

CAMBIO CLIMÁTICO Y RECICLAJE DE CARBONO EN LOS HUMEDALES COSTEROS

Barry G. Warner, Ramón Aravena y Patricia Moreno-Casasola

Introducción

El planeta Tierra funciona como un sistema autorregulado, con estrechas interrelaciones, por lo que hoy en día frecuentemente se habla del Sistema Tierra. Ello significa que la propia vida sobre el planeta forma parte de él y lo ayuda a marchar bien. Los procesos biológicos interactúan de manera decidida con los procesos físicos para crear un ambiente planetario. En este contexto, la biología juega un papel fundamental en el mantenimiento del medio que crea un ambiente adecuado para la vida en el planeta. Este hecho se probó sin lugar a dudas con las muestras de hielo tomadas en Vostok, Antártica, que abarcaban un período de la historia del planeta de 420,000 años (Figura 1). Para tomarlas, se utilizaron cilindros de 3,623 metros de largo que extrajeron muestras de agua congelada bajo las condiciones atmosféricas que predominaban hace miles de años. Tres características resaltaban: la temperatura global y el ciclo de carbono de la tierra presentaron una dinámica temporal que a lo largo de este período mostró oscilaciones estrechamente relacionadas, como puede verse por la semejanza en la forma de las curvas; las temperaturas medias, mínimas y máximas así como algunos gases atmosféricos (bióxido de carbono y metano) evidenciaron un patrón de comportamiento regular a través del tiempo, en ciclos de aproximadamente 100,000 años; y finalmente, el rango en el cual la temperatura y las concentraciones de gases han oscilado, durante los cuatro ciclos que exhiben las curvas y que abarcan el último medio millón de años de la historia terrestre, registró límites superiores e inferiores claros. Es decir, los valores extremos máximos y mínimos no se dispararon sino que se mantuvieron dentro del mismo rango (Steffen y Tyson, 2001).

El término Sistema Tierra implica estrechas interrelaciones entre diversos componentes que producen un sistema de autorregulación. Incluye al conjunto de procesos físicos, químicos, biológicos y humanos que interactúan y que originan en la Tierra las condiciones adecuadas para que haya vida como la conocemos.

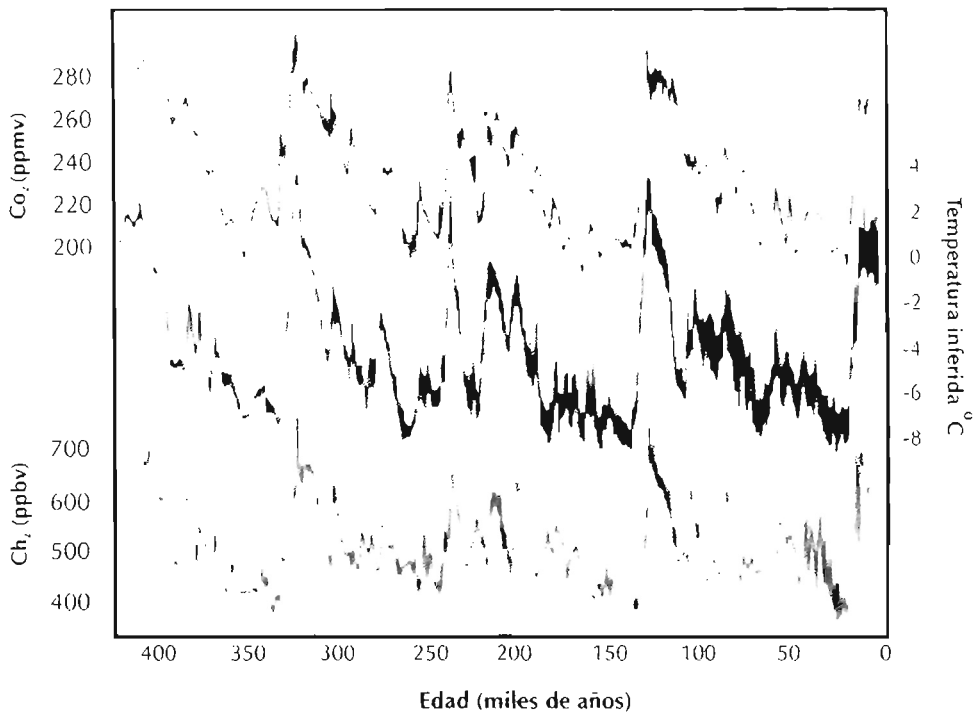


Figura 1 | Núcleo de hielo de Vostok, mostrando los patrones regulares del CO₂ atmosférico, concentraciones de CH₄ y temperatura a través de cuatro ciclos interglaciales, abarcando 420,000 años de historia de la tierra. Los límites superiores e inferiores de las tres variables están claramente delimitados, lo cual es típico de un sistema que se autorregula como es el Sistema Tierra. Redibujado de Steffen y Tyson (2001) y de Petit *et al.* (1999).

El término Sistema Tierra se refiere al conjunto de procesos físicos, químicos, biológicos y humanos que interactúan para transportar y transformar los materiales y la energía, y que, por lo tanto, provee las condiciones necesarias para la vida en este planeta. Este Sistema incluye el clima, es decir, el conjunto de componentes como son temperatura, precipitación, nubosidad, entre otros, pues muchos de los cambios en el funcionamiento del Sistema Tierra tienen que ver con el clima y sus alteraciones. Incluye, además, en su funcionamiento otros componentes y procesos biofísicos y humanos. Unos influyen en los otros y viceversa (Steffen y Tyson, 2001). Por ello, el cambio global va mucho más allá del cambio climático; éste es sólo una parte.

El cambio climático global es un fenómeno aceptado hoy en día por los científicos y los gobiernos de los países del mundo. Así mismo, el cambio global es real y se está acelerando, y va mucho más allá de un cambio puramente climático. Las actividades del hombre están influyendo de manera significativa, y de diversa forma,

en el funcionamiento del Sistema Terrestre. Los cambios antropogénicos se pueden identificar de manera clara más allá de la variabilidad natural y son de igual impacto y magnitud que algunas de las fuerzas de la propia naturaleza. El cambio global no puede entenderse como un sistema sencillo de causa-efecto. Su resultado puede visualizarse como una consecuencia múltiple, en cascada, que interactúa con interrelaciones y con cambios multidimensionales en escalas locales y regionales. Estos cambios están produciendo fuertes impactos a nivel de las condiciones climáticas, de las actividades económicas, en el bienestar del ser humano, en la capacidad de los ecosistemas para seguir proveyendo productos y servicios ambientales, y en el futuro el impacto será aún mayor.

El llamado cambio climático global va mucho más allá de una modificación climática. Afecta al conjunto de interrelaciones e interconexiones que vinculan los procesos y autorregulan al Sistema Tierra. Debe más bien denominarse y entenderse como un cambio global.

El cambio global es un fenómeno totalmente comprobado. Tiene efectos locales y regionales. Afecta no sólo el clima sino también la producción agropecuaria, las pesquerías, la hidrología y, en general, el bienestar del hombre.

Una de las principales características de la maquinaria planetaria es el conjunto de conexiones e interrelaciones que vinculan los procesos de una región con sus consecuencias en otras localizadas a miles de kilómetros de distancia. Ejemplos de ello son la circulación oceánica y la atmosférica, las cuales juegan un papel de gran importancia en el transporte de calor de los trópicos hacia los polos. Este transporte de materiales forma parte de los ciclos biogeoquímicos y vincula los procesos terrestres con los marinos a través de grandes distancias. El movimiento horizontal de agua en los ríos es otro proceso importante que une zonas aparentemente aisladas del planeta. También, transporta materiales y conforma corredores que unen las montañas con las áreas costeras, los sistemas terrestres con los acuáticos a lo largo y ancho de paisajes, desde una escala regional hasta una subcontinental. Los ríos constituyen vías mediante las cuales el carbón, el fósforo y otros elementos circulan en los ciclos biogeoquímicos en escalas de tiempos geológicos (Steffen y Tyson, 2001).

El cambio climático global

La energía que genera el Sol es una de las fuerzas motoras del clima en nuestro planeta. Al llegar a la Tierra, calienta la superficie y hace que el planeta refleje una parte de la energía recibida hacia el espacio; aproximadamente la tercera parte de la radiación solar que incide en el planeta es devuelta al espacio. De las dos terceras partes restantes, la mayoría es absorbida por la tierra y los océanos y el resto por la atmósfera. Así, se calienta la superficie de la Tierra y emite una radiación infrarroja. En la atmósfera, de manera natural, existen gases que atrapan el calor generado por la radiación solar; éstos ayudan a crear un ambiente de invernadero y por ello se denominan gases de invernadero. Sin ellos, la temperatura de la tierra sería 33 grados centígrados menor y no podría existir la vida como la conocemos hoy. Los gases de invernadero atrapan la radiación infrarroja y calientan la atmósfera. Constituyen el sistema natural de control de temperatura del planeta. Entre los más importantes están vapor de agua, bióxido de carbono (CO_2), ozono, metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Programa de Medio Ambiente Naciones Unidas). El efecto de invernadero artificial se produce cuando la radiación solar que choca con la Tierra no puede escapar hacia el espacio porque la concentración de gases que regularmente atrapa el calor ha crecido debido a las emisiones producidas por el hombre. En consecuencia, la temperatura atmosférica aumenta.

La atmósfera está compuesta por una serie de gases, los cuales atrapan parte de la radiación solar y así ayudan a calentar la Tierra. Ello permite la vida en nuestro planeta, ya que actúan como el sistema natural de regulación de la temperatura. Las actividades del hombre han aumentado la concentración de algunos de estos gases como el CO_2 que impide que la radiación solar escape hacia la atmósfera, produciéndose un incremento de temperatura.

Las actividades del hombre en la Tierra producen numerosos compuestos, algunos de los cuales son gases de invernadero. El problema viene cuando la cantidad de éstos en la atmósfera se incrementa. Por ejemplo, antes de la Revolución Industrial, la concentración de bióxido de carbono era de 280 partes por millón (ppm). En nuestros días es de 350 ppm, es decir, aumentó 25% (Figuras 2 y 3). Recientemente se

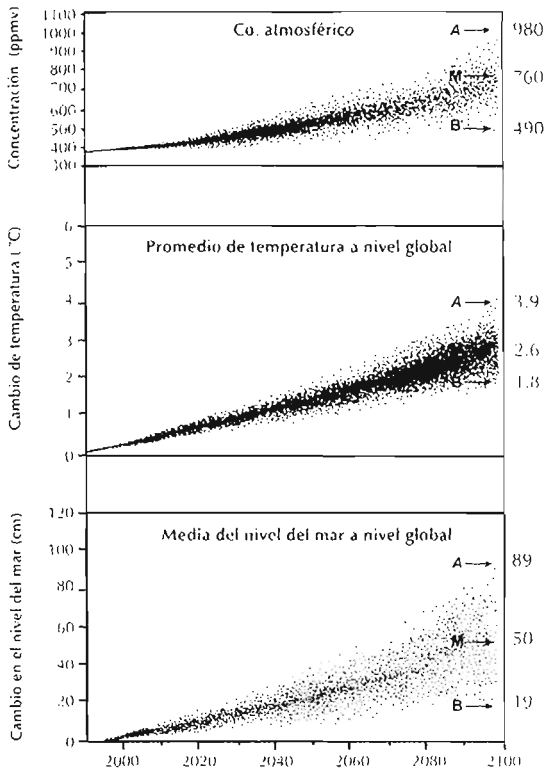


Figura 2 | El Panel de Científicos para el Cambio Climático ha producido modelos que presentan varios escenarios de cómo las concentraciones de CO₂, la temperatura media global y el incremento en el nivel del mar podrían ser durante el siglo XXI. Hay un escenario (A) donde se produce el cambio mayor, otro medio (M) y uno bajo (B). Tomado y redibujado de Hulm y Pernetta (1993).

han medido las concentraciones de CO₂ en la cima del Mauna Loa, donde se ha comprobado que no existe contaminación por las actividades del hombre. En 1958 se registró un valor de 316 ppm, y para 1996 se había incrementado a 369 ppm. En esta región las concentraciones de metano se duplicaron y las de óxido nitroso se elevaron en 15% (Programa de Medio Ambiente Naciones Unidas).

Los científicos consideran que los aumentos en las concentraciones de estos gases se deben principalmente a la combustión de fuentes de energía fósiles, a actividades industriales y a la deforestación. El dióxido de carbono se libera a la atmósfera cuando se queman combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), basura sólida y madera o material vegetal. El metano se origina durante la producción y transporte de carbón, gas natural e hidrocarburos, así como por la descomposición de desperdicios orgánicos en los rellenos de basura (inclusive los rellenos sanitarios) y la producción de ganado. El óxido nitroso es producto de actividades agrícolas e industriales, así como de la quema de basura y combustibles fósiles.

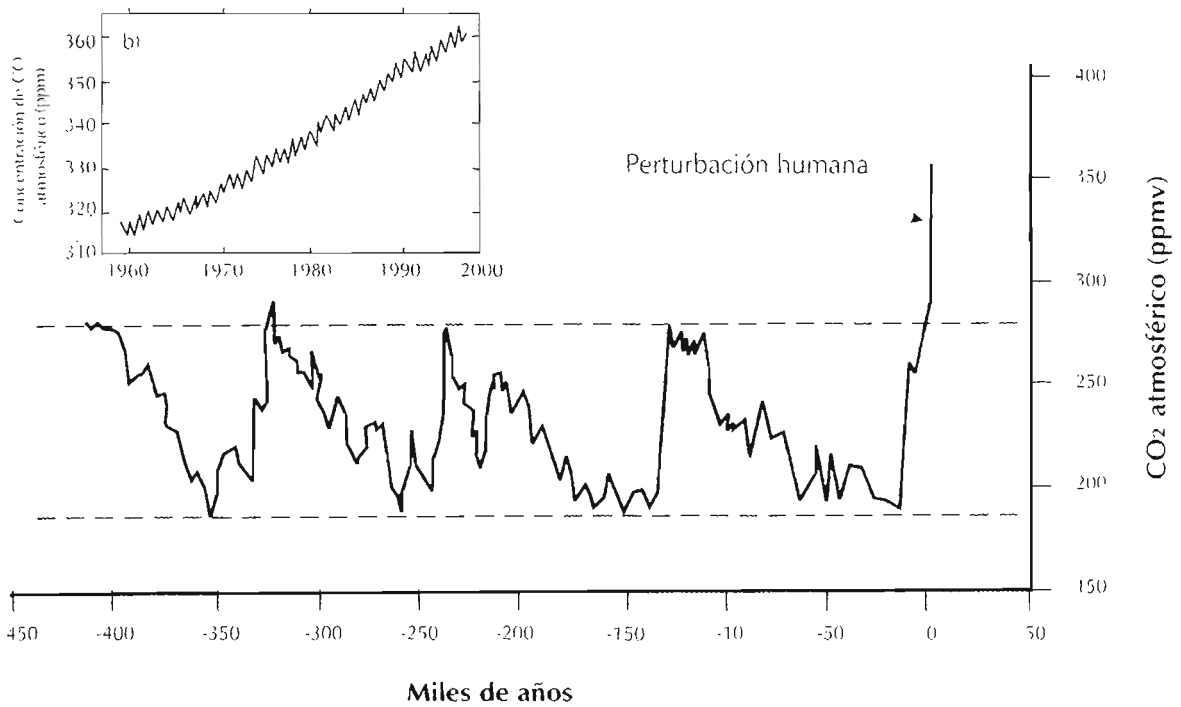


Figura 3 | Concentración de CO₂ tomada del núcleo de hielo de Vostok, en la cual se insertó un recuadro que muestra el incremento actual del CO₂ atmosférico medido en el Observatorio de Mauna Loa. Permite ver claramente la influencia de las actividades humanas en el ciclo del carbono. Tomado y redibujado de Steffen y Tyson (2001) y de Petit *et al.* (1999).

Los principales efectos del calentamiento global son:

1. La temperatura media global se ha incrementado entre 0.3 y 0.6 °C desde el siglo XIX a la actualidad. Durante los últimos 40 años (el período con datos más confiables) se ha elevado entre 0.2 y 0.3 °C (Figura 2). Los diez años más cálidos del siglo XX se produjeron en los últimos 15 años del siglo pasado siendo 1998 el que registró las temperaturas más altas. Este calentamiento se ha producido tanto en el mar como en la tierra, aunque de manera desigual en el mundo. El mayor incremento se ha dado entre los 40 °N y 70°N latitud norte. Por lo tanto, ha disminuido la cubierta de nieve en el Hemisferio Norte así como también ha decrecido el hielo en el Ártico.
2. La precipitación ha aumentado sobre regiones terrestres de altas latitudes en el Hemisferio Norte, especialmente durante el invierno. En cambio, ha disminuido en los trópicos y subtrópicos, desde Africa hasta Indonesia.

3. Con el calentamiento global sobreviene un incremento en el nivel del mar que se produce por la expansión de las aguas oceánicas debido al alza en la temperatura, lo cual provoca que se derritan los hielos de las zonas polares. En los últimos 100 años, el nivel del mar se ha elevado entre 10 y 25 cm. Las predicciones futuras varían pues están determinadas, en gran medida, por el incremento de temperatura (Figura 2). Ello depende a su vez de cómo se siguen desarrollando las actividades del hombre y cómo los países buscan reducir sus emisiones de gases. En este sentido, México es signatario de los protocolos internacionales (Convención Marco sobre Cambio Climático -CMCC) que buscan poner límites a la cantidad de emisiones producidas por los distintos países.

4. Los fenómenos de El Niño y La Niña constituyen dos eventos muy conocidos de variabilidad climática. El primero consiste en un calentamiento de las aguas del Pacífico central y de la región este, y La Niña es lo inverso, un enfriamiento. Tienen repercusiones climáticas muy fuertes que llegan hasta nuestro país. El cambio climático puede incrementar la frecuencia de estos eventos.

Entre los principales efectos que trae el cambio global está el aumento de la temperatura de la Tierra y, por tanto, el incremento en los deshielos y la disminución de los hielos flotantes. Ello produce una elevación del nivel del mar, modifica el régimen de lluvias, posibilita una mayor frecuencia de los fenómenos de El Niño y La Niña, altera el funcionamiento de los ecosistemas, modifica los patrones de distribución de flora y fauna. Todo ello tendrá fuertes repercusiones económicas y sociales.

5. Se espera que el efecto de invernadero modifique el clima del siglo XXI. Ello afectará el medio natural así como a las sociedades humanas y tendrá fuertes consecuencias económicas. El efecto se hará sentir en las zonas costeras, en los bosques, en los acuíferos, en los arrecifes (Wilkinson y Buddemeier, 1994) así como en la salud y en agricultura. En general, afectará a toda la naturaleza y tendrá un impacto aún mayor debido a la fuerte globalización de la economía actual.

6. Los ecosistemas y la flora y fauna que los caracterizan también sufrirán las consecuencias del cambio global, pues las plantas y los animales responden como individuos

al cambio climático, no como comunidades o ecosistemas. A través del tiempo, los ecosistemas han logrado reconstituirse después de fuertes perturbaciones o condiciones de estrés, con base en las especies sobrevivientes. La respuesta de las especies es sumamente variable así como la de los distintos ecosistemas. La tasa y magnitud de los cambios climáticos proyectados va a producir fuertes alteraciones en los ecosistemas actuales y en la distribución de las especies, ya que las comunidades tendrán que modificar sus rangos como muchas de ellas lo hicieron durante la última Glaciación. Sin embargo, con el cambio global tendrán que hacerlo a tasas entre 10 y 40 veces más rápido y es difícil que se puedan dar estos ajustes. Además, actualmente las actividades humanas han producido una fuerte fragmentación de los ecosistemas, quedando parches aislados en la mayoría de los cuales se ha producido un empobrecimiento de especies. Estos cambios han modificado las funciones de los ecosistemas haciendo aún más difícil la proyección de las posibles respuestas de las especies y ecosistemas al cambio climático (Steffen y Tyson, 2001; [www. pages-igbp.org](http://www.pages-igbp.org)).

304

El cambio climático producirá modificaciones en el régimen hidrológico y, por tanto, en la cantidad de agua disponible. Además, habrá modificaciones en la frecuencia e intensidad de fuegos y brotes de plagas.

Repercusiones del cambio climático en las costas

Una de las regiones que se verá más afectada por el cambio global es el Golfo de México. Ello se debe a que predomina una topografía plana, hay sumersión (hundimiento) regional de tierras; además, los desarrollos urbanos y económicos son extensos a lo largo de sus costas (sobre todo en los Estados Unidos) y presenta gran vulnerabilidad a tormentas tropicales, nortes y huracanes. Los modelos climáticos predicen un incremento en el nivel del mar de entre 20 y 50 centímetros durante este siglo (Figura 2). Si se toma la sumersión regional de tierras costeras, el incremento en el nivel del mar durante los próximos 100 años podría ser de 35 centímetros en gran parte del Golfo, y de hasta 110 centímetros en el delta del Mississippi, en Louisiana (Twilley *et al.*, 2001). Valores semejantes podrían darse en el delta del Grijalva.

En nuestro país, la llanura del delta del río Bravo, la Laguna de Alvarado, el complejo deltáico tabasqueño, la zona de los Petenes y las bahías de Chetumal son las

áreas más vulnerables de la línea costera del Golfo de México. Para estas regiones se hizo una sobreposición digital metro por metro, a fin de poder precisar y dibujar hasta dónde alcanzaba la penetración de la cuña marina con la elevación del nivel del mar. Los resultados obtenidos para la sobreposición de un incremento entre 0 y 50 cm de inundación alcanzan aproximadamente los 10 kilómetros tierra adentro. Al hacerlo para un incremento entre 50 cm y 1 metro, la penetración es de 25 kilómetros, y para valores entre 1 y 2 metros resultó de 30 kilómetros (Ortiz-Pérez, 1994).

El incremento en el nivel del mar tendrá un enorme impacto en las zonas costeras. Las regiones de tierras bajas serán las más afectadas, entre ellas el Golfo de México.

De manera particular, el incremento en el nivel del mar afectará principalmente a las islas de barrera del Golfo (Laguna Madre y Tamiahua) y del Caribe (norte de Yucatán y Cancún). Estas islas de barrera se irán erosionando y haciendo más delgadas, fragmentándose al final. En la zona central de Veracruz, donde hay grandes campos de médanos, al igual que en las dunas de Alvarado, éstas sufrirán erosión, pero tienen suficiente masa y tamaño como para resistir la pérdida de sedimentos. En la zona oeste de Tabasco, las barras frente a las lagunas más pequeñas desaparecerán al ser arrastradas por el mar, creando una línea costera muy indentada. El segmento que abarca desde Tupilco (Tabasco) hasta Champotón es muy bajo y ancho y se erosionará rápidamente conforme los mayores niveles de mar remuevan los sedimentos. A su vez, el Puerto de Dos Bocas se verá cada vez más expuesto (Ortiz-Pérez, 1994; Ortiz-Pérez, Valverde y Psuty, 1996).

Los humedales costeros del Golfo de México también son sumamente vulnerables al incremento en el nivel del mar. En condiciones normales, su inundación estaría balanceada por un crecimiento hacia arriba producido por la acumulación de materiales orgánicos e inorgánicos que se irían acumulando con el nuevo nivel. Sin embargo, esto no sucederá debido a que los principales ríos que llegan a las grandes extensiones de humedales han sido represados, razón por la que el sedimento está siendo retenido y no puede llegar hasta los humedales. Por tanto, la combinación de incremento en el nivel del mar y la disminución de la cantidad de sedimentos probablemente reducirá la superficie de humedales y llevará a una disminución de la

producción primaria de dichos humedales, manglares, estuarios y lagunas. Esto puede tener serias repercusiones en las pesquerías (Ortiz-Pérez, 1994; Ortiz-Pérez, Valverde y Psuty, 1996).

Para el Golfo de México ya existen zonas designadas como de mayor vulnerabilidad al incremento en el nivel del mar producido por el cambio global. En estas áreas, los municipios tienen un papel determinante en el uso del suelo y en la protección de la zona costera.

Estos mismos autores hacen una revisión de los humedales que serán más afectados en el Golfo de México. Los de la Laguna Madre y los de Tamiahua ya muestran los efectos de la disminución del aporte de sedimentos pues se han reducido a franjas muy delgadas. La Laguna de Alvarado y las tierras bajas del Papaloapan también sufrirán grandes cambios, resultado del incremento en el nivel de mar y de la falta de sedimentos que ya no llegan al estuario. El delta del río Grijalva será la zona más afectada, debido a que es el humedal de mayor tamaño en México y a que la Presa de Malpaso ha retenido sedimentos por lo que ya se puede apreciar el problema de la sumersión de los humedales. Es un caso similar al del delta del río Mississippi (ver capítulo cinco sobre Humedales costeros en esta sección). En esta zona, los humedales ya están migrando hacia tierras ligeramente más altas como son los cordones de dunas bajos, los cuerpos de agua se están extendiendo y la línea de costa está migrando hacia tierra adentro.

En un estudio más detallado, Pérez-Vega y Ortiz-Pérez (1996) realizaron una primera aproximación para estimar la vulnerabilidad de una porción costera al sur del estado de Veracruz (porción inferior del río Papaloapan y las márgenes costeras del macizo volcánico de Los Tuxtlas) ante las variaciones del nivel del mar, estableciendo diversas categorías en función de qué tan afectados se verían. Encontraron que las áreas más vulnerables son las lagunas costeras y el manglar (34,696 ha), mientras que el tular tiene un riesgo potencial alto de ser afectado, junto con los cuerpos de agua interiores y diversos tipos de terrenos de cultivo.

Se considera que en algunos casos es posible que al incrementarse el nivel del mar, el manglar tienda a desplazarse tierra adentro. En ese sentido, Yáñez-Arancibia *et al.*

(1998) plantean que los manglares tienen gran capacidad para contener con mejor éxito la variabilidad físico-ambiental de ritmo acelerado que impone el cambio climático.

Ciclo de carbono

Los seres vivos de este planeta están formados básicamente por agua y por carbono. Los ciclos biogeoquímicos de estos dos elementos son fundamentales para mantener la vida en la Tierra. El ciclo del agua es el más conocido y hoy en día existe gran preocupación debido a que se están agotando o contaminando fuentes de agua dulce acumuladas durante millones de años a través de su ciclo.

El ciclo del carbono se basa en el bióxido de carbono, el cual constituye alrededor del 0.3% de la atmósfera. La síntesis de compuestos orgánicos en el mundo se hace a partir del agua y de la fijación de aproximadamente 10% del bióxido de carbono de la atmósfera (Figura 4). Esta enorme actividad biológica es el resultado de la fotosíntesis que llevan a cabo las plantas, así como de la actividad de algas y bacterias. A los organismos que tienen la capacidad de sintetizar compuestos orgánicos utilizando energía solar, agua y CO_2 se les llama autótrofos. El resto de los organismos se consideran heterótrofos e incluye a todos los animales, hongos y protozoarios, entre otros. Éstos obtienen el carbón a partir de organismos autótrofos, a través de la cadena alimenticia, en la cual los herbívoros se comen las plantas y éstos a su vez son presa de los carnívoros. Cuando mueren, todos los organismos se descomponen mediante la actividad de bacterias y otros organismos del suelo y se convierten en nutrientes que las plantas utilizan para crecer. Durante la descomposición, estos organismos también permiten que se libere nuevamente el CO_2 a la atmósfera. Se vuelve a reiniciar el ciclo cuando las plantas lo vuelven a incorporar a través de la fotosíntesis.

La mayor parte de los compuestos orgánicos que se forman durante la fotosíntesis, como resultado de la fijación del CO_2 en la biomasa de las plantas, finalmente es reincorporada al sistema en forma de agua o de carbono. Sin embargo, no todos los compuestos de carbono se descomponen con la misma facilidad. La mayor parte se incorpora al suelo, aunque algunos como la celulosa son más resistentes. Gran parte se degrada, aunque una pequeña porción permanece sin descomponerse y se

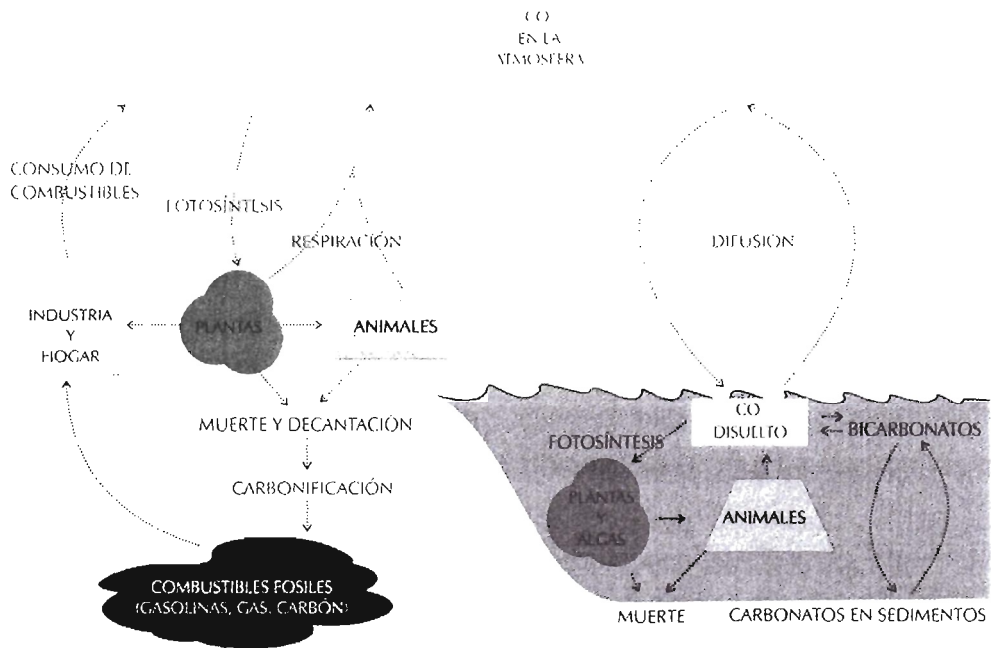


Figura 4 | Ciclo del carbono (redibujado de Raven y Johnson, 1989).

incorpora al suelo como material orgánico no descompuesto que forma la turba. El carbón presente en este material puede ser incorporado eventualmente a los combustibles fósiles (como el petróleo y el carbón), o bien se añade a los organismos que requieren carbonato de calcio para sus conchas o estructuras (ver el capítulo doce sobre Servicios ambientales que proporciona la zona costera en esta sección) o a las algas coralinas. Además del CO_2 que las plantas fijan, una cantidad algo mayor de bióxido de carbono de la atmósfera se disuelve en los océanos. Más de la mitad de esta cantidad se queda en las capas superficiales donde viven las algas y donde se lleva a cabo la fotosíntesis (Raven y Johnson, 1989).

Los organismos heterótrofos obtienen su energía al oxidar los compuestos de carbono. La respiración permite a las células oxidar las moléculas alimenticias para así obtener energía. Se utiliza oxígeno y se libera CO_2 y agua. En general, la fotosíntesis y la respiración están equilibradas. Sin embargo, las actividades del hombre, sobre todo la quema de combustibles fósiles, ha roto este balance y ha incrementado la cantidad de CO_2 en la atmósfera.

La mayoría de los compuestos que se encuentran formando parte de los organismos son recicladas a través de los ecosistemas. Además, estos compuestos existen en la atmósfera (bióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno), en las rocas o en el agua (fósforo, potasio, calcio, etc.). Los ciclos biogeoquímicos son los mecanismos o las vías mediante las cuales estos elementos se incorporan de la atmósfera, agua o rocas a los organismos. De ahí pasan a formar parte del cuerpo de otros organismos; finalmente, se descomponen y regresan a la atmósfera, agua o rocas. Los ciclos más importantes son el del agua, el del carbono, el del nitrógeno, el del fósforo y el del oxígeno.

Los humedales mexicanos

Son elementos distintivos del paisaje. Con frecuencia se confunden con otros componentes del paisaje ya que tienen muchas características en común con lagos, ríos, estuarios, el mar y los bosques. Términos tales como ciénegas, pantanos y cuerpos de agua abiertos y someros, entre otros, se refieren en su conjunto a diversos humedales y reflejan la gran variedad de tipos de humedales que existen en México (ver capítulo cinco sobre Humedales costeros en esta sección). Desafortunadamente no se ha hecho un esfuerzo para caracterizarlos de manera sistemática y para elaborar mapas con la distribución de todos los tipos de humedales mexicanos (Lot y Novelo, 1990; Olmsted, 1993; Flores-Verdugo *et al.*, 2001; Moreno-Casasola *et al.*, 2001; Contreras y Warner, 2003), ya que se les ha considerado como elementos menores del paisaje. Conforme los humedales van ganando reconocimiento, la superficie registrada con una cubierta por humedales parece incrementarse más allá de lo que se pensaba originalmente. Estados como Sinaloa, Oaxaca, Tamaulipas, Campeche, Veracruz y Quintana Roo, por ejemplo, tienen una cantidad significativa de humedales, tanto de agua dulce como salobres y marinos.

Los humedales prestan importantes servicios ambientales a la sociedad. Uno de ellos es el papel que juegan en el reciclaje del carbono a partir de la atmósfera. Hay que recordar que el CO₂ es uno de los gases de invernadero que más han elevado su concentración en la atmósfera. Las plantas de los humedales toman el CO₂ convirtiéndolo en biomasa y lo almacenan tanto en la propia vegetación como en el suelo.

Es importante reconocer que los humedales son ecosistemas particulares y que proporcionan numerosos beneficios al ser humano. Uno de estos servicios es su papel en el reciclaje de carbono a partir de la atmósfera, convirtiéndolo en biomasa y almacenándolo tanto en la vegetación viva como en los suelos. Por tanto, los humedales son ecosistemas valiosos que remueven el bióxido de carbono y otros gases de invernadero que están en la atmósfera y que permiten un balance en la acumulación de dichos gases, los cuales son responsables de las tendencias globales de calentamiento actual.

Este capítulo es una introducción al tema de humedales y reciclaje de carbono en el que se discute el papel fundamental que juegan los humedales en México para ayudar al país a cumplir con las obligaciones adquiridas dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

¿Por qué los humedales son importantes en el ciclo de carbono?

Los océanos cubren alrededor de 75% de la superficie de la Tierra, en comparación con las masas terrestres continentales. Los lagos, presas y humedales cubren menos de 2% de los continentes y sin embargo contienen casi 25% de todo el carbono de la biosfera terrestre, además de que entierran aproximadamente cuatro veces más carbono cada año que los océanos (Dean y Gorham, 1998). Los ecosistemas de humedales, como un todo, contienen una parte importante del carbono total de la Tierra, en especial cuando también se tienen en cuenta los humedales que forman parte de los lagos de agua dulce, de las presas y de las zonas someras de la plataforma continental.

Los humedales están situados entre los ecosistemas boscosos tierra adentro y los ecosistemas dulceacuícolas, salobres y marinos. Aunque puedan compartir muchas especies de plantas y animales con los ecosistemas boscosos y los acuáticos abiertos, los humedales también tienen especies propias, adaptadas solamente a ambientes de humedales.

Los humedales se definen como ecosistemas que deben tener uno o más de los siguientes tres atributos (Mitsch y Gosselink, 2000): a) su suelo o sustrato debe ser fundamentalmente un suelo hidromórfico, no drenado; es decir, debe estar saturado de

agua de manera temporal o permanente; b) debe presentar una lámina o capa de agua poco profunda o agua subterránea próxima a la superficie del terreno, ya sea permanente o temporal; y c) al menos de manera periódica, el terreno debe mantener predominantemente una vegetación acuática. Los humedales se encuentran entre los ecosistemas más diversos en especies y más complejos en estructura; en este sentido, más que los bosques terrestres y los sistemas acuáticos. Lo que es aún más importante, estas características dan lugar a una alta productividad y a grandes cantidades de carbono incorporado o formando parte de la biomasa viva del ecosistema, ya sea como plantas emergentes, libre-flotadoras, enraizadas o sumergidas, o bien una combinación de éstas.

Los humedales son sumamente productivos. Al caer las hojas o morir la planta, el material vegetal se acumula en la superficie y se forma una capa de suelo muy rica en materia orgánica que se llama turba. Por tanto, esta gran cantidad de carbono se almacena en el humedal y de ahí la importancia de estos ecosistemas en el reciclaje de carbono.

Otra característica importante es que las condiciones acuáticas y la presencia de suelos inundados contribuyen a que exista muy poca cantidad de oxígeno en el suelo. La hojarasca y la materia vegetal que se acumulan en la superficie del humedal, cuando la vegetación que lo forma ha completado su ciclo de vida, se convierte en turba y en materiales ricos en carbono que año con año se almacenan sobre el suelo del humedal como gruesos depósitos. Por tanto, la biomasa viva de carbono se guarda durante grandes períodos y no tiene que dejar el humedal, inclusive después de que las plantas mueren. Entre los ecosistemas de la tierra más ricos en carbono se encuentran los humedales productivos con grandes cantidades de biomasa viva y acumulaciones profundas de biomasa muerta, y éstos están formando los humedales herbáceos y arbóreos de México y otros países (ver capítulo cinco sobre Humedales costeros en esta sección).

¿Cómo reciclan el carbono los humedales?

Cuando se analiza cómo es que los humedales pueden reciclar y almacenar el carbono, es más fácil pensar que los sistemas de humedales están caracterizados por

dos capas de carbono: una superficial viva y otra más profunda con carbono "muerto" (Figura 5). La capa viva está formada sobre todo por las plantas de los humedales. El nivel del agua puede estar alto, lo cual da lugar a humedales con espacios de agua abierta sin vegetación o puede estar ligeramente por debajo del nivel del suelo y no ser visible de forma fácil. Las plantas vivas toman bióxido de carbono a través de sus hojas para realizar la fotosíntesis, convirtiendo así el carbono gaseoso en carbono sólido (biomasa) que forma parte de su estructura. Parte de esta biomasa en pie puede permanecer como parte de la vegetación viva de los humedales por muchas décadas, en el caso de los árboles. O bien puede permanecer sólo un año o unos pocos años antes de morir, como sucede en el caso de los humedales formados por plantas herbáceas anuales o de vida corta. Los humedales de aguas abiertas pueden tener grandes cantidades de carbono en el fitoplanc-ton, en las bacterias y en las macrófitas flotantes y sumergidas. Independientemente de cuándo mueran las plantas y bacterias, sus restos caerán sobre la superficie del

312

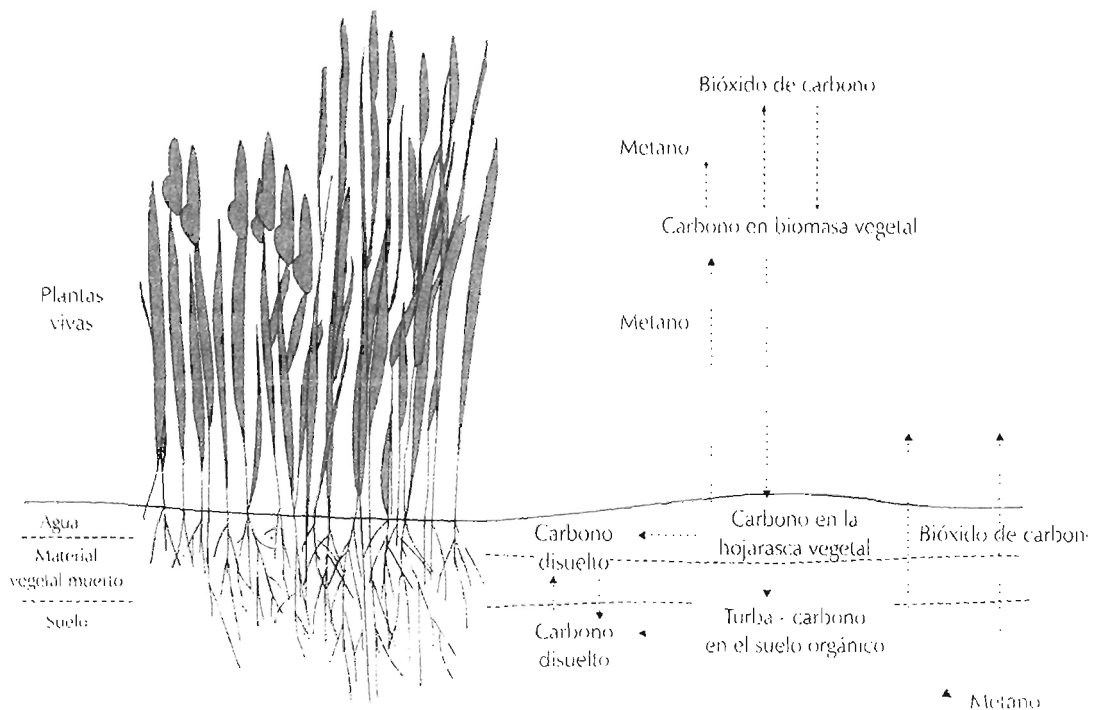


Figura 5 | Esquema generalizado que muestra el reciclaje de carbono en sus diferentes componentes –sólido, disuelto y gaseoso– en un popal típico de México.

humedal o en el fondo de la columna de agua, donde los procesos de descomposición romperán la biomasa en fracciones de tamaño más pequeño y la desintegrarán para formar sedimentos ricos en materia orgánica y turba. La descomposición facilitará la disolución del carbono en formas disueltas, en especial como carbono orgánico disuelto (COD) y algo de carbono inorgánico disuelto (CID). Al iniciarse el proceso de descomposición, el carbono sólido y disuelto se convertirá en los gases denominados bióxido de carbono y metano.

Los humedales participan en el reciclaje del carbono atmosférico de dos maneras: al capturarlo y transformarlo en materia viva durante la fotosíntesis y al almacenarlo en el suelo.

La segunda capa de los humedales se forma por la acumulación de la biomasa vegetal que logró sobrevivir a la descomposición y a la conversión en carbono disuelto o gaseoso producido en la capa superficial. Esta capa más profunda puede ir engrosando con el tiempo, conforme más y más biomasa se pasa de la capa superficial a las más profundas. En el caso de algunos popales, tulares y manglares, en México, esta capa profunda puede exceder el metro de profundidad y alcanzar espesores de dos a tres metros. Los sedimentos orgánicos y la turba en esta capa pueden permanecer ahí por miles de años. De esta manera, los humedales almacenan grandes cantidades de carbono por largos períodos.

Un sumidero es un reservorio que es capaz de tomar o asimilar un elemento químico o un compuesto de alguna otra parte de su ciclo. Por ejemplo, el suelo y los árboles (y plantas) tienden a actuar como depósitos o almacenes naturales de carbono. Cada año, los océanos, los suelos y los árboles (y otras plantas) absorben miles de billones de toneladas de carbono en forma de CO_2 .

De manera contrastante, algunos humedales, como las lagunas a lo largo de la costa, no tienen una capa profunda bien desarrollada. Gran parte del carbono en la capa viva, que existe en forma de fitoplancton y de bacterias, es removido hacia fuera del humedal, hacia el mar, mediante procesos de erosión y de mareas. En consecuencia, no se almacena una gran cantidad de carbono por períodos largos en estos humedales, sino que es exportado rápidamente.

Así, los humedales son capaces de transformar, dentro de la capa viva, y de almacenar o enterrar en la capa más profunda una gran cantidad de carbono proveniente de la atmósfera, y por tanto actúan como grandes sistemas de remoción de carbono atmosférico. Deben concebirse como sistemas naturales muy eficientes que utilizan gases de invernadero presentes en la atmósfera, los cuales están contribuyendo al calentamiento global, y que almacenan carbono en los suelos. Por esta capacidad, los humedales son capaces de proporcionar importantes servicios ambientales al hombre (ver capítulo doce sobre Servicios ambientales que proporcionan las zonas costeras, en esta sección).

Los humedales y las políticas de cambio global en México

En 1992, a través de las Naciones Unidas, 180 gobiernos firmaron la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC) con el objeto de “lograr... la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático”. En 1997 concluyeron las negociaciones para la adopción del Protocolo de Kioto, que contempla compromisos cuantitativos de los países desarrollados y de las economías en transición. Kioto estableció como meta promedio la reducción de 5.2% para el período 2008-2012, tomando como referencia el año de 1990. Las emisiones totales, de México, de gases con efecto de invernadero (GEI) representan cerca de 2% del total

Los municipios y las autoridades estatales tienen una gran responsabilidad, no solamente nacional sino también internacional, en la protección de los humedales y de los bosques. Son los que tienen el conocimiento y la autoridad para evitar la remoción de los sumideros de carbono como resultado de la alteración y desaparición de los humedales, para proteger y mantener los bosques y para asegurar que se mantenga el funcionamiento de las zonas costeras y no se llevan a cabo asentamientos y desarrollos económicos en las zonas de mayor vulnerabilidad al cambio global. Las autorizaciones de cambio de uso del suelo no deben ser aprobadas sin tener en cuenta sus múltiples impactos, uno de ellos es su aporte en disminuir las tendencias del cambio climático. Aportaciones pequeñas poco a poco llevan a grandes resultados.

global, lo cual lo coloca, junto con Brasil, al frente en este rubro en la región latinoamericana; sin embargo, en términos de emisiones per cápita, el país se encuentra en el promedio mundial (1 tonelada). Por otro lado, la ya identificada vulnerabilidad de México ante los efectos de este fenómeno requiere la adopción de un papel proactivo de nuestro país en el desarrollo de un régimen internacional efectivo en esta materia. A pesar de que México no está obligado por la CMCC ni por el Protocolo de Kioto a reducir sus emisiones de GEI, el país ha logrado, tan sólo en programas de ahorro de energía, la reducción de poco más de 24 millones de toneladas de CO₂ en los últimos cinco años. Gran parte de los esfuerzos mexicanos para cumplir con los acuerdos firmados incluyen inventarios de emisiones nacionales, desarrollo de escenarios de cambio climático y elaboración y aplicación de políticas respecto a los cambios en el uso del suelo. De manera muy particular, este último esfuerzo tiene que ver mucho con los municipios y los estados. Éstos juegan un papel fundamental en la autorización de cambios de uso del suelo, en el fomento de políticas productivas y en la canalización de recursos para su realización. Si hay una comprensión del funcionamiento de los humedales y una conciencia del papel que juegan en un fenómeno de cambio global que afecta a toda la humanidad, se habrá avanzado en el logro de su solución.

La última y Octava Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP-8), en Nueva Delhi, India, en 2002, identifica la necesidad de que países como México realicen monitoreos de los incrementos en la emisión de gases de invernadero por las distintas fuentes, remoción de sumideros resultantes del uso de suelo, del cambio de uso del suelo y de las actividades forestales. En este sentido, el gobierno mexicano estima que más de la mitad de sus ecosistemas boscosos han sido afectados, y que las áreas agrícolas ocupan la misma superficie o ligeramente más que los bosques. Las zonas costeras también se reconocen como altamente vulnerables y en riesgo, debido al incremento de las temperaturas y del nivel del mar.

Los humedales deben figurar de manera importante en las consideraciones de usos del suelo, de cambios en el uso del suelo y de las actividades forestales que aparecen como parte de las obligaciones que adquirió México en el COP-6 de la Sexta Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre

Cambio Climático. Sin embargo, entre los principales problemas está la carencia de inventarios adecuados sobre la ubicación y distribución de los distintos tipos de humedales, en cómo el uso del suelo y los cambios en el uso del suelo los han afectado en el pasado, o afectarán en el futuro. Es claro que los humedales son elementos muy importantes del paisaje mexicano, y probablemente lo sean mucho más de lo que hoy pensamos. Los municipios tienen una enorme responsabilidad en el cuidado y protección de los humedales de su territorio, con objeto de contribuir a mantener sus funciones y los servicios ambientales que proporcionan.

BIBLIOGRAFÍA

- Contreras-Espinosa, F. y B. G. Warner.** 2003. Ecological characteristics and management implications of coastal wetlands in Mexico. *Hydrobiologia* 511: 233-245
- Dean, W. E. y E. Gorham.** 1998. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. *Geology* 26: 535-538.
- Flores-Verdugo, F., G. de la Lanza-Espinosa; F. Contreras-Espinosa y C. M. Agraz-Hernandez.** 2001. The tropical Pacific coast of Mexico. En: U. Seelinger and B. Kjerfve (eds.). *Coastal marine ecosystems of Latin America*. Springer-Verlag, Berlin, pp: 307-314.
- Hulm, P. y J. Pernetta.** 1993. Reefs at risk. Coral reefs, human use and global climate change. A programme of action. UNEP-IOC-WMO-WWF y IUCN, 24 p.
- Lot, A. y A. Novelo.** 1990. Forested wetlands of Mexico. En: A. E. Lugo, M. Brinson y S. Brown (eds.). *Ecosystems of the world 15: Forested wetlands*. Elsevier, Amsterdam, pp. 287-298.
- Mitsch y Gosselink.** 2000. *Wetlands*. J. Wiley and Sons, Nueva York, 920 p.
- Moreno-Casasola, P., H. Lopez y S. Garza.** 2001. La vegetación de los humedales Mexicanos. En: F. Abarca y M. Herzig (eds.). *Manual para el manejo y conservación de los humedales en México*. U. S. Fish and Wildlife Service, Phoenix, 2a edición, 113 p.
- Olmsted, I.** 1993. Wetlands of Mexico. En: D. F. Whigham, D. Dykyjova y S. Hejny (eds.). *Wetlands of the world: I. Inventory, ecology and management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp: 637-677.

- Ortiz-Pérez, M. A.** 1994. Repercusiones del ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México: un enfoque geográfico de los problemas del cambio global. En: C. Gay, L. G. Ruiz, M. Imaz, C. Conde y O. Sánchez (eds.). Memorias del 1er. Taller de estudio del país: México. México ante el cambio global. Memorias. Cuernavaca, 18-22 abril, Instituto Nacional de Ecología, UNAM, pp: 191-196.
- Ortiz-Pérez, M. A., C. Valverde y N.P Psuty.** 1996. The impacts of sea level rise and economic development on the low-lands of the Mexican Gulf coast. En: A.V. Botello, J. Rojas-Galaviz, J.A. Benítez y D. Zárate (eds.). Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX, Serie Científica 5: 459-470.
- Pérez-Vega, A. y M. A. Ortiz-Pérez.** 2002. Cambio de la cubierta vegetal y vulnerabilidad a la inundación en el curso bajo del Río Papaloapan, Veracruz. Boletín del Instituto de Geografía 48.
- Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J. M. Barnola, I. Basile, M. bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltsman y M. Stievenard.** 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core. Antarctica. Nature 399: 429-436.
- Programa de Medio Ambiente Naciones Unidas.** www.grida.no/climate
- Raven, H. P. y G. B. Johnson.** 1989. Biology. Times Mirror/Mosby College Publishing, St Louis, 1142 p.
- Steffen, W. y P. Tyson.** 2001. Global change and the earth system: a planet under pressure. The Global Environmental Change Program. International Geosphere-Biosphere Programme. Science No. 4, 32 p.
- Twilley, R. R., E. J. Barron, H. L. Gholz, M. A. Harwell, R. L. Miller, D. J. Reed, J. B. Rose, E. H. Siemann, R. G. Wetzel, y R. J. Zimmerman.** 2001. Confronting climate change in the Gulf coast region: prospects for sustaining our ecological heritage. Union of Concerned Scientists, Cambridge, Massachusetts and Ecological Society of America. Washington D. C., 80 p.
- Wilkinson, C. R. y R. W. Buddemeier.** 1994. Global climate change and coral reefs: implications for people and reefs. UNEP-IOC-ASPEI-IUCN, 124 p.
- Yáñez-Arancibia, A., R Twilley y A. L. Lara-Domínguez.** 1998. Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. Madera y Bosques 4(2): 3-19.