroquímica, turística, camaronícola y las actividades portuarias. Dado el limitado tiempo disponible para realizar este estudio (apenas tres meses), se consideró que las zonas de estudio no fuesen demasiado extensas a fin de hacer factible una aproximación con métodos de investigación social de índole cualitativa.

La propuesta de los indicadores de vulnerabilidad socio-económica y demográfica está basada en Bozada (2004), Tudela (1989) y Rodríguez (2006). Se examinan las siguientes observables en las áreas de estudio:

Sociales

Los Indicadores del Desarrollo Humano expresan los logros y los rezagos que una sociedad tiene en tres áreas claves: la calidad de vida (salud), el capital humano (educación) y el desarrollo productivo (niveles de ingreso). Al examinar las estadísticas que al respecto el Gobierno Federal y las agencias internacionales han elaborado para nuestro país, es posible apreciar las grandes desigualdades que se han ido constituyendo entre las diversas entidades federativas y, al interior de éstas, entre las diferentes regiones y municipios que las componen. Adicionalmente se contempla la consideración a nivel Municipal y por locali-

dad del Índice de Rezago Social (CONEVAL, 2005^a, b, c), el cual constituye el referente de la política social para atender zonas vulnerables en México.

El Índice de Vulnerabilidad del Golfo de México, se integró considerando los índices de Rezago Social (CONEVAL, 2005), de Desarrollo Humano (PNUD, 2005), de Marginación (CONAPO, 2005). Tanto el Índice de Vulnerabilidad Social (Cutter *et al.*, 2003) como el índice de Vulnerabilidad (Chang, 2005) han destacado por haber sido desarrollados en el contexto de la discusión del cambio climático.

Económicos

Los datos que ofrecen los Censos de Población y Vivienda permiten construir indicadores sobre participación de la población económicamente activa, participación sectorial y categorías laborales. Asimismo, estos indicadores permiten establecer nociones más precisas, a nivel municipal, sobre escolaridad y género en la población trabajadora.

HIPÓTESIS

Las hipótesis que orientan la presente investigación se formulan a continuación:

- 1) Los mayores índices de vulnerabilidad social se encuentran asociados a los índices negativos de Desarrollo Humano

(o de rezago social, o de marginación) y a una escasa formación de Capital Social.

- 2) Si se identifican las localidades donde se registran los más altos índices de vulnerabilidad, se puede orientar la política social hacia las áreas críticas.

EL ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación comprende las regiones del Golfo de México con mayor grado potencial de vulnerabilidad hacia el cambio climático global (Carranza-Edwards *et al.*, 2004; Ortiz Pérez y Méndez Linares, 2003. Se consideran los municipios costeros de Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán (Golfo de México), y Quintana Roo (Caribe); con base al escenario del incremento de un metro en el nivel del mar basado en Weiss @ Overpeck de la Universidad de Arizona. Sin embargo, el proyecto “Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos”, coordinado por el Dr. Alfonso V. Botello del Instituto de Ciencias del Mar de la UNAM, considera escenarios de incremento del nivel del mar de 100 cm (ver figuras 1 a 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EL GOLFO DE MÉXICO Y EL MAR CARIBE: LA DIMENSIÓN SOCIOECONÓMICA ANTE LOS EVENTOS EXTREMOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

El Golfo de México es de los sistemas ambientales más diversos y ricos en la Tierra. Posee una superficie de $1.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ y es una unidad oceanográfica que forma parte de la región del Gran Caribe, considerada como la cuenca de agua protegida más grande del océano Atlántico que almacena cerca de $2.3 \times 10^6 \text{ km}^3$ de agua (Toledo, 2004; Zarate *et al.*, 2004).

Geohidrológicamente, el Golfo de México es una provincia distributiva integrada por un área sedimentaria del orden de $5.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ y por 159 890 km de ríos. El 36% del área total de la provincia es agua y el 64% restante son formaciones continentales. En total, 36 grandes ríos descargan un volumen global de alrededor de $1110 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ de agua dulce al Golfo, acarrean 775×10^6 toneladas de detritus y alrededor de 208×10^6 toneladas de materiales disueltos (Mondy, 1965), citado por Toledo (2004).

Toledo (2004) hace énfasis sobre el volumen de agua dulce descargada al Golfo de México por sus ríos: $866 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ corresponden



Figura 1. Escenario de incremento en el nivel del mar a un metro en la zona costera de Veracruz.
(Tomado en Weiss @ Overpeck de la Universidad de Arizona).



Figura 2. Escenario de incremento en el nivel del mar a un metro en la zona costera de Tabasco.
(Tomado en Weiss @ Overpeck de la Universidad de Arizona).



Figura 3. Escenario de incremento en el nivel del mar a un metro en la zona costera de Campeche.
(Tomado en Weiss @ Overpeck de la Universidad de Arizona).



Figura 4. Escenario de incremento en el nivel del mar a un metro en la zona costera de Quintana Roo. (Tomado en Weiss @ Overpeck de la Universidad de Arizona).

a las cuencas estadounidenses (sin considerar el río Bravo); $229 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ provienen de los ríos mexicanos; las descargas estimadas del río Bravo comprenden $12 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$. En otro escenario, este autor señala que entre los patrimonios naturales, el Golfo de México posee uno de los más ricos, extensos y productivos ecosistemas, no sólo del hemisferio occidental, sino de toda la tierra: sus humedales costeros. Registrándose en la actualidad que más de $14\,000 \text{ Km}^2$ bordean los estuarios y lagunas costeras del Golfo. Aproximadamente 476 841 ha son bosques de manglar y 954 500 ha son marismas herbáceas. Adicionalmente, más del 50% de los litorales del Golfo están constituidos por sistemas lagunares y estuarios con una superficie total de 678 609 ha.

El Golfo de México tiene una gran importancia ecológica debido a su diversidad

biológica y a la compleja red de servicios ambientales proporcionada por los ecosistemas oceánicos, costeros y fluviales. Al mismo tiempo, la industria pesquera, petrolera, de transporte marítimo y turística, registran todos un crecimiento, incrementando las presiones al sistema marino y costero.

Jiménez *et al.* (2004), efectuaron una aproximación para identificar la vocación costera del país, estableciendo el Índice Costero de Frente Litoral (I_{clf}), el cual se obtiene de dividir la longitud de la costa entre la extensión territorial de la región asociada, multiplicándola por 100. De esta manera, los valores de I_{clf} se muestran en la figura 5.

El estado de Quintana Roo registra la mayor vocación costera del Golfo de México; mientras que en los estados del Pacífico el valor del índice es aproximadamente igual. Por

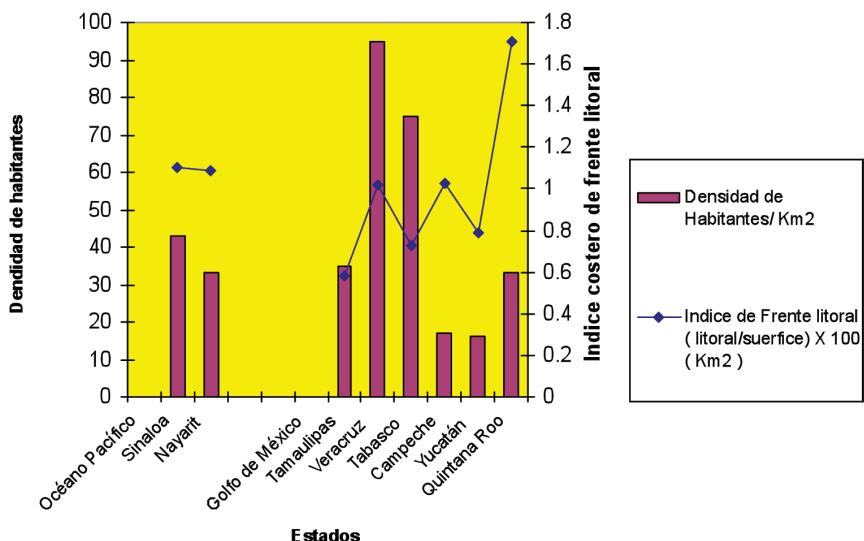


Figura 5. Densidad de habitantes e Índice Costero de Frente de Litoral de México.
Fuente: Jiménez, Salinas y Campos (2004).

otra parte, la densidad de habitantes por km² de los estados costeros del Golfo de México resulta en promedio 46.2 hab. /km², registrándose las mayores densidades en Veracruz y Tabasco respectivamente. Mientras que los valores intermedios (pero debajo del promedio) se anotan en Tamaulipas y Quintana Roo; anotándose que los menores valores corresponden a Campeche y Yucatán. Los estados del Pacífico muestran valores por debajo del promedio de 52 hab. /km²; registrándose una mayor densidad costera en Sinaloa con respecto a Nayarit.

El análisis de I_{clf} en relación con la densidad de población registrada en los estados costeros del Golfo, muestran un déficit costero; al soportar una mayor densidad de población con un índice de vocación costera en los estados de Veracruz y Tabasco.

El indicador costero de cobertura de vegetación natural, registra una condición crítica para Tabasco. Mientras que los estados con

mayor índice de cobertura vegetal natural resultan Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Mientras que los estados del Pacífico manifiestan un valor superior al valor nacional de cobertura natural de los estados costeros (figura 6).

El empleo de un indicador bosque-selva-agua presenta resultados interesantes (figura 7). A nivel nacional este indicador muestra que cada km² de cuerpos de agua es soportado por 58 km² de cobertura vegetal natural; para los estados costeros este indicador se elevó a 73 km². En los casos analizados, resulta crítico el de los estados de Tabasco y Tamaulipas. Por otro lado, los estados de Campeche, Yucatán, Quintana Roo soportan cada km² de cuerpos de agua con más de 100 km² de bosques y selvas (Jiménez *et al.*, 2004).

Los estados con mayor cobertura espacial de asentamientos humanos son Veracruz y Tamaulipas, con más de 550 km², mientras que la menor cobertura de asentamientos hu-

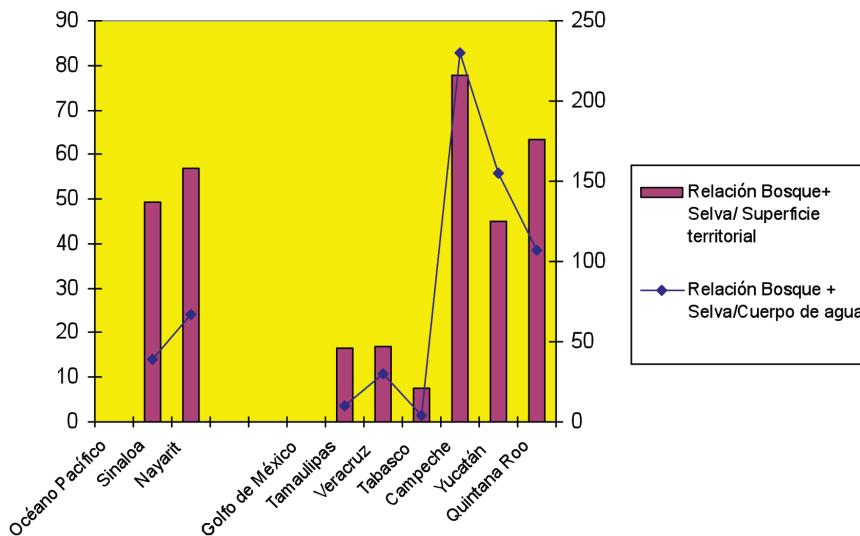


Figura 6. Relación bosque + selva + cuerpo de agua.

Fuente: Jiménez *et al.*(2004)

manos corresponde a Tabasco, Campeche y Nayarit, con valores menores a 200 km². El establecimiento de la carga de agua, bosque y selva que se dispone actualmente para sustentar los asentamientos humanos en las zonas costeras, identifica como crítico a los estados de Veracruz, Tamaulipas y Tabasco con valores de 17-20 km² de agua, bosque o selva por cada km² de asentamientos humanos; jerárquicamente le suceden los estados de Yucatán y Sinaloa. Asimismo, en el balance agua-bosque y soporte de asentamientos humanos, el estado de Campeche presenta la condición ambiental más favorable para sustentar el desarrollo costero (Jiménez *et al.*, 2004).

León y Rodríguez (2004) afirman que es hasta el último tercio del Siglo XIX, con el gobierno de Porfirio Díaz, que las costas recibieron inversiones importantes en infraestructura: las obras portuarias de Veracruz, Salina Cruz y Coatzacoalcos, así como el Ferrocarril Nacional de Tehuantepec. Durante

este periodo, la región se incorporó al mercado mundial; el Golfo y el Caribe adoptan cuatro procesos básicos de carácter económico que modelan la urbanización, los cuales están asociados a un conjunto de productos específicos: puertos, plantaciones, petróleo/petroquímica y turismo; omitiendo la pesca de camarón. Estos autores apuntan que a cada proceso le acompañaron diversas etapas de poblamiento y estilos de urbanización.

Carranza-Edwards *et al.* (2004), señalan que las regiones del Golfo de México con mayor grado de vulnerabilidad al cambio climático global, resultan los lugares donde la cota de 100 m (o de 200 m) se aleja más de la línea de costa. Con base al bajo grado de pendiente, se considera que la porción norte de la península de Yucatán y la región de influencia del delta del río Bravo son las zonas que requieren de mayor cuidado y planeación en el desarrollo de obras de infraestructura, dado lo bajo de su relieve.

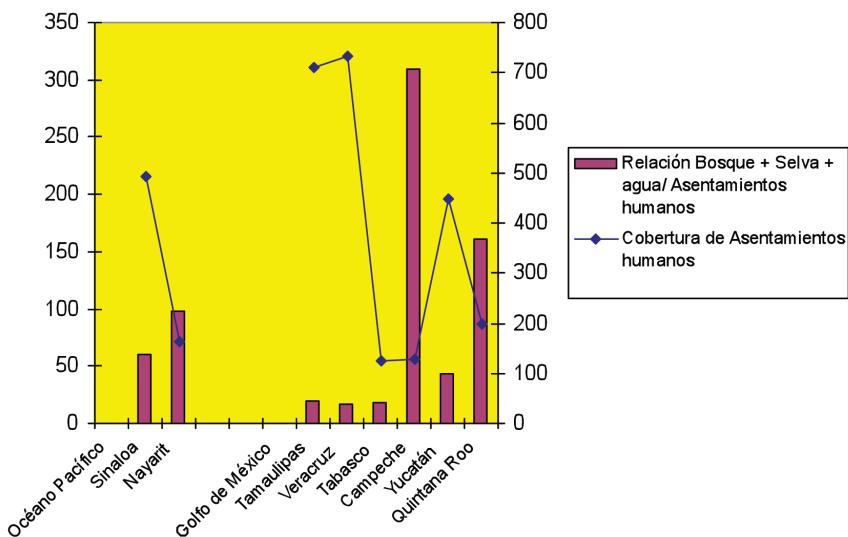


Figura 7. Relación bosque + selva + agua/asentamientos humanos.

Fuente: Jiménez *et al.* (2004)

Ortiz Pérez y Méndez Linares (2003) registran las regiones críticas o vulnerables al ascenso del nivel del mar en el Golfo de México. Tres se relacionan con las cuencas de los grandes sistemas deltaicos de los ríos Bravo o Grande, Papaloapan y el Complejo Deltaico del Grijalva-Usumacinta; registrando claras evidencias de hundimiento en la costa por subsidencia en las cuencas. Las dos áreas restantes comprenden Los Petenes, Campeche y Bahías de Sian Ka'an-Chetumal, localizadas en la península de Yucatán y corresponden a la plataforma calcárea con problemas estructurales de hundimiento asociadas con disolución cárstica y de comportamiento geohidrológico.

Las conclusiones del segundo Panel Internacional sobre Cambio Climático: La Zona Costera y su Impacto Ecológico, económico y Social (2008) anotan que el Golfo de México es el final del túnel de un embudo térmico que se inicia en el Atlántico Norte, incrementan-

do su potencial en el Mar Caribe y que arriba al Golfo con su máxima carga energética. Esto origina 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. Señalándose, asimismo, que la zona templada del Golfo de México se está reduciendo, mientras que la zona tropical avanza hasta el litoral norte del Golfo; donde la “tropicalización del Golfo de México” parece ser un mecanismo de adaptación ecosistémica de la zona costera al cambio climático; señalándose que la expansión latitudinal de los manglares constituye un buen indicador.

Carvajal (2007), utilizando información de la elevación del terreno de alta resolución, efectúa un estudio sobre las zonas costeras del

Golfo de México que se encuentran situadas debajo de los 6 msnm. Los resultados indican que los estados costeros del Golfo de México que resultarán más afectados por superficie inundada corresponden a Tabasco (6 184 km²), Quintana Roo (4 376 km²), Campeche (6 991 km²) y Yucatán (5 144 km²), Veracruz (5 034 km²) y Tamaulipas (4 266 km²), con la consecuente afectación a la población (figura 8).

Tejeda y Ochoa (2007) señalan dentro de Proyecto Plan de Acción Climática del estado Veracruz que se puede esperar lo siguiente: la mayor parte 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 ni-

vel 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. Evaluaciones gruesas predicen que 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.

La zona costera mexicana del Golfo de México y el Caribe tiene una longitud de 3.1 x 10³ km. y es compartida por los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo; la mayor longitud

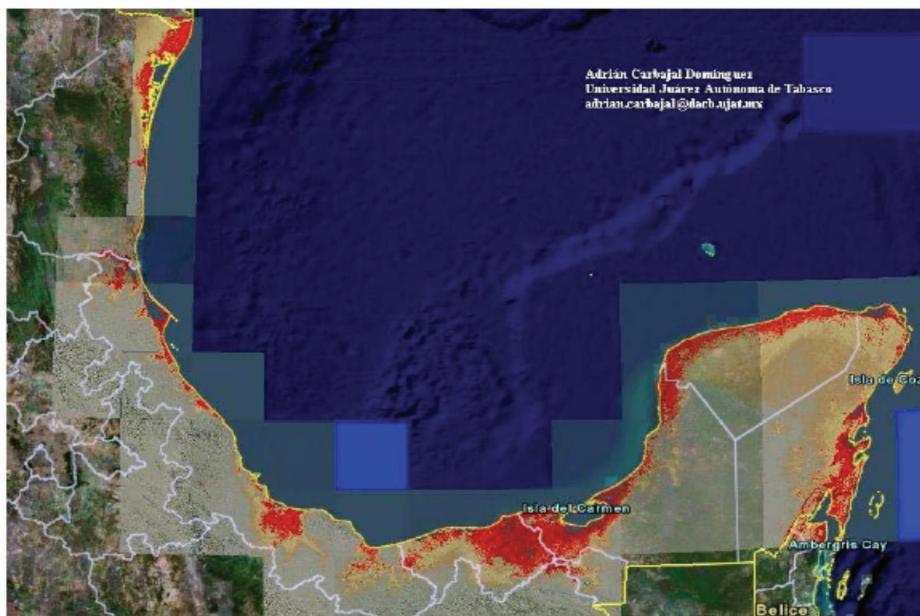


Figura 8. Mapa de la elevación de terreno correspondiente a la costa del Golfo de México. En rojo se muestran las zonas cuya elevación es igual o menor a 6 m; el azul corresponde al Golfo de México, las zonas de color café muestran una elevación entre 7 y 40 m. Las regiones en gris son las zonas con altura mayor a 40 m (Tomado de Carvajal, 2007).

del cordón litoral es ocupada por Quintana Roo (865.22 km), Veracruz (745.14 km), Campeche (523.3 km), Tamaulipas (457.72 km) y Tabasco (183.86 km) respectivamente. Jerárquicamente los estados del Golfo con mayor superficie territorial se ordenan de la manera siguiente: Tamaulipas (79 384 km²), Veracruz (72 815 km²), Campeche (50 812 km²), Quintana Roo (50 483 km²), Yucatán (43 379 km²) y Tabasco (25 267 km²).

Como una aproximación general al comportamiento demográfico del Golfo de México se construye la figura 9, que exhibe la evolución del crecimiento poblacional de los estados costeros, durante el periodo de 1930 al 2005. Una primera anotación sobre la dinámica poblacional del Golfo de México, la constituye el registro de una población total de 15 834 200 habitantes en el periodo 2000-2005 (INEGI, 2005); donde el estado de Veracruz concentra 7 110 000 (44.90 %) de personas. La composición de género anota una población del 51.11 % del género femenino y 48.89 % del masculino, es decir se registra un mayor número de personas del género femenino, situación posiblemente explicable por el saldo migratorio registrado.

La representación gráfica muestra claramente que la población de Veracruz ha registrado un crecimiento poblacional acelerado desde 1930, infiriéndose una tendencia a la estabilización en el último lustro (2000-2005).

La situación demográfica de los restantes estados del Golfo en el periodo de 1930 a 2005, se caracteriza por un bajo crecimiento poblacional. Resulta interesante el hecho de que los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche, los estados petroleros del Golfo, muestran patrones muy diferentes de crecimiento poblacional (figura 9).

Los estados costeros del Golfo de México con mayores tasas de crecimiento demográfico en 2000-2005 son Quintana Roo (3.4%), Tamaulipas (1.7%), Campeche y Yucatán con 1.6%; Tabasco (0.9 %) y Veracruz (0.5 %). En este periodo, se identifica la tasa de crecimiento más baja para el estado de Veracruz y Tabasco; explicándose este valor en la migración internacional que exhiben ambos estados. Asimismo, se observa que continúan con el proceso de urbanización experimentado en décadas anteriores y se anota que el 70.0% de la población reside en localidades urbanas. Por otra parte, los estados del Golfo de México exhiben un porcentaje de población que habla lengua indígena y no habla español equivalente al 5.49%, concentrándose la mayor población en el estado de Yucatán.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SOCIAL

Diversos autores muestran que aunque se ha dedicado bastante atención a los componentes de la vulnerabilidad biofísica y a la vulnerabilidad del ambiente construido (Mileti, 1999), actualmente sabemos poco sobre los aspectos de la vulnerabilidad social.

Las vulnerabilidades creadas socialmente han sido ampliamente ignoradas, principalmente a causa de la dificultad de cuantificarlas, y esto explica por qué las pérdidas sociales están normalmente ausentes en los reportes que estiman los costos/pérdidas después del desastre.

En su lugar, la vulnerabilidad social es con frecuencia descrita usando características individuales de la población (edad, etnia, salud, ingreso, tipo de vivienda, empleo). La vulne-

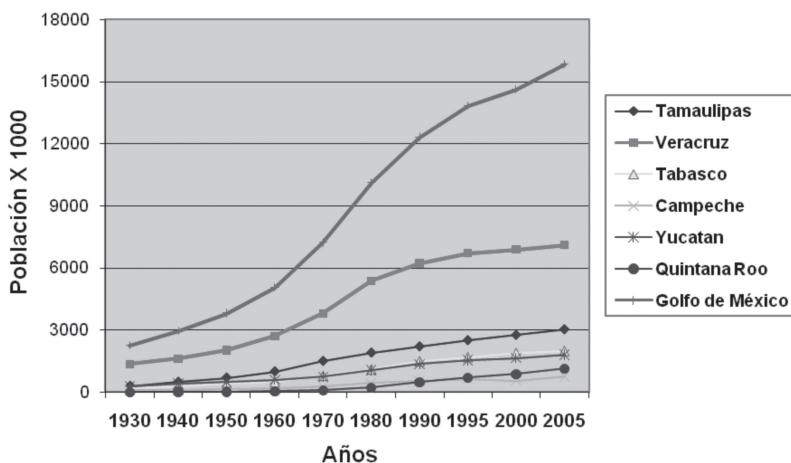


Figura 9. Evolución de la población de los estados costeros del Golfo de México.

Fuente: INEGI (2006). II Conteo de Población y Vivienda 2005

rabilidad social es parcialmente producto de las inequidades sociales (esos factores sociales que influyen o modelan la susceptibilidad de varios grupos al daño y que también determinan su capacidad para responder). Sin embargo, también incluye a las desigualdades del lugar (esas características de las comunidades y del ambiente construido, tales como el nivel de urbanización, las tasas de crecimiento, la vitalidad económica, que contribuyen a la vulnerabilidad social de los lugares). ¿Se ha comparado la vulnerabilidad de un lugar respecto de otro? Las variables consideradas, ¿permiten explicar las diferencias en pérdidas económicas ocasionadas por meteoros climáticos?

Cutter *et al.* (2003) han construido un modelo de vulnerabilidad para examinar los componentes de la vulnerabilidad social. En su conceptualización, el riesgo (una medida objetiva de la probabilidad de experimentar un evento peligroso) interactúa con la mitigación (medidas para atenuar riesgos o reducir su impacto) para producir el peligro poten-

cial. El peligro potencial es tanto moderado o acentuado por un filtro geográfico (ubicación y situación del lugar, proximidad) como por la producción social del lugar. La producción social incluye la experiencia del peligro que tiene la comunidad, la habilidad de la comunidad para responder a él, para hacer frente a él, para recuperarse de él, para adaptarse a los peligros, lo cual a su vez está influido por características económicas, demográficas y habitacionales. Las vulnerabilidades sociales y biofísicas interactúan para producir la vulnerabilidad de conjunto del lugar.

A continuación la figura 10, muestra una propuesta para cuantificar la vulnerabilidad social a partir de la construcción de un índice de vulnerabilidad con base en la información estadística disponible.

El índice se construyó a partir de la consideración de las siguientes once variables.

- 1) Producto interno per cápita ajustado a dólares (PIBPDA)

- 2) % Población femenina que participa en la Población económicamente activa (KPEA-MUJERES)
- 3) % Población mayor de 15 años alfabetizada (K15ALFA)
- 4) % Población femenina mayor a los 15 años alfabetizada (TAA MUJERES)
- 5) % Población bajo pobreza alimentaria (PALIME)
- 6) Índice de supervivencia infantil (INDISOBR)
- 7) % Hogares con acceso a servicio de salud (K-SDS)
- 8) Hogares que tienen TV dividido por población total (TV per cápita)
- 9) Hogares que no cuentan con agua potable (K VP NAE)
- 10) Localidades rurales dentro del municipio (LOCRUC)

11) Grado de acceso a infraestructuras de comunicación (GACP)

El análisis del índice permitió detectar diversos niveles de vulnerabilidad. Se constituyeron cinco grupos o categorías de municipios considerando la magnitud de la vulnerabilidad. Los rasgos o atributos sociales y económicos de cada grupo figuran a continuación.

Grupo 1: Muy Baja Vulnerabilidad (zonas metropolitanas)

El grupo 1 contiene 16 municipios y abarca a una población de 4, 286,765 personas. Registra los mejores indicadores en relación a acceso a vías de comunicación, tasa de alfabetización femenina, PIB per cápita, acceso a servicios de salud. Este grupo está compuesto por los municipios donde se asientan las prin-

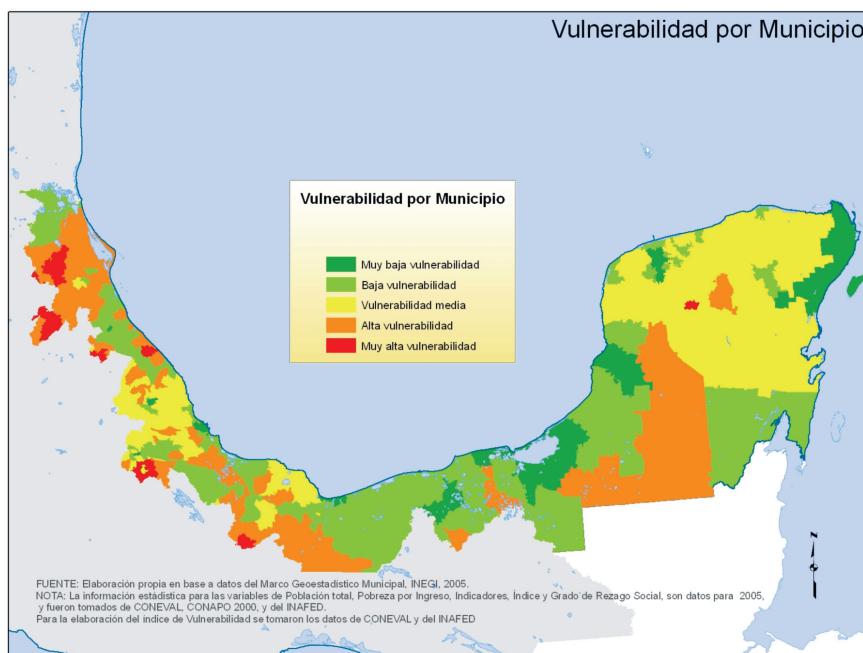


Figura 10. Mapa del Índice Vulnerabilidad Social por municipio.

cipales ciudades del Golfo de México (tabla 1). Los municipios que figuran en este ámbito son: Isla Mujeres, Poza Rica, Coatzacoalcos, Río Blanco, Centro, Nanchital, Solidaridad, Mérida, Orizaba, Xalapa, Carmen, Veracruz, Campeche, Cozumel, Benito Juárez, Boca del Río.

Grupo 2: Baja Vulnerabilidad (periferias urbanas y pequeñas ciudades)

Este grupo muestra también buenos indicadores en relación a grado de alfabetización (al menos el 75%, y en el caso de las mujeres el 73.3%). El PIB per capita en promedio es un 50% más bajo que en el primer grupo; los hogares que no tienen acceso al agua potable o a servicios de salud son más numerosos respecto del primer grupo. La participación de la mujer en la población económicamente activa posee porcentajes un poco inferiores al primer grupo. Y aun cuando cuentan con buen acceso a los sistemas de comunicación,

en promedio un 10% no está bien comunicado (tabla 2).

El grupo 2 contiene 81 municipios y alberga a una población de 4 524 308 personas. Entre los municipios que figuran en este grupo se encuentran los siguientes: Banderilla, Fortín, Ursulo Galván, La Antigua, Córdoba, Progreso, Río Lagartos, Teapa, Nacajuca, Jáltipan, Motul, Celestún, Valladolid, Macuspana, Tlacotalpan, Tenabo.

Grupo 3: Vulnerabilidad Media (rurales)

El grupo 3 contiene a 168 municipios. Se trata de municipios donde se registran importantes contrastes, pues si tomamos en cuenta algunos indicadores puede advertirse que se presentan rezagos importantes. Es el caso, por ejemplo, del grado de alfabetización de la población femenina: mientras que en el grupo dos el nivel más bajo de alfabetización llegaba al 73%, en este grupo tres hay municipios con 38% de alfabetización; lo mismo ocurre con el

Tabla 1. Indicadores estadísticos del Grupo 1.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
K15_ALFA	16	91.8	95.8	94.363	1.2344
PIB_PDA	16	5756	21 892	10 920.06	4 567.510
LOCRUR	16	0	27	7.38	7.753
PALIME	16	1.6	13.9	8.013	3.3793
K_VP_NAE	16	1.22	22.08	6.6688	5.79281
K_SDS	16	23.50	49.00	36.1038	6.04239
INDISOBR	16	89	96	93.69	1.852
TV per capita	16	17.4	26.4	23.663	2.6674
TAA_mujeres	16	88.82	94.35	92.6337	1.63644
K_PEA_mujeres	16	26.12	41.84	34.2884	4.62795
GACP (%)	16	93.56	100.00	98.8044	1.95412
Valid N (listwise)	16				

indicador de sobrevivencia infantil: mientras que en el grupo dos el registro mínimo era de 81, en el grupo tres alcanza el 66. La pobreza alimentaria afecta a mayores porcentajes de población (casi el 33%) en comparación con el grupo dos (23%). El PIB per capita también es notablemente más bajo en este grupo (casi la mitad respecto al grupo dos) (tabla 3).

Grupo 4: Alta Vulnerabilidad (pequeños municipios)

El grupo 4 contiene 66 municipios. Se observa menos contrastes que en el grupo anterior, es decir, es un grupo más homogéneo. La pobreza alimentaria afecta en promedio al 40% de los hogares. Se observa diversos indicadores semejantes al grupo tres. Lo que lo distingue es la mayor incidencia del aislamiento, lo cual está asociado a que son en su mayor parte municipios rurales. Por ello mismo, se caracterizan por un menor acceso a los servicios de agua potable y drenaje (tabla 4).

Grupo 5: Muy Alta Vulnerabilidad (pobreza extrema y aislamiento)

A este grupo pertenecen 23 municipios. Figuran los más altos índices de rezago educativo: el 50% de la población no está alfabetizada; y en el caso de la población femenina el rezago es aun mayor. La pobreza alimentaria alcanza al 60% de la población. El índice de sobrevivencia infantil es por tanto menor. El acceso a los servicios de salud también es bajo. Todo ello se encuentra fuertemente asociado al hecho de que la población no cuenta con buenos ingresos (el PIB per capita en promedio apenas llega a 1 380 dólares al año) (tabla 5).

En este grupo se ubican municipios situados sobre todo en áreas con topografía difícil, lo cual hace que se presenten agudos problemas de comunicación, como es el caso de aquellos que se encuentran en las zonas serranas del estado de Veracruz: Tlaquilpa, Astacinga, Chumatlán, Tequila, Chiconamel, Zongolica, Tantoyuca, Tehuipango, Filomeno Mata.

Tabla 2. Indicadores estadísticos del Grupo 2.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
K15_ALFA	81	75.6	94.5	87.251	3.7608
PIB_PDA	81	2392	10851	4707.86	1545.088
LOCRUR	81	0	100	43.06	24.801
PALIME	81	6.5	44.6	23.257	8.2831
K_VP_NAE	81	2.97	82.77	25.5657	18.11449
K_SDS	81	8.80	88.92	46.7073	13.51523
INDISOBR	81	81	94	87.69	2.935
TV per capita	81	16.1	28.3	21.937	2.3899
TAA_mujeres	81	73.28	93.58	84.6280	4.34676
K_PEA_mujeres	81	15.91	37.13	26.1769	4.87623
GACP (%)	81	62.38	100.00	89.3732	10.60970
Valid N (listwise)	81				

Tabla 3. Indicadores estadísticos del Grupo 3.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
CK15_ALFA	168	50.6	92.9	77.863	8.5036
PIB_PDA	168	423	7907	2673.01	1196.552
LOCRUR	168	0	100	78.16	32.290
PALIME	168	4.9	75.2	32.625	15.1365
K_VP_NAE	168	.32	55.71	11.4646	9.31664
K_SDS	168	11.75	98.92	68.5150	20.48664
INDISOBR	168	66	89	81.35	5.465
TV per capita	168	7.5	26.8	18.496	4.1400
TAA_mujeres	168	37.86	93.26	73.6334	10.81875
K_PEA_mujeres	168	8.62	38.07	22.4788	5.82346
GACP (%)	168	.00	100.00	89.4301	16.42487
Valid N (listwise)	168				

Tabla 4. Indicadores estadísticos del Grupo 4.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
K15_ALFA	66	64.6	88.4	78.148	5.1319
PIB_PDA	66	1 031	5 854	2 394.59	1 007.305
LOCRUR	66	41	100	92.68	14.220
PALIME	66	11.8	74.2	40.745	14.6713
K_VP_NAE	66	11.63	89.08	44.0414	18.53094
K_SDS	66	23.46	98.87	71.8206	18.57985
INDISOBR	66	70	87	80.79	4.168
TV per capita	66	9.0	28.6	17.934	4.0621
TAA_mujeres	66	56.73	86.80	73.9887	6.59630
K_PEA_mujeres	66	9.74	24.34	17.6780	3.29203
GACP (%)	66	20.76	100.00	63.1358	18.17010
Valid N (listwise)	66				

Tabla 5. Indicadores estadísticos del Grupo 5.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
K15_ALFA	23	0	81.8	51.174	20.0609
PIB_PDA	23	0	2520	1380.57	637.531
LOCRUR	23	1	100	89.22	26.497
PALIME	23	18.7	78.5	59.257	12.7870
K_VP_NAE	23	8.21	95.24	57.9026	19.82804
K_SDS	23	13.83	97.47	57.4913	24.86690
INDISOBR	23	54	87	72.83	7.451
TV per capita	23	3.2	24.8	9.780	4.4971
TAA_mujeres	23	.00	76.79	43.2164	19.05389
K_PEA_mujeres	23	.00	41.30	17.2058	9.48533
GACP (%)	23	.00	98.91	18.2020	30.56299
Valid N (listwise)	23				

El resultado de este proceso de clasificación de los municipios de acuerdo a su grado de vulnerabilidad, fue cartografiado a fin de apreciar la forma en que se distribuye a lo largo del Golfo de México el fenómeno de la vulnerabilidad. Como puede apreciarse en la figura 11, la mayor parte de las áreas que registran muy alta vulnerabilidad se ubican en las zonas de la sierra madre oriental, es decir, en aquellas áreas que por su difícil topografía poseen significativos problemas de aislamiento.

Para apreciar con mayor claridad la problemática del aislamiento, se procedió a cartografiar la presencia de las vías de comunicación. Como puede observarse en la figura 12, la forma en que se distribuyen las vías de comunicación constituye sólo una parte del problema de la vulnerabilidad. Algunos de los municipios que registran alta vulnerabilidad no están del todo incomunicados. Es cierto que cuentan con vías de acceso, pero la mayor parte de ellas son terracerías, las cuales se hacen intransitables en épocas de lluvia.

La otra parte de la explicación tiene que ver con la altitud: algunos de esos municipios se ubican en zonas de difícil acceso, en áreas donde el transporte de personas y mercancías es relativamente costoso por lo abrupto del relieve donde se ubican las poblaciones. El otro aspecto que ha considerarse, es el hecho de que se trata de municipios habitados por poblaciones donde el componente étnico es alto. Esto indica la presencia de elementos de segregación étnica que han excluido a las poblaciones indígenas del acceso a servicios e infraestructuras que son indispensables para mejorar sus condiciones de vida y, por ende, reducir su vulnerabilidad social.

Al dirigir nuestra mirada al mapa de las altitudes (figura 13), podemos observar que, en efecto, la alta vulnerabilidad social tiene una fuerte correlación con la forma en que se localizan los municipios en las partes altas del territorio. Como ya hemos observado en otros textos (Rodríguez, 2006), analizar la problemática social que enfrentan los pueblos indios situados en las sierras donde nacen

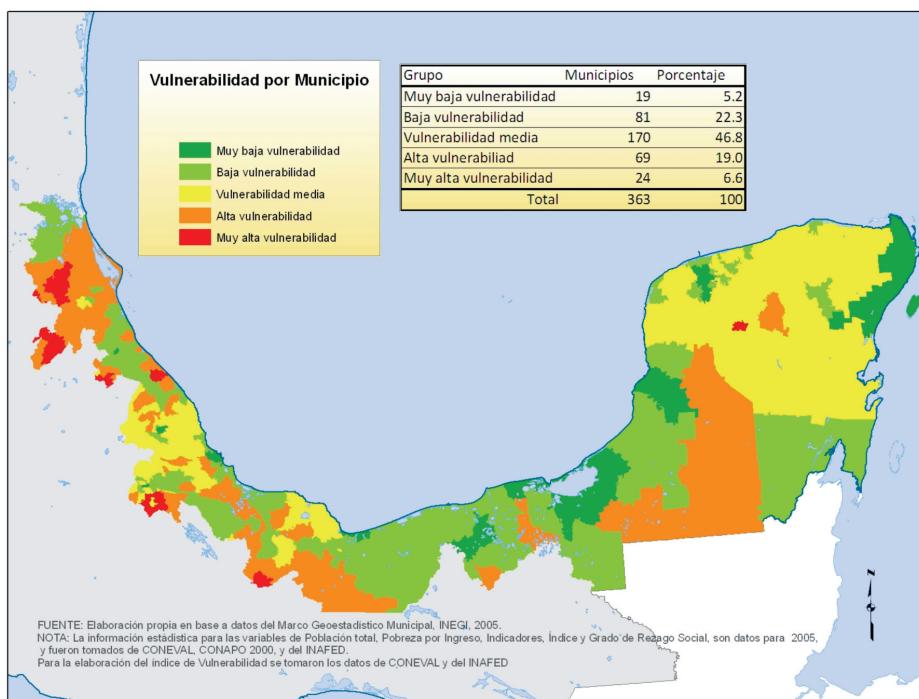


Figura 11. Mapa que muestra la clasificación de los municipios de acuerdo a su grado de vulnerabilidad.

las cuencas hidrológicas del Golfo de México, es indispensable, ya que la forma en que estas poblaciones manejan los recursos naturales (particularmente los bosques), es un factor explicativo de los procesos de erosión y cambio de uso del suelo que inciden en la dinámica de los cuerpos de agua en las partes bajas, es decir, en las planicies costeras. Nos hallamos ante un fenómeno que ya ha sido observado por otros investigadores (Tejeda y Ochoa, 2007; León y Rodríguez, 2004; Toledo, 2004): las altas precipitaciones pluviales que se registran en las partes altas de las cuencas, puede traducirse en inundaciones con efectos sumamente negativos en las partes bajas a causa precisamente del azolvamiento de los ríos, lo cual en última instancia obedece a

procesos erosivos suscitados por la deforestación de las sierras (sea por un manejo inapropiado de los recursos forestales, sea por una expansión de las tierras de cultivo).

El análisis de la vulnerabilidad social hasta aquí realizado, ofrece una primera aproximación a la problemática que nos hemos propuesto examinar en esta investigación. Se considera necesario profundizar en el estudio de la forma en que la vulnerabilidad social se encuentra articulada con los riesgos asociados al cambio climático.

Al contrastar las zonas de vulnerabilidad social con las zonas de riesgo (figura 14), puede apreciarse que las zonas de baja vulnerabilidad se hallan asociadas con las zonas de desarrollo urbano, ya que éstas concentran gran parte de

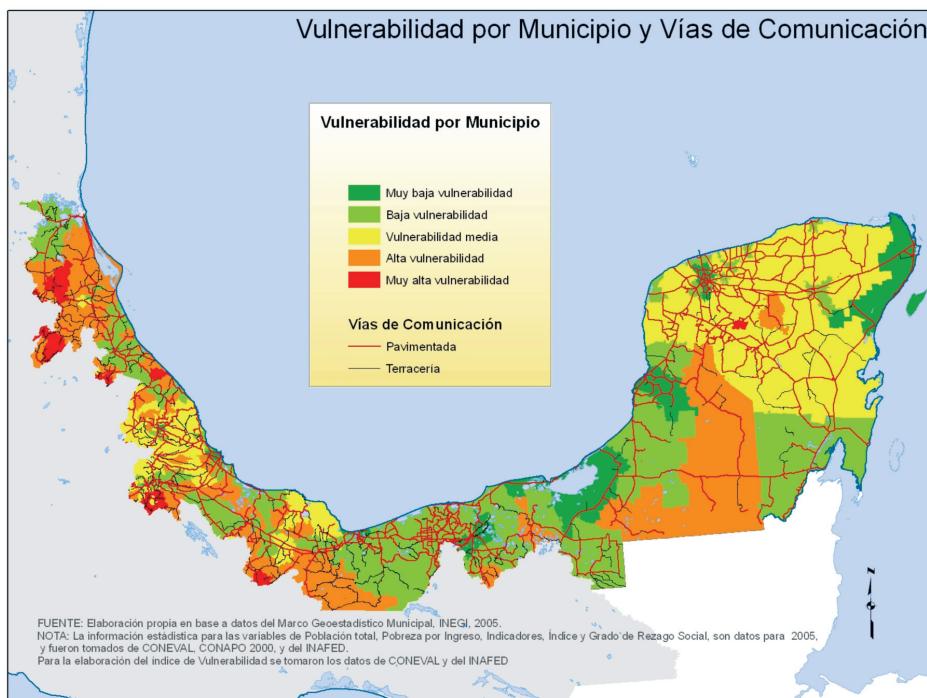


Figura 12. Mapa del Índice Vulnerabilidad por municipios y vías de carreteras.

los procesos de modernización (infraestructuras y servicios de salud, educación, comunicación) y desarrollo económico (PIB per cápita). Sin embargo, es necesario advertir que aun cuando esas áreas de desarrollo urbano concentran los beneficios del desarrollo, ello no impide que también se encuentren amenazadas por situaciones de riesgo. Algunas de las zonas urbanas cuentan con muy buenos indicadores de desarrollo humano, pero ello no impide que ellas enfrenten dinámicas de vulnerabilidad ambiental y particularmente de vulnerabilidad a fenómenos de cambio climático. La razón de ello estriba en que se trata de ciudades que han crecido a un lado de las líneas costeras, y su expansión ha ocurrido en las inmediaciones de los ríos que desembocan

al Golfo. Las zonas metropolitanas de Tampico-Ciudad Madero, Coatzacoalcos-Minatitlán, Villahermosa y Cárdenes, Tecolutla y Martínez de la Torre, Ciudad del Carmen y Campeche, son áreas de crecimiento urbano que se encuentran expuestas a dos situaciones de riesgo: por un lado, el incremento del nivel del mar y el impacto de los huracanes, y del otro, inundaciones y desbordamientos de los ríos que desembocan en su entorno.

Los autores agradecen al Mtro. Rafael Alberto Palma Grayeb su valiosa ayuda en el cálculo del Índice de Vulnerabilidad. Al Lic. Gilberto Cházaro su apoyo en la construcción de los mapas que ilustran la distribución geográfica de dicho índice.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS

mexicanas ante el cambio climático

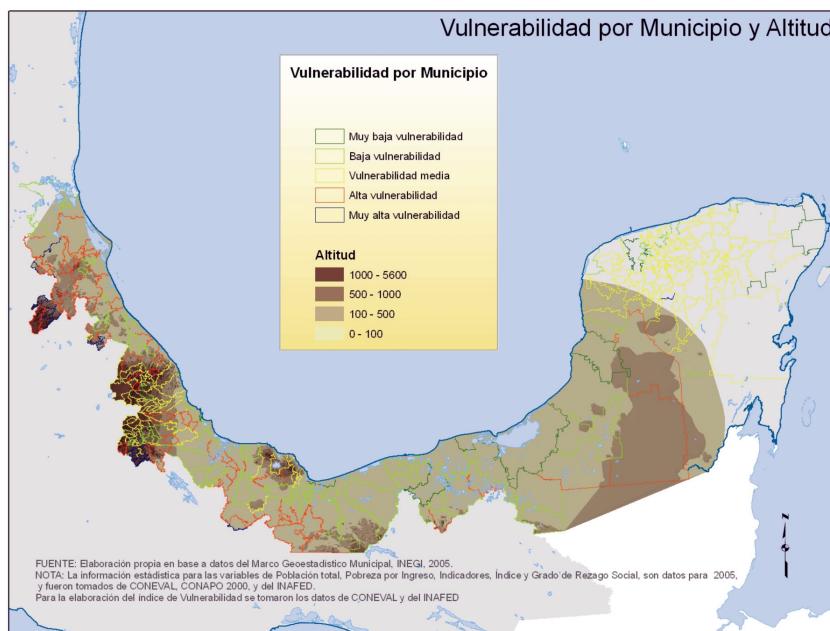


Figura 13. Mapa del Índice Vulnerabilidad por municipios y altitud

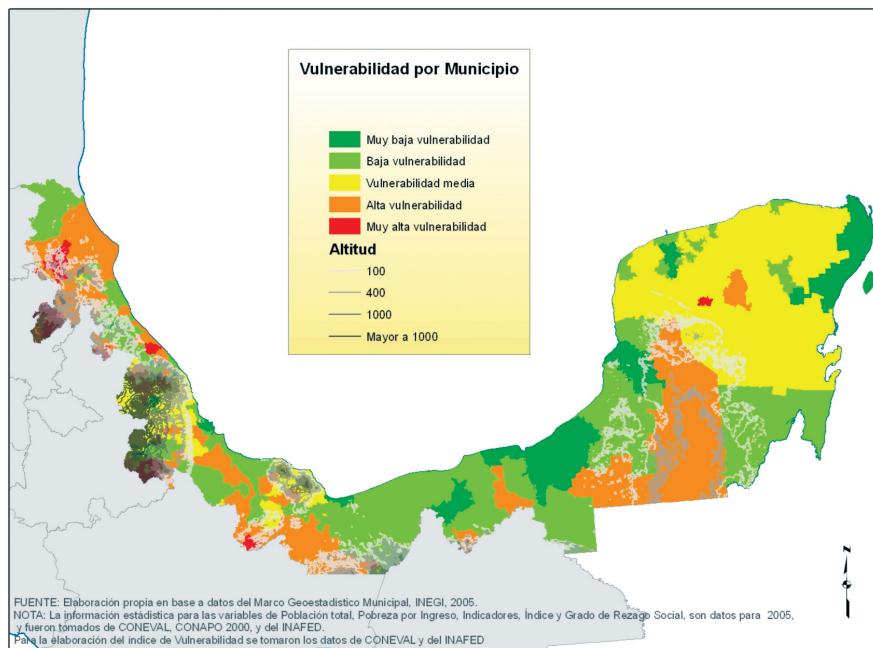


Figura 14. Mapa del Índice Vulnerabilidad por municipios y zonas de riesgo.

LITERATURA CITADA

- Bagnasco, A., F. Piselli, A. Pizzarno, y C. Trigilia, 2003. El Capital Social. Instrucciones de uso. Argentina: Fondo de Cultura Económica.de Argentina, S.A.
- Bozada Robles, L. M., 1998. El Desarrollo pesquero y acuícola del Estado de Tabasco. Informe final a la Asociación Ecológica Santo Tomás, A.C., Villahermosa, Tabasco, México.
- Carbajal, D. J. A., 2007. Efectos del calentamiento global en el Golfo de México: incremento del nivel del mar. Recuperado el 13 de diciembre del 2008 de adriancarbajal.no-ip.org/inundacion/reportegolfo.pdf
- Carranza-Edwards, A., L., Rosales-Hoz, M. Caso Chávez y E. Morales de la Garza, 2004. La geología ambiental de la zona litoral. p 1043-1082. En: M. Caso-Chávez, I. Pisanty, y E. Ezcurra (Eds). Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. Semarnat, Instituto de Ecología, A. C., Hearte Research Institute for Gulf of Mexico Studies.
- Casco, R., 2004. La Zona Costera de México: Definición. p1-4. EN: E. Rivera Arriaga, G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, y F. Rosado May (Eds.), El Manejo Costero en México. Universidad Autónoma de Campeche, Semarnat, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- Chang Urriola, I., 2005. Indicadores de Vulnerabilidad y Desastres para América Latina Producto 3: Resumen Ejecutivo e Informe Final. [En línea] Recuperado el 13 de agosto del 2008 de http://www.disasterinfo.net/lideres/spanish/panama2005/presentaciones/facilitadores/isaías_chang_urriola/informefinalconsindvd/informe_final_y_resumen_ejecutivo.doc
- Chardon, A. C. y J.L. González- Manizales, 2002. Indicadores para la Gestión de Riesgos. Programa de Información e Indicadores de Gestión de Riesgo. BID, Univ. Nac. de Colombia-sede Manizales, CEPAL, IDEA.
- Church, J. A., J. M. Gregory, P. Huybrechts, M. Kuhn, K. Lambeck, M. T. Nhuan, D. Qin y P. L. Woodworth, 2001. Changes in sea level. p.639-693. In: J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson (eds.) Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK,
- CONAPO, 2005. Índice de marginación 2005. Recuperado el 10 de agosto de 2008, del sitio <http://www.conapo.gob.mx/publicaciones/margina2005/AnexoC.pdf>.
- CONEVAL, 2007a. Los mapas de Pobreza en México. Anexo técnico metodológico. Recuperado el 10 de agosto de 2008, del sitio <http://www.coneval.gob.mx>.
- CONEVAL, 2007b. Los mapas de Pobreza en México. Recuperado el 10 de agosto de 2008, del sitio <http://www.coneval.gob.mx>.
- CONEVAL, 2007c. Validación estadística de las estimaciones de la incidencia de pobreza estatal y municipal por niveles de ingreso. Recuperado el 10 de agosto de 2008, del sitio <http://www.coneval.gob.mx>.
- CONEVAL, 2007d. Mapas de Pobreza por Ingresos y Rezago Social 2005. Recuperado el 13 de diciembre del 2008 de http://www.coneval.gob.mx/coneval2/htmls/publicaciones/HomePublicaciones.jsp?id=mapas_de_pobreza_2007.
- CONEVAL, 2008e. Informe de Evaluación de la Política de Desarrollo Social en México 2008. Recuperado el 13 de diciembre del 2008 de http://www.coneval.gob.mx/coneval2/htmls/publicaciones/HomePublicaciones.jsp?id=mapas_de_pobreza_2007.
- Cutter, S.L., J. B. Boruff, W. Lynn, 2003. Social vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2): 242-261.

- Díaz S. C., A. Aragón, A. Arreola, L. Brito, S. Burreola, S. Carreón, A. Cruz, P. González, M. Manzano, G. Martínez, G. Padilla, y D. Urias, 2008. Análisis de vulnerabilidad del Golfo de California asociado al incremento del nivel medio del Mar. Primera Bienal de la Agenda de Investigaciones del Programa de Ordenamiento ecológico marino del Golfo de California. INE/Semarnat,
- Douglas, M., 1986. Risk acceptability according to the social sciences. New York. Russell Sage Foundation.
- Douglas, M., y A. Wildavsky, 1982. Risk and culture: An essay on the selection of technological and environmental dangers. University of California Press,
- Esquivel H. G., L. López-Calva, R. Vélez, 2003. Crecimiento económico, desarrollo humano y desigualdad regional. Estudios sobre Desarrollo Humano PNUD México 2003-3.
- García, R., 2000. Sistemas Complejos.. Editorial Gedisa, España.
- García, A. V., 2004. La perspectiva histórica en la antropología del riesgo y del desastre. Aceramiento metodológico. *Relaciones*, 97(25): 124-142.
- Gornitz, V.M., R.C. Daniela, T.W. White, y R.K. Birdwell, 1994. The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to sea-level Rise in the U.S.Southeast. *Journal of Coastal Research Special Issue* 12:327-338.
- INEGI, 2006. II Conteo de Población y vivienda 2005. <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/localidad/iter/default.asp?s=est&c=10395>
- IPCC, 2007. Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza,
- Jiménez, S., W. Salinas y J. Campos, 2004. Impacto de la urbanización en zonas costeras. Caso de Estudio: zona conurbada Altamira-Madero-Tampico, Tamaulipas, México. p 361-372.
- En: M. Caso-Chávez, I. Pisanty, y E. Ezcurra, (eds). Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. Semarnat, Instituto de Ecología, A. C., Heart Research Institute for Gulf of Mexico Studies.
- León, C., 2008. Instrumentación de Medidas de Adaptación al Cambio Climático en Humedales Costeros del Golfo de México. [Versión CD], Informe final al Banco Mundial, Semarnat.
- León, C. y H. Rodríguez, 2004. Ambivalencia y asimetrías en el proceso de urbanización en el Golfo de México: Presión ambiental y concentración demográfica. p.1043-1082. En: M. Caso-Chávez, I. Pisanty, y E. Ezcurra (eds). Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. Semarnat, Instituto de Ecología, A. C., Heart Research Institute for Gulf of Mexico Studies.
- López, P., R. de la Torre, 2004. Capital Social y Desarrollo Humano en México. Estudios sobre desarrollo Humano PNUD-México No 2004-14.
- Méjico. Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Semarnat. <http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc3.pdf>
- Mileti, D., 1999. Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States. Washington, D.C. Joseph Henry Press.
- Natal y Sandoval, 2004. Capital Social: una revisión crítica para el estudio de la acción colectiva en OBC. Colegio Mexiquense. Documento de discusión sobre el Nuevo Institucionalismo, 8:14.
- Níkel, J. y R. Klein, 2003. DINAS-COAST: Developing a Method and a Tool for Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment. *Loizs Newsletter*, 27:1-4.
- Ortiz Pérez, M. A., y A. P. Méndez Linares, 2003. Vulnerabilidad al ascenso del Nivel del mar y sus implicaciones en las costas Bajas del Golfo de México y Mar Caribe. Gay, C. (Ed). México: una visión hacia el Siglo XXI. El cambio climático en México. UNAM. [en línea]. Re-

- cuperado el 13 de agosto del 2008 de <http://www.atmosfera.unam.mx/cambio/libro.html>.
- PNUD, 2007. Informe sobre Desarrollo Humano México 2006-2007. México: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo,
- PNUD, 2008a. Índice de Desarrollo Humano Municipal en México 2000-2005. México: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo.
- PNUD, 2008b. Informe sobre Desarrollo Michoacán 2007. México: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo.
- PNUD, 2005b. Informe sobre desarrollo humano México 2004. México: Ediciones Mundiprensa.
- Rodríguez, H., 2006. Desarrollo Humano y Desastres en Veracruz, pp 73-89. En: Universidad Veracruzana. Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz.
- Sánchez-Gil, P., A. Yañez-Arancibia, J. Ramírez-Gordillo, J.W. Day, y P.H. Templet, 2004. Some socio-economic indicators in the Mexican status of Gulf of Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 47(11-12): 581-597.
- Semarnap, 2000. Indicadores de desarrollo sustentable. Recuperado el 13 de diciembre del 2008 de <http://maestros.its.mx/loyola/EducA/indic.pdf>
- Tejeda, M., A. Coord. (2006). Proyecto para desarrollar el Plan de Acción contra el Cambio Climático en el Estado de Veracruz. [Versión Power Point]. México: Universidad Veracruzana.
- Tejeda, M., A., y M.C. Ochoa, 2007. Proyecto Plan de Acción Climática del Estado de Veracruz (México). (Resumen). México: Organización Mexicana de Meteorólogos, A.C. Memoria del Congreso 10071116-01.
- Toledo, A., 2004. Entre la ciencia y la política. Integrando los componentes marinos, costeros y continentales del Golfo de México. pp 937-959. En: M. Caso-Chávez, I. Pisanty, y E. Ezcurra, (eds). Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. México: INE –SEMARNAT, Instituto de Ecología, A. C., Heartereseach Institute for Gulf of Mexico Studies.
- Tudela, F., (Coord.), 1990. La modernización forzada del trópico húmedo: el caso de Tabasco. El Colegio de México.
- Watson R., M. Zinyowera y R. Moss, 1997. Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Zarate Lomelí, D., A. Yañez-Arancibia, A., J. Day, M. Ortiz Pérez, A. Lara-Domínguez, C. Ojeda de la Fuente, L.J. Morales Arjona y S. Guevara Sada, 2004. Lineamientos para el Programa Regional de Manejo Integrado de la Zona Costera del Golfo de México y el Caribe. p 899-935. En: M. Caso-Chávez, I. Pisanty, y E. Ezcurra, (eds). Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. Semarnat, Instituto de Ecología, A. C., Heart Research Institute for Gulf of Mexico Studies.
- Yañez-Arancibia, A., A.L. Lara-Domínguez, P. Sánchez-Gil, y J. Day, 2004. Interacciones ecológicas estuario-mar: marco conceptual para el manejo ambiental costero. p 433-490. En: M. Caso-Chávez, I. Pisanty, y E. Ezcurra, (eds). Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. Semarnat, Instituto de Ecología, A. C., Heart Research Institute for Gulf of Mexico Studies.

Botello, A.V., S. Villanueva-Fragoso, C. Agraz-Hernández, y J. Presa, 2010. Mitigación, adaptación y costos, p. 469-492. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMyl, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Mitigación, adaptación y costos

A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, C. Agraz-Hernández y J. Presa

RESUMEN

En el presente capítulo se resumen las principales opciones de adaptación de los ecosistemas costeros hacia los efectos del cambio climático. Se describen brevemente las categorías de adaptación (autónoma y planeada) y las estrategias de prevención. También se ejemplifican los procesos de restauración en manglares y sus costos en diferentes países, así como los principales sistemas agrícolas del país, sus volúmenes de producción y los costos por cosechas. Finalmente se anotan los costos de los impactos de huracanes sobre las redes de carreteras costeras, así como los impactos en la economía del rubro turístico en el estado de Quintana Roo por los efectos de los huracanes.

Palabras clave: adaptación, estrategias, manglares, restauración

INTRODUCCIÓN

La adaptación al cambio climático es la capacidad de los sistemas humanos y naturales para ajustarse, espontánea y ordenadamente, a los impactos de climáticos adversos. Así, para hacer efectivas las estrategias de mitigación y adaptación se requieren modificaciones de gran alcance en los procesos de desarrollo, en los patrones dominantes de apropiación de los recursos naturales, en las prácticas de producción, los hábitos de consumo y en las formas de organización social. Mientras que las acciones de mitigación requieren de una respuesta coordinada a nivel internacional, las

acciones e iniciativas de adaptación deben ser diseñadas e instrumentadas también a nivel nacional, estatal, municipal y sectorial y por lo tanto es necesaria la participación de todos los sectores y actores implicados en la planificación y la gestión del riesgo del sistema en cuestión.

Resulta difícil el cálculo de los beneficios económicos que acarrean los trabajos dirigidos a la preservación ambiental o a la facilitación del uso sostenible de los recursos naturales. La economía clásica no aborda estos temas en términos comunes de costo-beneficio.

ADAPTACIÓN DE LAS ZONAS COSTERAS

La adaptación incluye numerosas opciones de adecuación que dependen fuertemente de las características biogeofísicas y socioeconómicas locales, donde la opción óptima para una región específica puede ser una mezcla de ellas. Las medidas de adaptación son agrupadas en dos categorías generales: la *adaptación autónoma* y la *adaptación planeada*. La adaptación autónoma hace referencia a la utilización de la capacidad de respuesta libre de los sistemas costeros al cambio marino, en tanto que la adaptación planeada utiliza estrategias de prevención y respuesta antrópica al fenómeno marino adverso. En las estrategias correspondientes a las dos categorías mencionadas, el planeamiento requiere de la consideración de largos períodos de tiempo para garantizar su efectividad, que en este caso debe ser de al menos 100 años.

La adaptación autónoma utiliza la capacidad que tienen los sistemas costeros para responder libremente a las presiones externas, como son las producidas por el cambio climático. La capacidad de respuesta depende ampliamente de la resiliencia y la resistencia de los sistemas costeros, las que a su vez están controladas por los procesos morfodinámicos litorales y fluviales.

Los sistemas costeros con resiliencia y resistencia alta pueden llegar a tener la suficiente autorregulación para compensar el ascenso acelerado del nivel de mar, bien sea migrando hacia el continente o compensando el ascenso marino acelerado mediante la acreción de sedimentos. No obstante, las actividades humanas y la contaminación han reducido notoriamente la resiliencia de los sistemas costeros debido a la alteración de los ecosistemas.

Esta interferencia incluye principalmente el desarrollo urbano, de infraestructura turística y la contaminación, actividades que evitan que tomen lugar procesos naturales como el crecimiento de los corales, la acreción de los manglares y los aportes de sedimentos por la deriva litoral.

La opción de permitir la libre adaptación natural puede ser considerada en dos formas: no hacer nada y prevenir y/o revertir malas adaptaciones. La primera medida implica no tomar ninguna acción, dejando en libertad a los sistemas costeros para que se ajusten al nivel más elevado del mar. En la segunda opción son adoptadas medidas para reducir la interferencia de los sistemas y de la dinámica natural, así como para restablecerlas cuando sea posible.

La adaptación autónoma puede ser facilitada mediante la adopción de las siguientes opciones de adaptación: no-intervención de áreas naturales de amortiguación de inundaciones, no-alteración y/o interrupción de la dinámica natural costera y fluvial y reversión de malas adaptaciones. Los dos primeros lineamientos hacen referencia a la prevención de nuevos desarrollos en áreas de amortiguación de eventos súbitos y extraordinarios tanto marinos como fluviales y la no-interrupción de los procesos de transporte y acumulación de sedimentos en el litoral y el delta, con el propósito de fortalecer los mecanismos de resiliencia de los sistemas costeros y aumentar su capacidad de respuesta.

La tercera opción considera la reversión de malas adaptaciones, como la eliminación de estructuras y la corrección de usos inadecuados de la tierra que interfieren con la dinámica litoral y deltática. La reversión puede incluir el desmonte de estructuras que interfieren o su

adecuación para reducir los impactos de su interferencia, así como el cambio de uso de la tierra hacia opciones de conservación del medio natural y la restricción de la ocupación (para prevenir potenciales amenazas y recuperar zonas de amortiguación).

Estas opciones de adaptación pueden considerar acciones específicas para algunos sitios del litoral como:

- Restablecer la alimentación natural de las playas actualmente amenazadas en las zonas del Golfo de México y Caribe principalmente.
- Control de la contaminación y los daños sobre los corales y manglares e implementación de programas para recuperación con el propósito de aumentar la resiliencia de la línea de costa.
- Eliminación y/o reducción de la intervención de los deltas para permitir la adaptación autónoma del complejo deltáico al ascenso del nivel del mar.
- Creación y ampliación de áreas naturales protegidas para asegurar la no-interferencia en los procesos autónomos de adaptación. Las medidas más indicadas podrían incluir la ampliación de parques naturales para incluir mayores zonas de manglares e islas coralinas, y la creación de nuevas zonas de reserva natural en los humedales y pantanos costeros

La adaptación planeada hace referencia a las medidas futuras para prevenir, reducir y resistir los impactos del cambio climático y en especial del ascenso del nivel del mar. Para el IPCC, la adaptación planeada puede darse mediante tres categorías de respuesta: el retiro manejado, la acomodación y la protección. Las estrategias de retiro manejado y acomo-

dación incluyen principalmente medidas preventivas para áreas donde se permitirá la pérdida de terreno por erosión e inundación, facilitando la adaptación autónoma y la estabilidad de la dinámica de los sistemas costeros. La protección involucra tanto medidas de respuestas como de prevención para tratar de mantener la línea de costa en el sitio actual.

El retiro manejado considera el abandono estratégico progresivo de las tierras y de las estructuras que pueden ser afectadas por el ascenso del nivel del mar. El abandono puede ser motivado en algunos sectores del litoral por el alto impacto ambiental y económico de las medidas de protección, considerándose como posible alternativa óptima permitir el avance de los ecosistemas hacia el continente. En el retiro manejado se consideran opciones de adaptación como: reubicación de la población amenazada, desarrollo condicionado a las fases de abandono, adopción de medidas de acomodación y prevención de futuros desarrollos importantes en áreas amenazadas.

En las zonas costeras mexicanas, estas opciones de adaptación pueden ejemplificarse con acciones en sitios específicos como:

- No-intervención de áreas altamente susceptibles como manglares, humedales salobres y llanuras de inundación de los principales ríos para permitir que cumplan su función de amortiguación de inundaciones y expansión de los cuerpos de agua. Este es el caso de la mayoría de los humedales de Tabasco, Marismas Nacionales en Sinaloa-Nayarit, los manglares de la costa de Chiapas, Campeche y Quintana Roo.
- Retiro de la población actualmente amenazada y asentada sobre marismas de mangle y pantanos costeros; retiro

gradual de la población asentada en las llanuras de inundación de los principales ríos. Este es el caso de las poblaciones que habitan las margenes del ríos Coatzacoalcos, Pánuco y el Grijalva –Usumacinta.

La estrategia de acomodación comprende el continuo pero modificado uso de la tierra y la inclusión de respuestas adaptativas de la población. Para el IPCC (1990), la acomodación implica que los habitantes continúen el uso de la tierra bajo su riesgo pero sin intentar prevenir que la tierra sea inundada o erosionada. Las respuestas adaptativas incluyen medidas como la elevación de las construcciones sobre los niveles de inundación, la modificación de los sistemas de drenaje y el cambio de uso de la tierra. La estrategia de acomodación considera opciones de adaptación como la conservación de los ecosistemas en armonía con la ocupación, la modificación del uso de la tierra, la protección de los ecosistemas amenazados y la regulación estricta de las zonas inundables. La ocupación continua considera el uso de áreas altamente susceptibles a la inundación mediante la adopción de respuestas de adaptación y la modificación de los códigos de construcción.

Las opciones de adaptación relacionadas con la acomodación para los litorales mexicanos pueden incluir acciones como:

- Modificar el uso de la tierra en los deltas y establecer usos de acuerdo con la oferta natural y bajo prácticas conservacionistas. El IPCC recomienda la introducción de agricultura de crecimiento anegado y/o resistente a la sal.
- Promover el cambio de uso de la tierra en las llanuras de inundación de los principales ríos y deltas.

- Creación de nuevas y/o ampliación de áreas protegidas como parques nacionales para la protección de los humedales y pantanos costeros.
- Reglamentación de distancias mínimas para el levantamiento de construcciones cerca de la línea de costa no resistentes, las cuales deberán estar apoyadas en detalladas mediciones de tasas locales de retroceso de la línea de costa.
- Desarrollo de centros regionales que diseñen y ejecuten programas de investigación y sobre el seguimiento de la dinámica litoral y la medición de las tasas locales de retroceso de la línea de costa a nivel nacional.
- Incentivar programas de investigación científica de los humedales costeros, manglares, pantanos y ecosistemas críticos, para conocer mejor el funcionamiento y la dinámica con el propósito de lograr su recuperación y aumentar su productividad.
- Creación de programas científicos y de investigación para realizar el seguimiento y monitoreo de los efectos que se presentarán en los deltas y los litorales por el ascenso del nivel del mar.
- Se debe incluir instancias para el seguimiento y medición de la intrusión de la cuña salina, comportamiento de los niveles freáticos, salinización de suelos y de acuíferos, cambios ecológicos, estabilidad de cauces y modificación de los niveles de inundación, entre otros aspectos.
- Realizar el modelamiento hidráulico y dinámico de los deltas de los principales ríos a nivel nacional, para evaluar

los impactos que se presentarán por el aumento de las inundaciones y los nuevos patrones de sedimentación debidos al ascenso del nivel del mar.

La estrategia de protección busca mantener la línea de costa en su posición actual mediante medidas de defensa, las que pueden consistir en la construcción y/o ampliación de estructuras y en la alimentación artificial y mantenimiento de playas. Sin embargo, las opciones de protección pueden involucrar la pérdida de funciones naturales de los sistemas costeros, del valor de los recursos naturales y el debilitamiento de los mecanismos de resiliencia si no son cuidadosamente diseñadas y basadas en estudios de impacto ambiental. Por tanto, la selección de una opción de defensa debe involucrar importantes consideraciones ambientales, sociales y económicas, que necesitan ser previamente evaluadas en forma cuidadosa.

En la protección se hace énfasis en la defensa de áreas altamente vulnerables como centros de población, actividades económicas y ecosistemas estratégicos. Las medidas de protección pueden ser adoptadas para la línea de costa completa, para las áreas de marcada importancia o no ser protegido ningún sector litoral, en una elección que dependerá de razones ambientales y económicas fundamentalmente. La estabilización de la línea de costa puede intentarse mediante opciones como la alimentación de playas, la restauración de humedales y la reforestación de las zonas alejadas a la línea de costa. La protección también puede involucrar el levantamiento de estructuras como diques, malecones, espolones y rompeolas, obras que requieren grandes inversiones y la transformación de la línea de costa.

El diseño e implementación de las medidas de protección requerirá la utilización de series de información básica detallada, como la caracterización geológica, geomorfológica, morfodinámica, geotécnica y sobretodo oceanográfica (nivel de mareas, corrientes superficiales, oleaje, batimetría). Para obtener esta información es necesario que se implementen programas científicos para la caracterización detallada de los litorales nacionales y el seguimiento de la evolución de los sistemas costeros.

Por lo tanto, las acciones preventivas de adaptación evitarán costos de reparaciones y ajustes posteriores y tendrán importantes beneficios. Sin embargo, para países como México, las principales restricciones para adoptar y aplicar medidas de adaptación, son los altos costos que representan. Por lo tanto, es necesario asegurar que la implementación de medidas aporte beneficios a corto plazo y a bajos costos o que incluso pueda generar ahorros económicos (INE, 2006).

Una de las principales tareas en el desarrollo de capacidades de adaptación de cambio climático es la generación de conocimiento para la correcta toma de decisiones.

En el caso de las zonas costeras mexicanas, resalta la urgencia de la información climática y en particular los pronósticos de clima para diseñar adecuadamente las políticas enfocadas a la adaptación al cambio climático.

En este sentido, es necesario contar con:

- 1.- series de información de tiempo largo, sobre todo en cuanto al comportamiento de las mareas.
- 2.- la medición de los flujos de agua de los ríos y su capacidad hidrodinámica.
- 3.- mediciones de calidad del agua en lagunas, estuarios y ríos.
- 4.- mediciones continuas y a largo plazo, de la presencia y niveles de contaminantes que alteren y disminuyan la capacidad de resiliencia de los ecosistemas costeros.
- 5.- Observación continua de los hidróperíodos en las zonas costeras bajas, ya que algunos ecosistemas como los humedales y el manglar dependen directamente de él.

Dentro de las zonas costeras son particularmente vulnerables a los cambios de clima, los humedales, las lagunas costeras, los estuarios, los arrecifes, los pastos marinos, y de cuyo correcto funcionamiento dependen muchas especies de peces, crustáceos y moluscos; que son base de la economía de muchas poblaciones ribereñas en el país.

Debido a que las zonas costeras son altamente complejas desde el punto de vista funcional, es necesario describir por ecosistemas los costos y las principales medidas de adaptación al cambio climático.

MANGLARES

Sin duda y como se detalla en muchos informes y publicaciones recientes, los humedales y entre ellos los ecosistemas de manglar, serán sin duda uno de los primeros afectados por el

cambio climático. Algunos estudios demuestran que más que el aumento de la temperatura, serán los cambios del nivel del mar lo que más los afectará y debido a su importancia, ya

diversas Universidades y Centros de estudios han iniciado medidas de adaptación y mitigación como la restauración, la repoblación y la reforestación de los mismos.

RESTAURACIÓN

Las principales razones para efectuar un programa de restauración son: la recuperación del hábitat para restablecer en la medida de lo posible, sus condiciones originales, y con ello, restablecer también los servicios ambientales que originalmente se derivaban de él. Pero además, estos programas generan beneficios directos a través de la contratación de lugareños para los trabajos que implican estos programas, sin contar la capacitación y especialización que esa gente que vive allí alcanza en las técnicas y procedimientos para llevar a cabo trabajos serios y eficientes de restaura-

ción. Por tal motivo, estos programas pueden ser considerados sustentables toda vez que tocan los tres aspectos fundamentales de este concepto generando beneficios económico, ecológicos y sociales. Este, es el fin último que se persigue en un programa de restauración a través del concepto de desarrollo de comunidades rurales especializadas denominadas para efectos prácticos: "mangleros". De esta forma, los beneficios directos que se generan consiguiendo por una parte regenerar los ecosistemas a sus condiciones originales (o lo más cercano posible a éstas) y al mismo tiempo, generando un círculo virtuoso de fuente de trabajo en un recurso que eventualmente puede manejarse de formas sustentable para la propia comunidad que lo regeneró, aunque para ello debe revisarse el marco normativo actual.



Figura 1. Flores-Verdugo, F., J.L. Rojas-Galaviz, y D. Zárate-Lomelí. Importancia ecológica y económica de los ecosistemas de manglar y otros humedales costeros. Elementos de juicio para unificar criterios de comprensión y análisis. pp. 54. (http://www.senado.gob.mx/comisiones/LX/cyt/content/presentaciones/docs/Rojas_Galaviz.pdf, 23-II-2009).

Ya desde 1959, algunos países asiáticos han realizado estudios sobre la regeneración y el crecimiento de manglar (Teas, 1977; Kinch, 1975; Lewis III, 1979; Wadsworth, 1959). Al respecto, existen algunos trabajos que se enfocan en el trasplante y sobrevivencia de las plántulas de tres de las especies presentes en México (Bojórquez y Prada, 1988; Pulver, 1976; Cintrón, 1982). Estos estudios se enfocan a trasplantes directos.

Por su parte, algunos países árabes tienen programas de forestación con manglares para uso forrajero de cabras y camellos (Agraz-Hernández, 1999), mientras que los ingenieros en Texas, Estados Unidos, recomiendan la conservación de los humedales, porque los consideran como uno de los sistemas más eficientes de protección contra las inundaciones. En Bangladesh, se reforestaron 25 000 ha de manglares para utilizarse como barrera contra los tifones que causaron la muerte de más de 70 000 personas cuando estos ecosistemas fueron remplazados por arrozales (Fosberg, 1917). Otro ejemplo más dramático de esto se reveló durante el tsunami que atacó estas áreas y a Indonesia en 2004.

Además en países como Adamán, Tailandia, Malasia, Puerto Rico e Indonesia se han aplicado técnicas silvícolas en sus bosques de manglar de manera cotidiana, tales como cosecha y reforestación llegando incluso a desarrollar tiempos de rotación de entre 20 a 100 años dependiendo de la especie (Lewis, 1982).

En lo que se refiere a sobrevivencia, es ampliamente conocido, que cuando parámetros como el crecimiento, área foliar y salud de las plántulas es cuidado desde la etapa de vivero, normalmente se obtienen mejores índices de adaptación-sobrevivencia y desarrollo de las plántulas por encontrarse libres de predadores y por tener mayores atributos fisiológicos para enfrentar aquellos tensores ambientales a los que se verán sometidos, garantizando de esa forma un mayor éxito en la reforestación. Algunos de los países que han trabajado bajo esta premisa son Bangladesh, Tailandia, India, Australia, Vietnam, Indonesia, Arabia Saudita, Cuba, Colombia, Panamá y México (Agraz-Hernández. 1999). Estudios realizados bajo condiciones controladas en viveros experimentales en nuestro país, han reporta-



Figura 2. Viveros de plántulas de manglar de la Universidad del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche

do índices de sobrevivencia que van desde el 80% hasta el 100% incluso para *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa* (Agraz-Hernández, 1999; Benítez-Prado, 2003; Agraz-Hernández *et al.*, 2004).

Algunos programas de reforestación reportados para manglar, basan su éxito en estudios experimentales (viveros de halófitas) utilizando diferentes variedades genéticas de manglar, y como punto importante la consideración de plántulas más apropiadas para la región e incluso la calidad del sitio a reforestar, sin descuidar la capacitación previa de la mano de la obra local antes de realizar una reforestación extensiva. En caso de que se trate de un sitio cuyo patrón hidrológico fue alterado, estos programas consideran como un paso indispensable hacer trabajos de restauración antes de pensar en esquemas de reforestación, dando para ello puntual seguimiento a los patrones fisicoquímicos del agua intersticial para seleccionar el momento y la especie más propicios para reforestar. Asimismo, en aquellos casos en los cuales el programa de reforestación requiera de gran cantidad de plántulas (programas extensivos con carios ciclos anuales) se deberá contemplar obligatoriamente un vivero exclusivamente para producción de



Figura 3. Flores-Verdugo, F., Rojas-Galaviz, J. L. y Zárate-Lomelí, D. Importancia ecológica y económica de los ecosistemas de manglar y otros humedales costeros. Elementos de juicio para unificar criterios de comprensión y análisis, pp. 43. (http://www.senado.gob.mx/comisiones/LX/cyt/content/presentaciones/docs/Rojas_Galaviz.pdf, 23-II-2009).



Figura 4. Agraz-Hernández, C.M., Flores-Verdugo, F.J. (2004). Creación y restauración de ecosistemas de manglar. Principios básicos. En: P. Moreno-Cassasola, P. (Ed.). Manejo Integral de la Zona Costera: Un Enfoque Municipal. Consejo Estatal de Protección al Ambiente del Gobierno de Estado de Veracruz y el Instituto de Ecología, A. C.

mangle. Esto con la finalidad de garantizar la disponibilidad de plántula en condiciones óptimas de crecimiento.

Ahora bien, los costos de los programas de restauración son altamente variables dependiendo sobre todo de diversos factores locales tales como: costo de la mano de obra, características del sitio (su accesibilidad, tamaño y calidad), la cercanía de las áreas para colecta de propágulos, producción en viveros, tipo de material biológico a utilizar, costo de los materiales para la construcción y operación del vivero y colecta de propágulos y plántulas, la densidad de siembra, así como el grado de mortalidad (sustitución de plántulas muertas).

A nivel internacional, los costos de reforestación y restauración varían desde \$1 140 hasta \$6 545 dólares.ha⁻¹, dependiendo del tipo de material que se utilice: propágulos o plántulas. Los costos se incrementan sustancialmente si en lugar de usar propágulos se utilizan árboles (Pulver, 1976). El reducir el espacio entre plántula y plántula en 1/3 de la distancia original de 0.9 m a 0.61 m) duplica el número de trasplantes (de 12 100 a 26 896 plantas/ha) y con una mayor reducción (0.3 m) lo incrementa hasta 110 889 plántulas/ha. Asimismo, un programa de reforestación efectuado en el aeropuerto internacional de Brisbane en 1980, presentó un costo por recaudación y plantado de <\$0.5 dólares/propágulo, con



Figura 5. Viveros de plántulas de manglar de la Universidad del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche.

una sobrevivencia entre 30 y 90%. Cuando se usaron plantas de un año de edad el costo fue de \$0.74 - \$1.33 dólares con índices de sobrevivencia de entre 40 a 60% y por concepto de transplante \$4.50 dólares y sobrevivencia de 80% (Saenger, 1996). Por su parte, Snedaker y Biber (1996) mencionan costos similares, traduciéndose los costos en aproximadamente \$20 000 dólares/ha, mientras que Untawale (1996) ha reportado intervalos de costos por transplante de \$70 a 122 dólares/ha en la In-

dia. Para Tailandia el costo calculado fue de \$140 dólares/ha (Alsornkoae *et al.*, 1995), y en Malasia de \$314 dólares/ha (Chan, 1996). Sin embargo, en ese país los costos de mano de obra son muy bajos. Es relevante mencionar que en estos programas (Sánchez Paéz *et al.*, 2000) los costos de reforestación con base en una densidad de siembra, desde 3 x 3 m (1 111 plántulas) hasta 1 x 1 (10 000 plántulas), el costo de una hectárea se encontró entre \$150 y \$1 350 dólares. Igualmente este autor

menciona que el precio por todas las actividades y gastos de un ciclo de vivero (abono, semilla, llenado de semilleros, siembra para producción y siembra incluyendo prepara-

ción del terreno*) de 24 000 plántulas, tuvo un costo \$3 225 dólares. Lewis (1979) realizó un programa de restauración en St. Croix, us Virgin Islands con un costo total de \$12.500/



Figura 6. Flores-Verdugo, F., Rojas-Galaviz, J. L. y Zárate-Lomelí, D. Importancia ecológica y económica de los ecosistemas de manglar y otros humedales costeros. Elementos de juicio para unificar criterios de comprensión y análisis. pp. 38, 42- (http://www.senado.gob.mx/comisiones/LX/cyt/content/presentaciones/docs/Rojas_Galaviz.pdf, 23-II-2009).

dólares/ha, reforestado con una distancia entre plántulas de 0.7 a 0.8 m, con una sobrevivencia después de 6 semanas del 75%. Datos mundiales indican que los manglares dañados, para su restauración, requieren un gasto entre 10 000 y 100 000 USD por hectárea, en dependencia de las características físicas del lugar, disponibilidad de propágulos, tecnología disponible, etc. Los pastos marinos resultan más caros, y se calcula entre 50 000 y 200 000 USD por hectárea.

En nuestro país existen pocos programas de restauración y por tanto es realmente escasa la información disponible al respecto. Sin embargo, los costos para México se estiman desde los 0.58 a 0.74 dólares para producción de plántula. Así, un programa de restauración (acciones hidrológicas + vivero de mangle + reforestación) se ha calculado con un costo de 12 840 a 68 469 dólares ha⁻¹ (Benítez Prado, 2003; Agraz-Hernández *et al.*, 2004). Es relevante mencionar que la variación del costo en la producción de plántulas se debe sustancialmente a las variaciones en el tipo de sustrato, tipo de sistema de producción (sistema de riego y productos para fortalecimiento/vigor foliar y radicular), tiempo de permanencia en el vivero y porcentajes de sobrevivencia (sustitución de material). Con respecto a la restauración hidrológica, el costo variará dependiendo de la calidad del sitio y la zona económica, así como de las necesidades del número de canales y tipo, depende también del número de ejecuciones (normalmente en períodos bianuales para corregir o prevenir contingencias derivadas de eventos naturales).

Por su parte, los costos en la reforestación se ven influenciados por el tipo de contratación que se realice con los “mangleros”: esto es, por tiempo o por tarea, densidad de la reforestación

(tipo fisonómico que se requería como meta), tipo de material que se utilice, cantidad y calidad de los propágulos, plántula o árbol (si es que son de vivero o silvestres), acceso y tipo de área, mantenimiento y seguimiento (3 años) y finalmente contingencias derivadas del ataque de plagas o enfermedades (tipo y tiempo de producto por aplicar).

Acciones generales para los programas de restauración en bosques de manglar degradados.

- A** Detección de las áreas potenciales para la restauración.
- B** Detección de factores de impacto y mitigación.
- C** Evaluación de los principales parámetros físicos (hidroperíodo, microtopografía, textura del sedimento) y químicos del agua intersticial y del sedimento (salinidad, pH, potencial redox, pH, nutrientes, sulfuros) en las áreas potenciales para la restauración.
- D** Definición de las medidas de mitigación congruentes con el tipo de impacto o efecto que originó la mortalidad o degradación del bosque.
 - D.1** Clausura del patrón hidrológico: restauración hidrológica con/sin reforestación.
 - D.2** Deforestación: reforestación o en el caso de que no exista posibilidad de mitigar el área impactada.
 - D.3** Incremento de la cobertura vegetal: prestación como una medida compensatoria.
- E** Definición del origen de la plántula (natural o de vivero)
- F** Definición del tiempo de seguimiento y mantenimiento del programa (mínimo 3 años).

TURISMO

TURISMO, IMPACTOS POR AUMENTO DEL NMM

La planta hotelera mexicana es la más numerosa de América Latina. En la distribución de zonas turísticas, sin duda el Mar Caribe es la más atractiva para el turismo internacional. En Quintana Roo se cuenta con los destinos de Cancún y la Riviera Maya que cuentan con jardines botánicos, zoológicos, balnearios, playas, zonas arqueológicas, museos, arquitectura civil, religiosa y eventos masivos.

El turismo (actividad económica terciaria) es una actividad que por lo regular genera un crecimiento en la economía local. Sin embargo, la falta de planeación en los países subdesarrollados como en el caso de México, hace que el manejo de los recursos naturales no sea el adecuado y generalmente se realiza modificando el entorno con las consecuente alteración diversos ecosistemas. Además, se pone en riesgo la integridad cultural de las comunidades que reciben la influencia multicultural de los turistas. En Quintana Roo es la fuente de ingresos más importante para el estado y de gran aporte para la federación, ya que es considerada como la tercera fuente de divisas a nivel nacional. En la porción oriental de la entidad hacia la vertiente del mar Caribe, se han emplazado enormes complejos turísticos como Cancún, Cozumel y la conocida Riviera Maya. Los centros de Cancún y Cozumel absorben más del 75% del turismo proveniente del extranjero y representa 40% del que llega al país, lo que lo coloca como un espacio turístico de recepción internacional. En el frente de la llamada “Rivera” se han asentado

aproximadamente 100 hoteles y centros turísticos y que proporcionan una disponibilidad de 60 000 habitaciones, cuyo costo promedio es de 250.00 USD por noche, generando una economía al día de \$15 000 000 00 USD, con una ocupación mayor al 90%.

El auge de los desarrollos turísticos genera un buen número de empleos, pero no todos son ocupados por la población de la zona, debido a que no reúnen los requerimientos que exige el turismo. Los espacios de trabajo que ocupa la población local generalmente son los más bajos y con la remuneración en el tabulador de salarios mas baja. Los grandes consorcios transnacionales, establecen en los grandes centros turísticos edificaciones residenciales autónomas, tiendas de regalos y recuerdos, restaurantes, agencias de viajes como ocurre en Cancún, Riviera Maya o en isla Cozumel. En estos complejos turísticos el cambio climático afectará notoriamente al ambiente en un radio muy amplio, debido a los cambios en el uso de suelo, la hidrología, la migración de trabajadores que demanda la zona que en su mayoría los que tienen relación con las actividades terciarias, la demanda de servicios públicos y los desechos por confinar y tratar, así como las afectaciones por eventos meteorológicos extremos. Esto pone en riesgo muy alto al margen litoral, ya que es el más afectado como se muestra en la figura 7.

Además, se generan problemas sociales como la prostitución, el alcoholismo, drogadicción, la delincuencia, desempleo y se incrementan los asentamientos irregulares marginados circundantes a los centros turísticos, con una creciente demanda de servicios por



Figura 7. Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y dirección del flujo del agua subterránea en la península de Yucatán.

parte de la población, como los más comunes. El estado de Quintana Roo, es muy vulnerable a los impactos de las trayectorias ciclónicas durante cada temporada. Es importante tomar en cuenta a los fenómenos meteorológicos de alto impacto en la planeación turística, pues estos eventos sin acciones preventivas pueden ocasionar daños muy graves a la población y economía de la zona, las repercusiones pueden ser perjudiciales (socio-económicas) y complica la actividad turística, cuando

impactan en el entorno continental o marino debido a que generalmente alteran el entorno biótico y abiótico, como ocurrió en el recorrido de algunos huracanes como Gilberto o Wilma. Debe hacerse notar que los beneficios del turismo no llegan a toda la población de la zona y de la región, debido a que la mayoría de las inversiones son de extranjeros y buena parte de las ganancias no circulan en el país.

Cuando una zona turística es afectada por un fenómeno ciclónico, inmediatamente reci-

be los mayores recursos económicos y apoyos para que en el menor tiempo posible pueda quedar restablecida y continúe con la recepción de turistas como ha ocurrido con las trayectorias que han impactado como en 1988 con el huracán “Gilbert”, en 1990 “Diana”, en 1995 “Opal” y “Roxanne”, en 1996 “Dolly”, en 2000 “Gordon”, en 2003 “Claudette”, en 2005 “Emily”, “Stan” y “Wilma” y en 2007 “Dean”. Los ciclones tropicales no son fenómenos recientes, a pesar de sólo contar con 32 años el establecimiento de la zona turística costera en Quintana Roo, los impactos por este tipo de fenómenos de origen marino son conocidos desde tiempos pretéritos por los asentamientos prehispánicos como los Mayas y los indígenas de la cuenca del Caribe que lo asociaron con la deidad del viento “Jurakán”.

Con base en las estadísticas de INEGI Quintana Roo en algunas cuestiones económicas tiene las características siguientes:

- A nivel nacional Quintana Roo es la segunda entidad, después del Distrito Federal en población ocupada en el sector terciario (turismo, tabla 1).
- En Quintana Roo las actividades terciarias se encuentran ocupadas por el sexo femenino en un 88%.
- La tasa neta mayor de participación económica de la República Mexicana promedio nacional de 58.4%) es el Estado de Quintana Roo con un 69.1%.
- En Quintana Roo las inversiones extranjeras que ingresan se canalizan en un 61.1% en hoteles y otros servicios de alojamiento temporal, específicamente en el año 2006 de un total de \$665 026.5 dólares que ingresaron, \$406 285.7 (61.1%), se canalizaron al turismo (figuras 8 y 9).

Tabla 1. La estructura de población ocupada según el sector de actividad por entidad federativa, 2007.

Actividades	Nacional (%)	Quintana Roo (%)
Primarias	13.5	6.3
Secundarias	26.1	18.2
Terciarias	59.6	75.1
No especificado	7	0.4

SISTEMAS AGRÍCOLAS

Los estados estudiados (Tabasco, Sinaloa y Quintana Roo) tienen una vocación muy diferente para la agricultura, ya que en Quintana Roo la naturaleza de los suelos, la humedad y la disponibilidad del agua limitan efectuar siembras extensivas de semillas y plantas.

En Tabasco, el factor limitante es la superficie cultivable, ya que más del 71% de su superficie corresponde a sistemas hídricos (lagunas, pantanos y ríos) y a este factor se suma otra amenaza constante en el estado que es la presencia de las actividades petroleras,



Figura 8. Estructura hotelera en Cancún.

Fuente: http://topofertas.com/externo/mapas/rivieramaya/cancun_hotelzone.jpg

cuyos desechos ponen en riesgo a los cultivos ya sea por contaminación directa (derrames, contaminación atmosférica y de los mantos freáticos, rupturas de oleoductos, explosiones) así como el constante uso de plaguicidas y fertilizantes. A pesar de ello, el estado mantiene un nivel intermedio de producción entre Quintana Roo y Sinaloa.

Al estado de Sinaloa se le conoce como el granero de México y su superficie sembrada es de casi 10 veces más que Quintana Roo y 5 veces más que Tabasco. La gran superficie cultivable, la calidad agrícola de sus suelos, la disponibilidad de agua, lo convierten en una de las más valiosas regiones agrícolas de América Latina.



Figura 9. Estructura hotelera en el litoral de Quintana Roo.

Fuente: <http://www.cancunhoteles-mx.com/MapasMexicoCancun/>

En la figura 10 se detallan la superficies sembradas, las superficies cosechadas y su valor en moneda nacional de las cosechas en los 3 estados, para el ciclo agrícola 2006, según datos aportados por la Sagarpa. Así, Sinaloa sería

la entidad en donde las pérdidas agrícolas y económicas serían las más cuantiosas por los efectos de cambio climático, principalmente por la elevación del nivel del mar, la salinización y los impactos de los huracanes.

	Superficie sembrada	superficie cosechada	miles de pesos
QUINTANA ROO	122,799	118,733	1,102,976
TABASCO	242,101	224,020	3,452,316
SINALOA	1,267,636	1,105,591	18,829,977,584

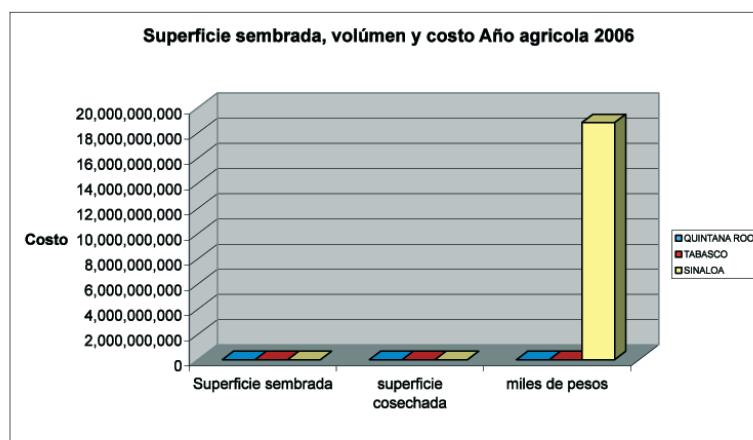


Figura 10. Superficie sembrada, colúmen y costo de tres estados costeros (Quintana Roo, Tabasco y Sinaloa. Año agrícola 2006.

CARRETERAS

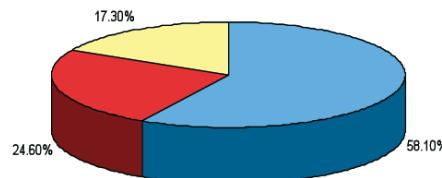
Los estados considerados en el estudio (Quintana Roo, Sinaloa y Tabasco) cuentan con una importante red de carreteras y caminos vecinales que son empleadas para diversos servicios (carga, transporte de pasajeros, turísticas) de los cuales hay un porcentaje importante que son de tipo costero. En las siguientes figuras se anotan los porcentajes por estado de caminos rurales, alimentadoras estatales y troncales federales para cada estado. Se observa que Quintana Roo es el estado con más caminos rurales, seguida por Tabasco y Sinaloa, en donde el desarrollo carretero es el mayor de los 3 estados (figura 11).

Los impactos esperados sobre las carreteras costeras de estos estados son su deterioro paulatino con el tráfico, la climatología (Huracanes, lluvias y tormentas), la salinización y sobre todo el aumento del nivel del mar por

la capilaridad. Se calcula que la construcción de un kilómetro lineal de carretera con 4 carriles y camellón es de aproximadamente de 2 000 000 millones USD y que en la República Mexicana hay cerca de 1 200 km de carreteras costeras. Por lo tanto la medida de mitigación más importante es el mantenimiento adecuado de las mismas y que en su nueva construcción o reconstrucción sean empleados materiales (selladores, cementantes y lubricantes) desarrollados con nuevas tecnologías que las hagan más resistentes y duraderas y que su costo -beneficio sea el óptimo.

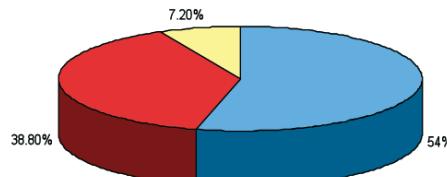
En la búsqueda de información se encontró un producto (polímero de alta resistencia) que puede ser ideal para el mantenimiento y protección del tramo carretero, denominado Base-Seal.

QUINTANA ROO



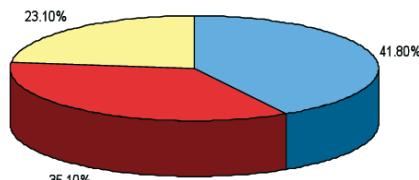
■ CAMINOS RURALES ■ ALIMENTADORAS ESTATALES ■ TROCALES FEDERALES

TABASCO



■ ALIMENTADORAS ESTATALES ■ CAMINOS RURALES ■ TROCALES FEDERALES

SINALOA



■ TERRACERIA ■ REVESTIDA ■ PAVIMENTADA

Figura 11. Porcentajes por estado de caminos rurales, alimentadoras estatales y troncales federales para cada estado.

Este es un producto que representa un novedoso desarrollo tecnológico que permite reducir los tiempos de ejecución en carreteras, aeropuertos, depósitos artificiales de agua, caminos vecinales y mejora las caracte-

rísticas de los suelos. Empezó a utilizarse en Texas y Florida en Estados Unidos, donde su uso demostró que era posible mejorar las características de los caminos tratados. Posteriormente, fue probado en otros países con

buenos resultados. La calidad de este producto es reconocida en el ámbito internacional ya que se encuentra a la vanguardia respecto a otros productos similares. Esta avalado por la American Association of State and Highway Transportation Officials (ASSHTO) en su norma vigente en Estados Unidos. En el mercado nacional, el empleo de este producto ha demostrado ser altamente eficiente no obstante, de tener poco tiempo de uso.

Las ventajas que representa contra otras alternativas son la reducción en los tiempos de mantenimiento y en los costos de reparación en la construcción de bases y sub-bases de carreteras con o sin asfalto. La aplicación de Base Seal junto con un sellador acoplado (Top Shield) genera una vía estable, resistente, por la cual se puede circular aún sin una cubierta protectora de asfalto.

Se emplearía con mucho éxito en la República Mexicana en los estados donde el tipo de suelo es en su mayor parte arcilloso o calizo y donde las gravas o arenas se obtendrían solamente en los depósitos aluviales o en los cauces de los ríos, con la ventaja de que el producto no es tóxico o corrosivo.

Se propone su uso como una opción para rehabilitar y construir una infraestructura carretera durable y resistente con nuevas tecnologías, que permita cubrir las necesidades de las políticas ambientales actuales, con miras a solucionar los efectos del cambio climático en la infraestructura carretera.

El producto proporciona ventajas económicas, ya que genera un ahorro de 30 a 50% de un camino rehabilitado antes de la colocación de carpeta asfáltica y su aplicación requiere de menos pasos para la construcción que el sistema tradicional y así, el valor relativo al soporte.

Dos ejemplos de su uso en México son : la estabilización de un tramo carretero en la autopista México-Tuxpan, y la plataforma de mantenimiento de la Compañía Mexicana de Aviación S.A. de C.V. en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Base Seal empezó a utilizarse desde 1991 para mejorar carreteras públicas de los estados de Florida y Texas en Estados Unidos. Su aplicación demostró que el costo total de construcción disminuyó entre un 30 y 40 %, y que los caminos en los que se aplicó la duración de los mismos se incrementó. Estos resistieron los daños derivados de inundaciones, a pesar de haber estado sumergidos por más de diez días. En el siguiente ejemplo se compara el deterioro de un camino no tratado y otro en el que se aplicó Base Seal (figura 12).

Al paso de los años fue evidente que la ciudad tuvo que gastar más tiempo y dinero, dándole mantenimiento a su carril, ya que una base débil se deteriora prematuramente creando una gran variedad de problemas. En cambio a la derecha el tramo del condado se mantuvo estable, en excelentes condiciones, y no fue necesario repararlo. El condado ahorró dinero utilizando Base Seal. La fotografía fue tomada en 1991 y muestra la diferencia aun patente.

Otro ejemplo fue el uso de Base Seal en condado de Walton, Florida, en Septiembre de 1998. Las fotografías (figura 13) ilustran como la base tratada con Base-Seal y Top-Shield que es un sellador acoplado, permaneció sin daño, aun después de recibir 55 cm de lluvia después del paso del huracán George en 1995, que azotó la zona.

La creciente generada por el paso del huracán, dejó sumergidos muchos puntos de esta carretera, en los cuales la base permaneció in-



Figura 12. Carretera es Walden Road en Texas, construida en 1987. El tramo de la izquierda, que pertenece a la ciudad no fue estabilizado con Base Seal, el tramo de la derecha perteneciente al condado fue tratado con Base Seal.

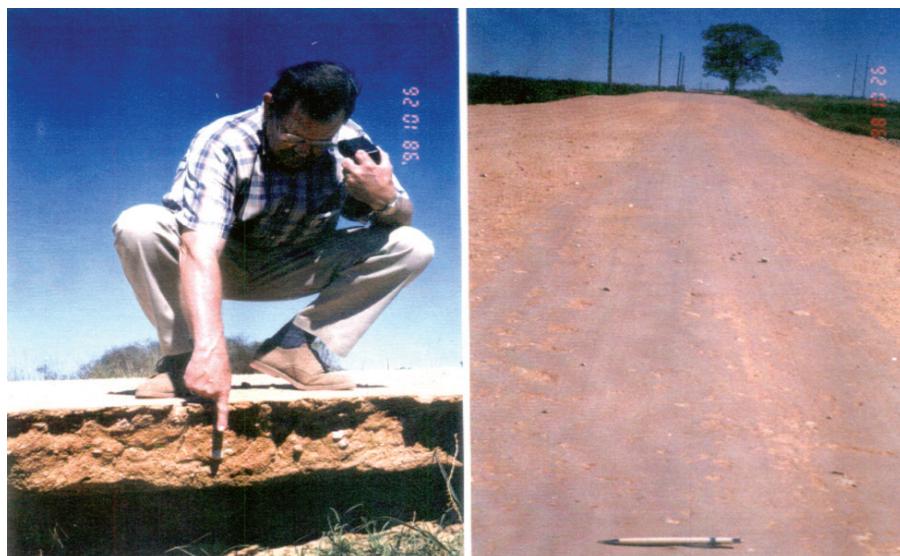


Figura 13. El camino del Condado de Walton conservó la base después del paso del Huracán George, durante el cual socavó la sub-base y se perdió la carpeta asfáltica en algunas zonas. La misma terracería (derecha) muestra la base sin la carpeta asfáltica.

tacta y sin daño. Otras bases que no fueron tratadas con Base-Seal y Top-Shield fueron severamente dañadas por la lluvia.

Estos productos se han utilizado en India, China, España, Italia, Filipinas, Alemania,

Guatemala, Panamá y otros países con resultados similares.

Reducción del coeficiente de permeabilidad: 10^{-7} a 10^{-9} cm / seg. * En términos de intervalo de gradiente unitario*.

Los estudios científicos independientes revelan que cuando Base-Seal alcanza su máxima viscosidad, el resultado es un gel que se polimeriza. Esto genera un enlace fuerte a la base, tiene una acción impermeable, nula acción capilar y bloqueando la filtración, no es biodegradable.

Otros ahorros :

- Reducción en el consumo de agua
- Eliminación de la necesidad de importar agregados
- Reducción de la mano de obra para instalación y del tiempo de maquinaria
- Costos

Se calcula que su aplicación por kilómetro lineal requiere de al menos 25 tambores del producto, cuyo costo es de :

Tambores de 208 litros (55 galones) al 100% de concentración \$ 3 500.00 USD.

Presentación del producto Top-Shield :

Tambores de 208 litros (55 Galones) \$ 1 750.00 USD.

LITERATURA CITADA

- Agraz-Hernández, C.M., 1999. Reforestación experimental de manglares en ecosistemas lagunares estuarinos de la costa Noroccidental de México. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Nuevo León. 132 p.
- Agraz-Hernández, C.M., J. Osti Saénz, J. Ordoñez Sulu, H. Cazares Rivas, y R. Zetina Tapia, 2004. Diagnóstico ambiental del ecosistema de manglar en la Laguna de Nichupté Bojórquez, Cancún. Quintana Roo. Apoyado por la CONABIO. Informe técnico final. 340 p.
- Aksornkoae, S. 1995. Reforestación de bosques de manglar en Tailandia. En: C. Field. Restauración de manglar ISME y OIMT. pp. 55-67.
- Benítez Prada, D., 2003. Creación de áreas de manglares en Islas de dragados como apoyo potencial a las pesquerías en la Bahía de Navachiste, Sinaloa. México. Universidad Autónoma de Sinaloa y Comisión Nacional de Pesca y Acuacultura, Mazatlán.
- Bojórquez, R.C., y M. Prada, 1988. Transplante de plántulas de *Rhizophora mangle* (Rhizophoraceae) en el Parque Nacional Corales de Rosario. Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 36(2b): 555-557.
- Chan, H.T. 1996. Mangrove reforestation in Peninsular Malaysia: a case study of Matang. In: C. Field (ed.) Resotoration of mangrove ecosystems. ISME/ITTO. Okinawa. pp. 64-75.
- Cintrón, G., 1982. Management of stress in mangrove ecosystems. Simposio Internacional sobre Utizao de Ecosistemas Costeiros: Planeamiento, Poluicao e Productividade, Río Grandes-RS. Department of Natural Resources of the Commonwealth of Puerto Rico, and Yara Schaeffer-Novelli, Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo, Brasil. 22 p.
- Fosberg, F.F., 1971. Mangroves versus tidal waves. *Biology Conservation*, 4: 269-79.
- Kinch, J.C., 1975. Efforts in marine revegetation in artificial habitats. p 102-111. In: Lewis (eds) Proc. 2nd Annual Congrenee on Restoration of Coastal Vegetation in Florida, Hillsborough Community College, Tampa, Florida.

- Lewis III, R.R., 1979. Large scale mangrove restoration in St. Croix, U.S. Virgin Islands. p.231-242. *In:* Cole, D.P. (Ed), Proceedings of the Sixth Annual Conference on Restoration and Creation of Wetlands. Hillsborough Community College, Tampa, Florida.
- Lewis, E.A., C.S. Lewis, W.H. Fehring y J.A. Rodgers, 1979. Coastal habitat mitigation in Tampa Bay, Florida. *In:* us Department of Agriculture, Proc. Mitigation Symposium. Colorado State University. Ft. Collins, Colorado.
- Lewis, R.R., 1982. Mangrove forests. p. 153-172. *In:* R.R. Lewis (eds.) Creation and Restoration of Coastal Plant Communities. CRC Press, Boca Raton, Florida. USA.
- Pulver, T., 1976. Transplant techniques for sapling mangrove trees, *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa*, and *Avicennia germinans* in Florida. Florida Department of Natural Resources, Petergung, Florida. USA. 2: 1-14.
- Saenger, P., 1996. Mangrove restoration in Australia: a case study of Brisbane Internacional Airport. p. 36-51. *In:* C. Field (ed.). Restoration of mangrove ecosystems ISME/ITTO, Okinawa.
- Sánchez Paéz, H., G.A., Ulloa-Delgado y R. Alvarez León, 2000. Hacia la recuperación de los manglares del Caribe de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Asociación colombiana de reforestación de ecosistemas de manglar. ISME y OIMT: 157-175.

Vázquez-Navarrete, C.J., E.E. Mata-Zayas, y D.J. Palma-López, 2010. Valoración económica de los servicios ambientales de los humedales de la Chontalpa, Tabasco: un enfoque exploratorio a nivel local p. 493-508. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICM y L, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Valoración económica de los servicios ambientales de los humedales de la Chontalpa, Tabasco: un enfoque exploratorio a nivel local

C. J. Vázquez-Navarrete, E. E. Mata-Zayas y D. J. Palma-López

RESUMEN

La valoración económica de los servicios ambientales es una disciplina naciente que ha tenido un gran eco en la sociedad contribuyendo a integrar los objetivos individuales de diferentes disciplinas en un objetivo de grupo. Esta integración permite potencializar los avances técnicos y ofrece una mayor claridad sobre la importancia de los ecosistemas desde la perspectiva económica. El presente trabajo propone el desarrollo e implementación de un instrumento para la valoración económica de los servicios ambientales en la región de la Chontalpa, Tabasco, para coadyuvar en la generación de conocimiento estratégico sobre sus ecosistemas. El instrumento consistió de tres etapas: (1) clasificación y delimitación de los polígonos de los ecosistemas naturales y agroecosistemas, (2) selección y adecuación del precio por unidad de superficie de 17 servicios; (3) cuantificación del valor económico parcial y total de los servicios. Los principales resultados que se presentan son: una visualización eficaz y eficientemente del valor económico total de la región de la Chontalpa (1 956 millones de USD), equivalente al 12% del PIB estatal total; los ecosistemas naturales aportaron el 84% del valor total y la zona de inundación (humedales) concentró el 49.4% del total, principalmente por servicios de regulación de agua, regulación de contingencias y suministro de agua. La producción de alimentos y materias primas representó el 76% del valor de los agroecosistemas. La conservación de este capital natural es responsabilidad de la sociedad que está aprovechando o resguardando estos ecosistemas. Profundizar en la información técnica y monitorear los cambios del valor económico son recomendaciones importantes.

Palabras clave: Valoración económica, servicios ambientales, Región La Chontalpa-Tabasco,

INTRODUCCIÓN

Actualmente, es ampliamente aceptada la importancia que los ecosistemas tienen para mantener el bienestar humano. El concepto de servicios ambientales se generó para entender las relaciones entre los ecosistemas y el bienestar humano, entendidos éstos como las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los conforman dan sostén a la vida en el planeta. Se clasifican en servicios de regulación que permiten al ser humano contar con condiciones ambientales estables; servicios de provisión, aquellos en que los ambientes proveen de insumos al ser humano; servicios de sustento, en donde los procesos ecológicos básicos aseguran el funcionamiento adecuado de los ecosistemas y el flujo de todos los servicios; y por último, los servicios culturales, aquellos beneficios espirituales, recreativos o educacionales (Millenium Ecosystem Assessment, 2005; Balvanera y Cotler, 2009; Bello *et al.*, 2009).

Sin embargo, es poco lo que se sabe de cómo y en qué medida los ecosistemas inciden en la satisfacción de las necesidades humanas (Bennet y Balvanera, 2007). Por ello, los trabajos sobre la valoración de los servicios ambientales se proponen mostrar a la sociedad los beneficios que se obtienen de los ecosistemas a través de un sistema de medición monetario (*e.g.* Costanza *et al.*, 1997; Daily, 1997; De Groot *et al.*, 2002; Sanjurjo-Rivera e Islas-Cortés, 2007). Los enfoques de la va-

loración y las herramientas disponibles para hacerlo son múltiples y complejas (Howarth y Farber, 2002; Winkler, 2006; Chen *et al.*, 2009a; Chen *et al.*, 2009b), y también requieren del entendimiento de los múltiples componentes y procesos involucrados en el ecosistema, y la valoración de algunos o todos esos componentes (Farber *et al.*, 2002; Chan *et al.*, 2006; Balvanera y Cotler, 2007). Además, no todos los ecosistemas de un mismo tipo proveen todos los mismos tipos de servicios, y por lo tanto su valor puede ser diferente, pues factores tales como el clima, la geología, la ubicación geográfica, la historia ambiental y la influencia humana afectan de manera diferencial el funcionamiento de cada ecosistema (Bello *et al.*, 2009). Es importante mencionar que algunos los servicios ambientales suministrados por los sistemas naturales han sido tradicionalmente subvalorados debido a que la disponibilidad natural de los recursos se ha considerado ilimitada (Barzev, 2002). Sin embargo, a partir de la degradación ambiental y sus consecuencias, el valor de estos servicios ambientales tiende a adquirir mayor importancia y dimensión.

En este contexto, en el presente estudio se hace una propuesta para valorar económicamente los productos y servicios de los ecosistemas, utilizando como caso de estudio, aquellos contenidos en la región de la Chontalpa, Tabasco, ubicada en la llanura costera del golfo sur de México.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar el valor económico de los servicios ambientales de los ecosistemas naturales y agroecosistemas en la región de la Chontalpa.

- Determinar el valor económico total y el valor económico por unidad de superficie para cada servicio ambiental y tipo de ecosistema.
- Identificar los ecosistemas y regiones de mayor valor económico por concepto de servicios ambientales.

OBJETIVO PARTICULAR

- Generar un instrumento exploratorio para valorar económicamente los servicios ambientales de los ecosistemas de la región de la Chontalpa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estado de Tabasco se encuentra dividido por sus características naturales y políticas en cinco regiones: Centro, Sierra, Ríos, Pantanos y Chontalpa (Barba-Macías *et al.*, 2006). El presente estudio abarca cuatro municipios de la región de la Chontalpa: Cárdenas, Comalcalco, Huimanguillo y Paraíso; ocupando una extensión de 6 938 km², en la llanura costera del Golfo sur, y dominada por humedales (Sánchez y Barba-Macías, 2005). La región de la Chontalpa limita al norte, con el Golfo de México; al sur, con el estado de Chiapas; al este, con los municipios de centro y Jalpa de Méndez y, al oeste, con el estado de Veracruz. En ella se localizan los ríos Samaria, Mezcalapa, Tonalá y Santana, con sus principales afluentes y lagunas. El terreno es plano con ligeras elevaciones en dirección al sur, pasando por la planicie aluvial, lomeríos suaves, lomeríos pronunciados y la sierra, aunque es de resaltar que las altitudes van de 0 a 300 msnm

y únicamente el cerro Mono Pelado alcanza una altura de 970 metros.

De acuerdo con Ortiz-Pérez *et al.* (2005), Zavala *et al.* (2006) y Palma-López *et al.* (2007), en ésta área se distinguen seis zonas fisiográficas (figura 1): costa, llanura de inundación, planicie aluvial, vega de río, lomerío y sierra. La ocupación de la región de la Chontalpa se subdividió en ecosistemas naturales y agroecosistemas, además de infraestructura o suelos desnudos. Los ecosistemas naturales identificados fueron: acahuil, cuerpo de agua, mangle, matorral, palmar inundable, selva alta perennifolia, selva mediana inundable, selva baja inundable, selva mediana perennifolia y vegetación hidrófila. Los agroecosistemas más importantes fueron pastizales y cultivos perennes. La distribución de estos ecosistemas se muestra en la figura 2. Para delimitar estos ecosistemas se realizó una clasificación supervisada de imágenes SPOT 2009 a una



Figura 1. Zonas fisiográficas de la región de la Chontalpa.

escala 1:250,000 por medio del programa ERDAS Image.

SERVICIOS AMBIENTALES

El número de servicios ambientales seleccionados fueron 17, de los cuales siete están referidos a servicios de regulación, cinco de sustento, tres de suministro y dos de servicios culturales. Los servicios ambientales utilizados en la valoración económica de los ecosistemas fueron los siguientes (tabla 1):

VALORACIÓN ECONÓMICA

Desde el punto de vista económico, la valoración de un producto o servicio x está representada por una operación sencilla pero muy poderosa: el producto de la cantidad de un bien o servicio (Q_x) por el precio unitario de dicho bien o servicio (P_x):

$$V_x = Q_x \cdot P_x \quad \text{ecuación 1}$$

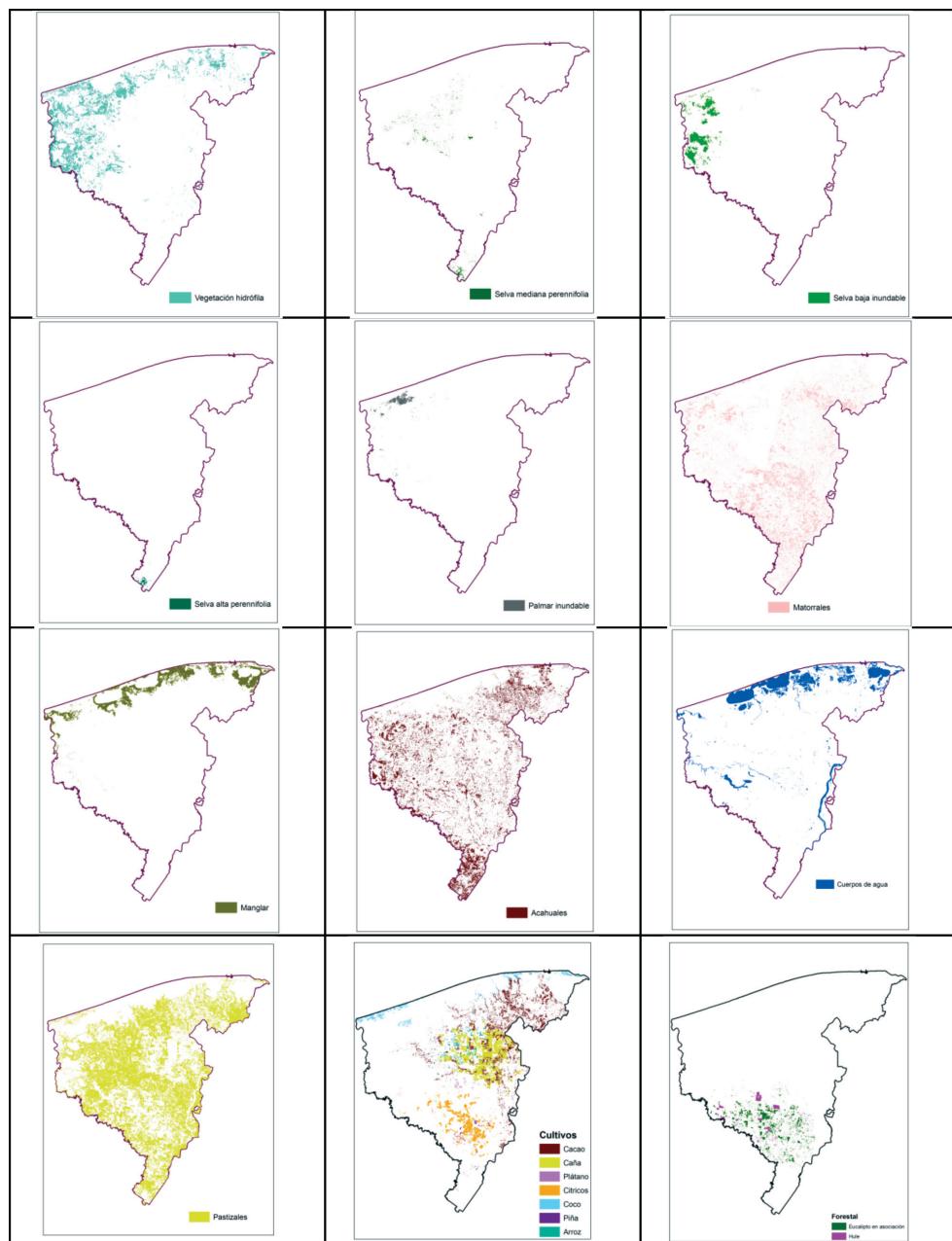


Figura 2. Distribución de los ecosistemas naturales y agroecosistemas delimitados para la región de la Chontalpa, Tabasco. Escala 1:250,000.

Tabla 1. Listado de Servicios ambientales cuantificados y valorados económicoamente en la región de la Chontalpa, Tabasco.

Servicios de regulación	Servicios de sustento	
Regulación de gases	Suministro de agua	
Regulación del clima y de la calidad de aire	Formación de suelos	
Regulación de contingencias o desastres naturales	Polinización	
Regulación del agua (flujos hidrológicos)	Control biológico	
Regulación de la erosión	Hábitat	
Regulación del ciclo de los nutrientes		
Purificación del agua y tratamiento de residuos		
Servicios de aprovisionamiento		Servicios culturales y de recreación
Alimento	Recreativos y/o educativos	
Materias primas	Culturales	
Materiales genéticos		

Donde

V_x es igual al valor total del bien (x).

Q_x es la cantidad del bien o servicio (x).

P_x es el precio unitario del bien o servicio (x).

El proceso para realizar la valoración económica se compone de por lo menos tres etapas. 1) Cuantificación del bien a valorar, esta cuantificación puede ser tan sencilla, como contar el número de productos o servicios que se quieren valorar, o tan compleja, como se estipula en los contratos de compra-venta de un bien en la bolsa de valores de Nueva York. 2) Cuantificación del precio del producto o servicio, el cual puede obtenerse mediante diferentes enfoques, el más conocido es el precio de mercado; en el cual el proceso de negociación, entre los productores (oferta) y los consumidores (demanda) optimizan la formación del precio. El precio también estará influenciado por regulaciones que pue-

den incluir aspectos monetarios, políticos, ambientales, de seguridad, geográficos entre otros. De esta forma, la formación del precio puede ser una actividad compleja y alejada del proceso natural de negociación: el mercado. 3) Cuantificación del valor, el proceso de cómputo del valor se expresa como el valor total de cierta cantidad de bienes o servicios (V_x). La importancia de este valor se expresa por las propiedades inherentes de la misma: aditividad, comparatividad y continuidad. La “aditividad” permite la valoración de un conjunto de bienes o servicios semejantes o diferentes. La “comparatividad” busca hacer una evaluación de las semejanzas (o diferencias) entre grupos de productos, los cuales se distinguen por una característica específica. La “continuidad” se refiere a que el valor puede ser calculado para diferentes puntos temporales, es decir una comparación a través del tiempo.

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA

La metodología para valorar económicamente los servicios ambientales de los ecosistemas contenidos en la Región de la Chontalpa a nivel localidad consistió en tres etapas.

1. Generación de una base de datos cartográfica de las zonas fisiográficas y los ecosistemas de la región de la Chontalpa, así como la cuantificación de la superficie de cada polígono. Para una revisión del procedimiento sobre la generación de la base de datos y el mapa de ecosistemas y zonas fisiográficas ver Vázquez-Navarrete *et al.* (2009).
2. Creación de una base de datos sobre el precio de los servicios ambientales que pueden ser asignados a los ecosistemas correspondientes a la región de la Chontalpa. Para ello se realizaron las siguientes actividades: (i) se realizó una revisión completa pero no exhaustiva en las bases de referencia a nivel internacional (Web of Science y Scopus) con el propósito de identificar los valores económicos que ofrecen los servicios ambientales según el ecosistema respectivo y con especial atención con aquellos ecosistemas identificados en la región de la Chontalpa. (ii) se realizó una depuración y adecuación de los valores económicos de los servicios ambientales considerando las condiciones biológicas, físicas, socio-económicas, y geográficas de los ecosistemas naturales en la región de la Chontalpa. (iii) Finalmente, se generó una matriz de valores económicos en la cual se presentan, los servicios ambientales identificados para cada ecosistema natural, los valores económicos correspondientes a cada servicio ambiental (expresado en dólares de Estados Unidos

por hectárea –USD·ha⁻¹) y el valor económico total de cada ecosistema natural por concepto de la suma de cada valor correspondiente a sus servicios ambientales.

3. Cálculo de la valoración económica total de ecosistemas por polígono. Esta última etapa consistió en integrar la base de datos de los polígonos de las ecoregiones (es decir, las correspondientes a los ecosistemas y zonas fisiográficas identificadas en la sección de materiales) y la matriz de los valores económicos por cada servicio ambiental identificado para cada ecosistema. Dos resultados se obtienen de esta integración: (1) el cálculo del valoración económico parcial de los servicios ambientales.

$$VEPi_{xyz} = Si_{xy} * Vi_z \quad \text{ecuación 2}$$

Donde

$VEPi_{xyz}$ = El valor económico parcial para el servicio ambiental (z) del polígono (i), que corresponde al ecosistema (x) y la región fisiográfica (y), unidades en USD año⁻¹.

Si_{xy} = Superficie del polígono (i) correspondiente al ecosistema (x) y la región fisiográfica (y), unidades en ha.

Vi_z = Valor económico correspondiente al servicio ambiental (z), unidades en USD ha⁻¹ año⁻¹.

y (2) el cálculo del valor económico total de los servicios ambientales se obtiene de sumar los valores de la ecuación 2 para cada servicio ambiental presente en el polígono (i).

$$VETi_{xyz} = \sum_{x=1}^{x=n} Si_{xy} * Vi_z \quad \text{ecuación 3}$$

Donde

VET_i_{xyz} = El valor económico total del polígono (i), que corresponde al ecosistema (x) de la región fisiográfica (y), equivalente a la suma producto de los servicios ambientales ($z = z_1 + z_2 + z_3 + z_n$) presentes en el polígono (i) por la superficie del polígono (i), unidades en USD año⁻¹.

Enfoque

El enfoque de este estudio fue mixto. Por un lado, para cálculo del valor económico de los servicios ambientales de un ecosistema se emplearon técnicas cuantitativas. Por el otro lado, los resultados obtenidos permiten evaluar las ecoregiones desde un punto de vista cualitativo, asignando un valor a cada uno de ellos y de esta manera destacar la importancia de cada tipo de ecosistema.

Contexto de la investigación

Esta investigación se llevo a cabo con el propósito de cubrir un vacío en la generación de instrumentos cuantitativos para valorar económicoamente los servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas de zonas tropicales húmedas, con el propósito de medir el capital natural y estimar y proyectar a partir de esta información los posibles efectos producidos por las actividades antropogénicas (aprovechamiento, conservación y manejo o protección de ecosistemas), el cambio climático y los eventos naturales. El presente trabajo forma parte de este proceso y los resultados que se muestran son a partir de valores teórico-conceptuales o empíricos obtenidos de estudios a nivel internacional principalmente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ZONAS FISIOGRÁFICAS Y ECOSISTEMAS

Los polígonos resultantes del proceso de la clasificación de los tipos de vegetación y uso de suelo de la región de la Chontalpa fue de 90 872, los cuales cubren una superficie total de 693 884 ha, distribuidas en tres tipos de sistemas: ecosistemas naturales (304 010 ha), agroecosistemas (352 071 ha) y un área clasificada como infraestructura o suelo desnudo (37 803 ha). La región de la Chontalpa fue analizada de acuerdo a seis zonas fisiográficas: costa (42 270 ha), llanura aluvial (155 101 ha), llanura de inundación (224 534 ha), vega de ríos (77 255 ha), lomeríos (173 442 ha) y sierra (21 281 ha).

Los ecosistemas naturales incluyeron: acahuil (84 005 ha), cuerpo de agua (46 627 ha), mangle (31 232 ha), matorral (77 097 ha), palmar inundable (4 262 ha), selva alta perennifolia (506 ha), selva baja inundable (11 414 ha), selva mediana perennifolia (3 300 ha) y vegetación hidrófila (45 568 ha). Los agroecosistemas estaban compuestos por cultivos y plantaciones forestales: arroz (4 284 ha), cacao (41 298 ha), caña de azúcar (18 482 ha), cítricos (16 100 ha), coco (8 153 ha), eucalipto (14 320 ha), hule (3 580 ha), pastizal (244 063 ha), piña (1 273 ha) y plátano (518 ha).

VALORACIÓN ECONÓMICA DE SERVICIOS AMBIENTALES

El valor económico de los servicios ambientales para cada ecosistema en la región de la Chontalpa se obtuvo a partir de la metodología descrita anteriormente, en la tabla 2 se muestran estos valores económicos por unidad de superficie.

El análisis del valor económico de los servicios ambientales por tipo de área mostró que, por un lado, el promedio del valor económico de los ecosistemas naturales fue de 5 897 millones de dólares (USD) $ha^{-1} año^{-1}$. El ecosistema natural de mayor valor económico fue la vegetación hidrófila (15 199 USD $ha^{-1} año^{-1}$). Otros ecosistemas naturales con altos valores económicos incluyen los cuerpos de agua (8 498 USD $ha^{-1} año^{-1}$) y el matorral (7 559 USD $ha^{-1} año^{-1}$). Por otro lado, el valor económico

promedio de los agroecosistemas fue de 2 694 USD $ha^{-1} año^{-1}$, contrastando con el promedio de los ecosistemas naturales. La piña fue el agroecosistema con el mayor valor económico (8 286 USD $ha^{-1} año^{-1}$). Asimismo, el eucalipto y el plátano fueron agroecosistemas con altos valores económicos por unidad de superficie.

El valor económico total por unidad de superficie que se muestra en el cuadro 2 para los 17 ecosistemas se asignaron a los 90 872 polígonos respectivamente. Se generó un mapa donde se visualizan estos valores y se construyeron en forma separada para una mejor visualización (figura 3). Así, mientras los ecosistemas naturales se concentran en su mayoría en la parte norte de la región de la Chontalpa y un poco más en la región sierra (figura 3a), los agroecosistemas se ubican en la parte central de la región (figura 3b).

VALORACIÓN ECONÓMICA POR ECOSISTEMA Y ZONA FISIOGRÁFICA

El valor económico total de los servicios ambientales en la región de la Chontalpa ascendió a 1 956 millones de dólares lo cual con valores del 2007 representa el 12% del PIB estatal total (16 021 millones de dólares) y el 50% del PIB para la región de la Chontalpa (3770 millones de dólares). Este valor se desagregó en servicios ambientales, tipos de ecosistemas y zonas fisiográficas. Los servicios ambientales de alto valor económico fueron suministro de agua y regulación de contingencias, regulación del agua y tratamiento de agua representando cerca del 68% del valor económico total. Otros cuatro servicios ambientales destacaron por su valor económico

medio: materias primas, producción de alimentos, recreación, ciclo de nutrientes y refugio, los cuales en su conjunto cubren el 28% del valor económico total. Los ocho servicios ambientales restantes, que presentan valores económicos bajos y muy bajos representan en su conjunto el 4% del valor económico total.

La distribución espacial de la valoración económica de los servicios ambientales en los 90872 polígonos que corresponden tanto a ecosistemas naturales como a agroecosistemas se puede observar en la figura 4a. Es importante mencionar que los valores más altos tienen una relación positiva en función de dos condiciones: (i) el valor económico por uni-

Tabla 2. Valor económico de los servicios ambientales por unidad de superficie según tipo de ecosistema (USD ha⁻¹ año⁻¹).

Servicios ambientales															Valor				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	total	
Ecosistemas naturales																			
A	112	2.5	3.0	4.0	123	5.0	461	44	25	23	21	158	2.5	56	1.0	1 057			
B	5 445	2 117					665				41			23			8 498		
C	342						25	23	286	637	46			1316			6 149		
D	171										143	51	23		658			2 783	
E	133	168	15	38			1 512			220	24	6.5		171	8.9		7 559		
F	669	15	18	24	735	3.0	2766	261			32	945	123	336	6.0	5 960			
G	223	5.0	6.0	8.0	245	1.0	922	87			8	315	41	112	2.0	1 984			
H	446	1.0	12	16	49	2.0	1844	174			16	63	82	224	4.0	3 968			
I	265	3 341	3.0	76			324			439	47	13		342	17.6	15 119			
EN	199	362	1268	790	1 938	398	16	1 498	824	25	23	272	97	345	67	383	7	5 897	
J													860					860	
K	74	1.7	2.0	2.7	82	3.3	37	29	25	23	16	710	15	14	37	0.7	1 432		
L													1 796				1 796		
M													226					226	
N													509					509	
O	1.5	0.2	4.5	44	1.5		14	38	35		7 500		0.2	3.0		7 766			
P	1.5	0.2	4.5	44	1.5		14	38	35		268		0.2	3.0		533			
Q	7.0	0.1	3.0	29	1.0		87	25	23		130		0.1	2.0		307			
R													8 286				8 286		
S													5 238					5 238	
AE	9	19	2	4	3	49	2	307	94	31	29	2 003	3 803	3	11	1	2 694		

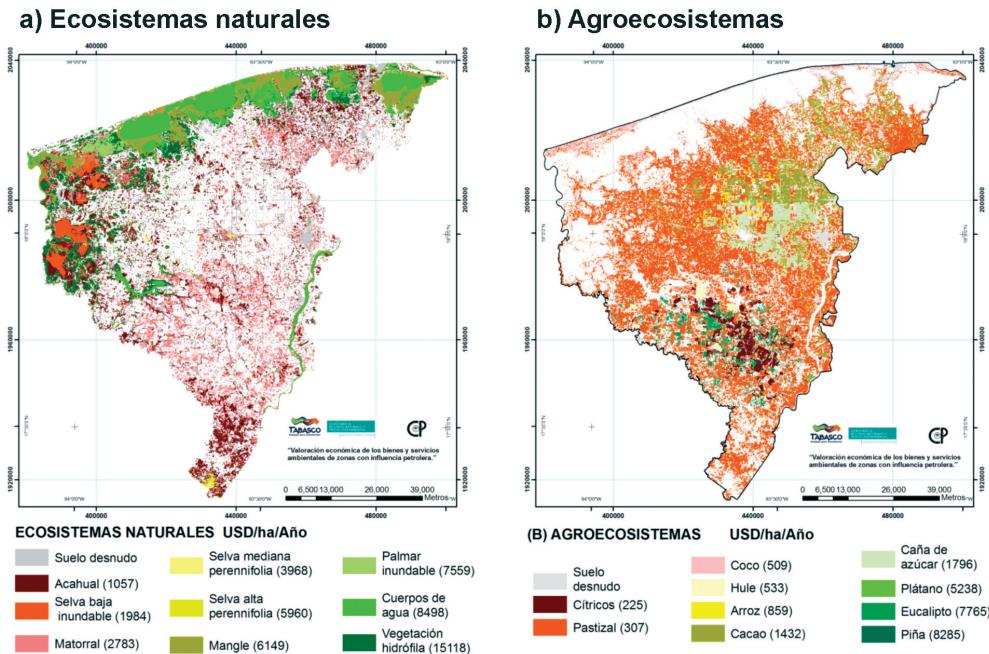


Figura 3. Distribución espacial del valor económico de los servicios ambientales por unidad de superficie según (a) Ecosistemas naturales (SAPHEN) y (b) Agroecosistemas (SAPHAE). Unidades en USD ha⁻¹ año⁻¹.

Ecosistemas: A: Acahual, B: Cuerpo de agua, C: Mangle, D: Matorral, E: Palmar Inundable, F: Selva Alta Perennifolia, G: Selva Baja Inundable, H: Selva Mediana Perennifolia, I: Vegetación Hidrófila, J: Arroz, K: Cacao, L: Caña, M: Cítricos, N: Coco, O: Eucalipto, P: Hule, Q: Pastizal, R: Piña, S: Plátano. EN Valor promedio de los ecosistemas naturales. AE: Valor promedio de los agroecosistemas.

Servicios ambientales: 1: Regulación de gases, 2: Regulación del clima, 3: Regulación de contingencias, 4: Regulación del agua, 5: Suministro de agua, 6: Retención de sedimentos y suelo, 7: Formación de suelo, 8: Ciclo de nutrientes, 9: Tratamiento de agua, 10: Polinización, 11: Control Biológico, 12: Refugio, 13: Producción de alimentos, 14: Materias primas, 15: Recursos genéticos, 16: Recreación, 17: Cultural.

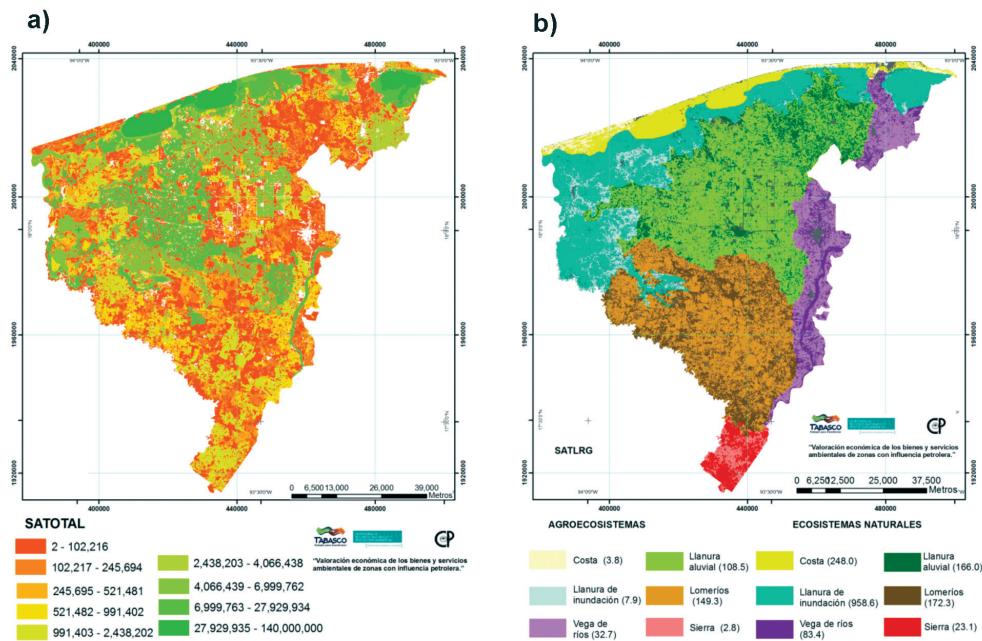


Figura 4. Valoración económica de los servicios ambientales, (a) según total de cada polígono de ecosistema (SATOTAL) unidades en USD y (b) según total por zona fisiográfica y total por ecosistema natural y agroecosistema (SATLRG), unidades expresadas en millones de dólares (USD).

dad de superficie y (ii) el tamaño de la superficie del polígono.

El valor de los servicios ambientales de los ecosistemas naturales se calculó en 1651 millones de dólares equivalente al 84% del valor económico total. En forma descendiente se obtuvieron los siguientes resultados (en miles de dólares): vegetación hidrófila (688 924 USD), cuerpo de agua (396 232 USD), matorral (214 561 USD), mangle (192 044 USD), acahual (88 822 USD), palmar inundable (32 217 USD), selva baja inundable (22 645 USD), selva mediana perennifolia (13 092 USD), selva alta perennifolia (3 015 USD). Los agroecosistemas produjeron 304 millones de dólares por concepto de servicios ambientales, lo cual corresponde al 16% del valor económico to-

tal y fueron clasificados de la misma manera que los ecosistemas naturales (valores en miles de dólares): eucalipto (111 202 USD), pastizal (74 957 USD), cacao (59 159 USD), caña de azúcar (33 198 USD), piña (10 547 USD), coco (4 153 USD), arroz (3 684 USD), cítricos (3 632 USD), plátano (2 716 USD), hule (1 909 USD).

Al sumar los valores económicos de cada polígono y agruparlos por zona fisiográfica y por grupo de ecosistemas (ecosistemas naturales y agroecosistemas), es posible identificar las regiones que contienen mayor valor económico por servicios ambientales (figura 4b). Por tanto, la zona inundable registra el mayor valor económico (966 565 miles de USD). Las zonas fisiográficas lomeríos (32 1625 USD),

llanura aluvial (274 027 USD) y costa (251 850 USD) comprenden el 43% del valor económico total. El 7.2 % restante se distribuye entre las zonas vega de ríos (116 061 USD) y sierra (25 918 USD).

Para determinar el valor económico de los servicios ambientales de los ecosistemas naturales y agroecosistemas en la región de la Chontalpa se diseño un instrumento exploratorio. Dicho instrumento fue desarrollado a partir de las ecuaciones 1, 2 y 3. Este tipo de instrumentos han sido utilizados por diversos autores, aunque son pocos los ejemplos en que ha sido implementado a nivel polígono (Chan, 2006; Grêt-Regamey, 2008). Son varias las ventajas de este último enfoque, entre las cuales destaca la identificación de propietarios susceptibles a recibir pago por servicios ambientales, delimitar zonas de aprovechamiento, conservación y protección, así como estimar el alcance de los impactos de las actividades productivas sobre los ecosistemas. En contraposición, estos instrumentos requieren de un sistema para validar en campo la cartografía generada con modelos matemáticos, así como de contar con las propias líneas de base específicas para los servicios ambientales de los ecosistemas con el fin de no sobreestimar o subestimar el valor de los ecosistemas (Barzev, 2002).

Los valores económicos calculados para los ecosistemas naturales corresponden en su mayoría con los estimados por otros autores (*e.g.* Constanza, 1997; Chen *et al.*, 2009b). Por otro lado, este estudio abrió la posibilidad de comparar los ecosistemas naturales y los agroecosistemas y esta información adicional

puede coadyuvar en la búsqueda de políticas no sólo productivistas sino multifuncionales, que permitan a los gobiernos obtener alimentos y materias primas de una manera sustentable como lo sugiere Wilson (2007).

Las áreas de mayor importancia fueron los ecosistemas relacionados con zonas de inundación, costa y sierra. Ecosistemas y zonas que fueron y siguen siendo menoscindidas por la falta de un conocimiento integral (Azqueta y Sotelsek, 2006; Dale y Polasky, 2007). Estudios recientes están proveyendo de información valiosa para hacer un mejor uso de estos ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), de esta manera será posible incorporar estas experiencias como parte de una serie de estrategias a favor de la salvaguarda de los ecosistemas de la región de la Chontalpa.

Algunas de las limitaciones de este estudio, fueron la utilización de bases de datos con información teórico-conceptual que pueden producir un sesgo en el cálculo de la valoración económica; el tratamiento homogéneo de los ecosistemas, es decir, no haberlos diferenciado por zona fisiográfica o calidad del ecosistema, lo cual puede generar una distorsión en el cálculo; finalmente, la falta de consenso entre la comunidad científica y las autoridades para determinar y seleccionar los algoritmos de cálculo para cada servicio ambiental. Sin embargo, estas limitaciones son temporales, que serán resueltas con mayores estudios, por ejemplo ya se están elaborando bases de datos con valores empíricos actualizados y de mayor precisión para la región.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La valoración de los servicios ambientales es una disciplina naciente que contribuye a integrar los objetivos individuales de diferentes disciplinas (biológicas, hidrológicas, agronómicas, químicas, etc) en un objetivo de grupo.

El poder de este enfoque se observa en otros estudios económicos que buscan mantener o mejorar la eficiencia total de los sistemas naturales y productivos.

Los ecosistemas naturales tienen valor y estos estudios los hacen más visibles tanto para los propietarios, los usuarios directos e indirectos y finalmente las autoridades. En el caso específico de la región de la Chontalpa, los ecosistemas en zonas de inundación y de sierra tienen ahora un elemento más concreto para ser tomados en cuenta en las decisiones gubernamentales y por la sociedad en general.

El instrumento exploratorio para valorar los servicios ambientales fue el punto de partida para el diseño de un mecanismo de valoración más sólido y confiable. Los proyectos

que incluyan esta nueva disciplina, contribuirán enormemente en el entendimiento y comprensión de nuestros recursos y su aprovechamiento desde un punto de vista holístico y práctico.

Por último, si se considera que el efecto del cambio climático global sobre los asentamientos humanos localizados en las zonas costeras es relevante (ya sea por la incidencia de huracanes y tormentas, aumentos de temperatura o inundaciones), puede ser igual de significativo sobre los recursos naturales de dichas zonas. De tal manera que, la combinación del cambio climático y las presiones por actividades humanas crearán efectos que incidirán, tanto de forma directa como indirecta, en el bienestar de la población, y los bienes y servicios provistos por los ecosistemas, así como en la biodiversidad que albergan. Es por ello que hoy más que nunca es necesario contar con ecosistemas costeros que estén intactos o en buenas condiciones que aseguren el mantenimiento de estos servicios.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado con financiamiento de la Secretaría de Recursos Naturales y Protección al Medio Ambiente (SERNAPAM) , el Comité de Planeación para el Estado del estado de Tabasco (COPLADET), y Pemex, bajo el convenio ACU-039-09 “Valoración económica (relación costo-beneficio)

de los bienes y servicios ambientales en zonas con influencia petrolera” No. R0068. Los autores desean expresar su agradecimiento a dichas dependencias para la realización de este estudio. Los mapas fueron elaborados por el MC Antonio López-Castañeda.

LITERATURA CITADA

- Azqueta, D., y D. Sotelsek, 2006. Valuing nature: from environmental impacts to natural capital. In International Seminar on Natural Resource Economics. Quirama, Colombia. 22-30 pp
- Balvanera, y Cotler, 2007. Los servicios ecosistémicos y la toma de decisiones. *Gaceta Ecológica*, 84-85: 117-123.
- Balvanera, P., y H. Cotler, 2009. Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. p. 185-245. En: Capital Natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio.,CONABIO. México.
- Barba, E., 2005. Valor del hábitat: Distribución de peces en humedales de Tabasco. *ECOfronteras*, 25:9-11.
- Barba-Macias, E., J. Rangel-Mendoza y R. Ramos-Reyes, 2006. Clasificación de los Humedales de Tabasco Mediante Sistemas de Información Geográfica. *Universidad y Ciencia*, 22 (2):101-110.
- Barzey, R., 2002. Guía metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales. Un aporte para la gestión de ecosistemas y recursos naturales en el CBM. Corredor Biológico Mesoamericano CCAD, Managua, Nicaragua. 149 p.
- Bello, J., L. Ortiz, E. Ramírez-Chávez, R. Aquino-Juárez, S. Castillo-Domínguez, L. Gómez, D. Ocaña, y C.N. Vidaurri, 2009. Humedales: definición, servicios ambientales y amenazas. p. 54-65. En: J. Buenfil-Friedman. Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México. vol I. INE-Semarnat. 376 p.
- Bennet, E. M. y P. Balvanera, 2007. The future of production systems in a Globalized World: Challenges and opportunities in the Americas. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5: 191-198.
- Chan, K. M. A., M. R. Shaw, D. R. Cameron, E. C. Underwood, y G. C. Daily, 2006. Conservation Planning for Ecosystem Services. *PLOS Biology*, 4:2138-2152.
- Chen, N., H. Li, y L. Wang, 2009a. A GIS-based approach for mapping direct use value of ecosystem services at a county scale: Management implications. *Ecological Economics*, 68 (11): 2768-2776.
- Chen, Z. M., G. Q. Chen, B. Chen, J. B. Zhou, Z. F. Yang, y Y. Zhou, 2009b. Net ecosystem services value of wetland: Environmental economic account. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 14:2837-2843.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, y P., M. van den Belt, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387:253-260.
- Dale, V. H., y S. Polasky, 2007. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics*, 64:286-296.
- Daily, G. C., (ed.). 1997. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Island Press, Washington, DC.
- De Groot R.S, M. A. Wilson, M.J. R., y M.J. Boumans, 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41:393-408.
- Farber, S. C., R. Costanza, y M. A. Wilson, 2002. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological Economics*, 41: 375-392.
- Howarth, R. B., y S. Farber, 2002. Accounting for the value of ecosystem services. *Ecological Economics*, 41:421-429.

- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and human well-being: A framework for assessment. Island Press, Washington, DC.
- Ortiz-Pérez M. A., C. Siebe, y S. Cram S, 2005. Diferenciación ecogeográfica de Tabasco. Cap. 14: 305-322. En: J. Bueno, F. Álvarez y S. Santiago (eds) Biodiversidad del estado de Tabasco, UNAM-CONABIO. México. 386 p
- Sánchez y Barba, 2005. Biodiversidad de Tabasco. Pp. 1-16. En: Bueno J, Álvarez F, Santiago S (eds). Biodiversidad del estado de Tabasco. Instituto de Biología, UNAM-CONABIO. México. 386 p.
- Sanjurjo-Rivera. E., e I. Islas-Cortes, 2005. Las experiencias del Instituto Nacional de Ecología en la valoración económica de los ecosistemas para la toma de decisiones: Una descripción del valor de los bienes y servicios ambientales prestados por los Manglares. *Gaceta Ecológica*, 74:55-68.
- Vázquez-Navarrete, C.J, E. E. Mata-Zayas, D. J. Palma-López, A. López-Castañeda, y J. Zavala, 2009. Valoración económica (relación costo-beneficio) de los bienes y servicios ambientales en zonas con influencia petrolera. Informe Técnico. SERNAPAM, COPLADET, Pemex y Colegio de Postgraduados.
- Wilson, G.A., 2007. Multifunctional agriculture: a transition theory perspective. New York (Oxford University Press) and Wallingford (CAB International). 384 p.
- Winkler, R., 2006. Valuation of ecosystem goods and services (Part 1): An integrated dynamic approach. *Ecological Economics*, 59:82-93.
- Zavala C., J., D. J. Palma-López., R. H. Adams S., 1999. Geomorfología y suelos de los campos petroleros Sánchez Magallanes y la Venta Tabasco., Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. H. Cárdenas Tabasco. 29 p.

Botello A.V., S. Villanueva-Fragoso, J.L. Rojas-Galaviz, 2010. Consideraciones finales, p. 509-514. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMyl, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Consideraciones finales

A. V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, y J.L. Rojas-Galaviz

El cambio climático es en la actualidad uno de los mayores retos que el planeta enfrentará en un futuro muy cercano. En años recientes se ha hecho presente con el incremento de la temperatura provocado por el incesante incremento de la concentración de los “gases del efecto invernadero” o GEI como se les describe en la literatura científica.

Esta elevada concentración de GEI, provoca que las ondas de calor, las precipitaciones, el derretimiento de los polos y las sequías sean cada vez más frecuentes y de mayor duración e intensidad (Magaña, 2008).

Ante esta problemática es necesario crear una estrategia adecuada para reducir en lo posible los **riesgos del cambio climático**, por medio de la reducción de la **vulnerabilidad**. La estrategia de reducción del riesgo se compone de dos factores que son la **amenaza** y la **vulnerabilidad**, la primera es la probabilidad de que ocurra un evento o desastre y la segunda está ligada a las condiciones físicas, económicas, sociales y culturales de una región en específico que le otorga la capacidad de responder y/o reparar los daños causados por los impactos que el fenómeno genere, por lo tanto la vulnerabilidad está asociada directamente con factores socioeconómicos y culturales a la vez (Magaña, 2008).

Así, la estrategia para reducir el riesgo del cambio climático, debe estar orientada a la disminución de la magnitud del calentamiento global, por medio de la **mitigación**, es decir, re-

duciendo en lo posible las emisiones de gases GEI o bien incrementando su captura. Es necesario prepararnos para un nuevo clima por medio de la **adaptación**, es decir la reducción de la vulnerabilidad.

En el caso de las zonas costeras, resalta la enorme importancia ecológica, pesquera habitacional, industrial, turística, social y económica; que representan para la humanidad ya que del total de la población mundial, aproximadamente 65% habita en las zonas costeras, más del 45% de la pesca comercial en el planeta se realiza en sus entornos y en ella se genera una economía mundial del orden de 900 billones de dólares americanos cada año.

Sin embargo, las costas son altamente vulnerables a fenómenos extremos como son las tormentas y huracanes, cuyos efectos e impactos imponen altos costos a sus habitantes. Anualmente, cerca de 120 millones de personas están expuestas a ciclos tropicales, los cuales han sido las causas de muerte de más de 250 000 personas de 1980 al 2000.

También durante el siglo XX, el aumento del nivel de mar contribuyó significativamente al incremento de inundaciones, a la erosión costera y la pérdida de ecosistemas costeros, aunque con una amplia variación local y regional debido a otros factores. En los últimos años, los efectos del incremento de temperatura en las aguas costeras incluye la pérdida del hielo en las altas latitudes y más frecuentemente blanqueamiento de corales y mortalidad de algunas especies de peces comerciales.

La degradación de los ecosistemas costeros, especialmente los humedales y arrecifes de coral, ocasionan severas implicaciones para el bienestar de las sociedades costeras que dependen de los servicios y beneficios de sus usos. El incremento de las inundaciones y la

degradación de la calidad de agua dulce, de las pesquerías y otros recursos costeros podría impactar a cientos de millones de personas y los costos socioeconómicos serían incalculables.

En el caso de México, las zonas costeras del Pacífico, el Golfo de México y el Caribe, representan sitios vitales para las diversas actividades humanas, turísticas, sociales, económicas e industriales; de cuyos ingresos se benefician amplios sectores del país, además de que representan un gran porcentaje del Producto Interno Bruto nacional (PIB) según Toledo, 2005.

Por lo tanto, las nuevas y más intensas presiones a que se verán sometidos los litorales mexicanos, como son las anunciadas exploraciones y perforaciones de pozos petroleros para las costas de Veracruz, Campeche y Yucatán, el aumento de la producción de petróleo y del tráfico de buques para su movilización, obliga a que los estados costeros cuentan con eficientes sistemas de información y alertamiento, así como planes de contingencia para la prevención de desastres y desarrollen además infraestructura humana y tecnológica apropiada que diagnostique los impactos y efectos de los desastres o fenómenos hidrometeorológicos extremos.

La incesante actividad industrial, el intenso incremento de los desarrollos portuarios industriales, los desarrollos turísticos costeros in control y el incremento de los asentamientos humanos en las zonas costeras del país, aunados a los efectos del cambio climático global, serán un gran factor de presión para los ecosistemas costeros como los humedales y manglares, corales, pastos marinos, islas de barra, dunas y playas, estuarios, deltas y lagunas costeras; de cuya correcta función dependen

una alta productividad y la sobrevivencia de miles de especies de flora y fauna marina.

Sin duda los impactos y efectos del cambio climático para las costas mexicanas, serán diferentes en magnitud y características para los estados costeros que sean impactados por este problema.

Así, en Sinaloa, los mayores efectos serán sobre la agricultura (con ingresos cercanos a los \$ 2 000 000 000 de pesos), la pesca y sobre todo para la acuicultura, debido a que la mayoría de las más de 480 granjas camaronícolas que existen, están localizadas en áreas que serán inundadas por el ascenso del nivel del mar. Los costos económicos serán cuantiosos y de igual manera propiciarán la cancelación de numerosas fuentes de trabajo para las sociedades locales. Aunque el desarrollo turístico no es tan grande como en otras regiones, también contribuye con importante porcentaje a la economía regional y a la creación de fuentes de empleo.

Para los ecosistemas de manglar, es posible que exista una adaptación de las especies hacia tierra adentro, originando nuevos bosques de manglar y una nueva fisiografía de la región

En Quintana Roo, los impactos serán desastrosos para el turismo y por ende para la economía, ya que la gran mayoría de los complejos hoteleros y centros turísticos están asentados en áreas de posible inundación permanente por el ascenso del nivel del mar, aún cuando este se dé en bajos niveles como 60 cm.

Al igual que en Sinaloa, el manglar parece adaptarse a salinidades altas y es posible una migración de estos ecosistemas tierra adentro. Su mayor amenaza en la actualidad lo representa su incesante destrucción por la construcción de complejos hoteleros, y la modi-

ficación de su hidrología por la construcción de caminos, puentes y marinas.

Sin embargo, los ecosistemas de coral, estarán fuertemente amenazados y tendrán efectos muy negativos los aumentos de la temperatura, ya que propicia el fenómeno del blanqueamiento y el desarrollo de enfermedades emergentes que resultan en su destrucción en grandes áreas del Sistema Arrecifal Mesoamericano.

La remoción de sedimentos para la rehabilitación de las playas es otra gran amenaza en la región para importantes ecosistemas como los corales y pastos marinos, ya que alteran las funciones naturales de la costa que se basa en la interacción de manglares, corales y pastos marinos.

El aumento en frecuencia e intensidad de los huracanes en la región es sin duda la amenaza crítica más importante, ya que afectará no sólo a los ecosistemas costeros sino que además impactará las construcciones hoteleras, centros turísticos, viviendas y sobre todo a la población, propiciando fuertes pérdidas en la economía regional (Huracán Wilma 2005, más de \$10 000 000 000 millones de USD), en infraestructura y en ocasiones pérdidas de vidas humanas.

Finalmente, se debe considerar que debido a la naturaleza cárstica de la península de Yucatán el paulatino ascenso del nivel del mar y el aumento de la capilaridad, propiciarán la salinización de las fuentes de agua potable provocando la disminución de la calidad del agua para un gran número de poblaciones costeras, haciéndola inservible para uso humano, agricultura y procesos industriales.

Para la región del Estado de Tabasco, los efectos serán muy drásticos para la elevación del nivel del mar, ya que la mayoría del es-

tado se asienta en planicies bajas y zonas de fácil inundación, lo cual origina problemas a nivel de catástrofe como la inundación de la Ciudad de Villahermosa en octubre del 2007 (costo aproximado de \$31 000 millones de pesos. CEPAL, 2007) Gran parte de sus litorales presentan también una tasa de erosión muy alta, lo cual eleva la vulnerabilidad de la región y pone en riesgo a las poblaciones costeras, su infraestructura carretera, las instalaciones petroleras como el Puerto de “Dos Bocas” de donde se movilizan diariamente 1 800 000 barriles de petróleo crudo. Por la elevación del nivel del mar, también se verían amenazadas muchas lagunas costeras que son el sustento económico de un gran núcleo de pescadores dedicados a la captura del ostión principalmente.

Otra región que se vería muy afectada sería la de Pantanos de Centla, ya que la penetración de la cuña salina pondría en peligro a muchas especies dulceacuicolas que habitan esta región.

ACCIONES DE MITIGACIÓN:

- Evitar las descargas de aguas residuales directamente en ecosistemas sensibles como manglares y lagunas costeras.
- Fomentar el establecimiento y operación adecuada y permanente de plantas de tratamiento de aguas residuales en la zona costera.
- Contar con una base de datos actualizada de los aspectos más relevantes de la dinámica costera (residencia de masas de agua, cuña salina, mareas, florecimientos o surgencias, entre otros).
- Normar y vigilar el uso de agroquímicos, principalmente fertilizantes y pla-
- guicidas, debido al impacto que provocan en la zona costera.
- Aprovechar razonadamente los campos de cultivo, mejorando las técnicas agrícolas y evitando la deforestación con fines agropecuarios.
- Planificar las actividades relacionadas con la industria petrolera para evitar al máximo la perturbación que provocan en ecosistemas frágiles de gran importancia en la zona costera como los humedales.
- Controlar y minimizar los procesos de contaminación de toda índole para evitar la degradación acelerada de la zona costera aunado a eventos naturales y derivados del cambio climático global.
- Aplicar adecuadamente en tiempo y forma la normativa existente para controlar la pesca de aquellos recursos con riesgo de sobreexplotación o que ya están en esta problemática.
- Impulsar las modificaciones necesarias en la normatividad vigente que permitan el aprovechamiento sustentable, razonado, de los ecosistemas costeros.
- Proponer proyectos de normatividad faltante que contribuya a la conservación de los recursos naturales costeros, a la protección de poblaciones humanas en zonas costeras y la demás requerida, con el objetivo central de minimizar los impactos derivados del cambio climático global.
- Promover los estímulos económicos necesarios para favorecer a aquellas actividades que contribuyan a mejorar el estado de los ecosistemas costeros, como la acuacultura planificada, el or-

denamiento del territorio nacional, los censos industriales costeros, el registro de sitios de riesgo ambiental tanto natural como antropogénico y otros.

- Implementar Programas regionales de monitoreo de zonas costeras, sobre todo aquellos que puedan emanar datos para evaluar los efectos e impactos del cambio climático.
- Controlar y minimizar los procesos de contaminación (humana, urbana e

industrial) de toda índole para evitar la degradación acelerada de las zonas costeras.

- Minimizar las presiones humanas debidas a asentamientos y desarrollos turísticos e industriales sobre los ecosistemas costeros.
- Decretar zonas prioritarias como Áreas Naturales Protegidas y conservación del germoplasma en zonas de alta vulnerabilidad.

LITERATURA CITADA

Magaña Rueda V, 2008. El cambio climático global: comprender el problema. En: J. Martínez y A. Fernández (comp.) Cambio Climático: Una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Cuarta reimpresión.

Toledo Ocampo A., 2005. Marco conceptual: caracterización ambiental del Golfo de México, p. 25-52. En: A.V. Botello, J. Rendon-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agrz (eds.). Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias, 2da. Edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón. México, Instituto Nacional de Ecología, 696 p.

Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático

Se realizó en el Departamento de Difusión y Publicaciones
del Centro EPOMEX-Universidad Autónoma de Campeche.

Composición, diseño y proceso editorial a cargo de Jorge Gutiérrez Lara
Diseño de la cubierta a cargo de Juan Manuel Matú

Se terminó de imprimir en los talleres gráficos de SyG Editores, SA. de CV
Se tiraron 1 000 ejemplares más sobrantes por reposición



Instituto de Ciencias del Mar
y Limnología

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO