



Elementos para Políticas Públicas

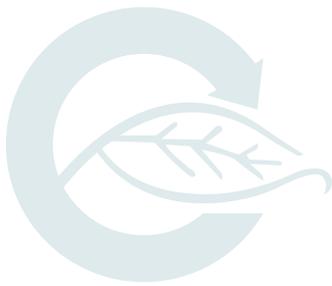
Volumen 1 • Número 1 • Enero - Abril de 2017

Ciclo del Carbono y sus Interacciones



Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL **CONACYT**



Elementos para **Políticas Públicas**

Volumen 1 • Número 1 • Enero - Abril de 2017

Ciclo del Carbono y sus Interacciones



Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL **CONACYT**

ELEMENTOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS. No. 1, enero-abril 2017. Es una publicación cuatrimestral editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C. (PMC), Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México. Tel. +52 (595) 951•2182, www.pmc carbono.org, coordinacion_general@pmcarbono.org. Editor responsable: Alma S. Velázquez Rodríguez. RESERVAS DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO No. 04-2015-120910081700-203, ISSN 2448-5578. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: Alma S. Velázquez Rodríguez, Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, enero de 2017.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Programa Mexicano del Carbono, A.C.



Elementos para **Políticas Públicas**

Comité Editorial

Dra. Alma Velázquez Rodríguez

EDITORA EN JEFE

Dr. Fernando Paz Pellat

CO-EDITOR

Biol. Ruth Torres Alamilla

EDITOR DE ESTILO

C.G. Oscar Velázquez Rodríguez

EDITOR DE MAQUETACIÓN

Coordinación Editorial

Alma Velázquez

COORDINADOR DEL PROCESO DE ARBITRAJE

Ruth Torres

COORDINADOR DE EDICIÓN

Oscar Velázquez

COORDINADOR DE DISEÑO

Antoine Libert

CORRECCIÓN DE TEXTOS EN INGLÉS

Cristopher Escalera

WEB MASTER Y SOPORTE TÉCNICO

Consejo Editorial

Dr. Ben de Jong

El Colegio de la Frontera Sur, México.

Dr. Felipe García Oliva

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dra. Georgina C. Sandoval Fabián

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño
del Estado de Jalisco, A.C., México.

Dr. Guillermo Jiménez Ferrer

El Colegio de la Frontera Sur, México.

Dr. J. Martín Hernández Ayón

Universidad Autónoma de Baja California, México.

Dr. Jaime Garatuza Payán

Instituto Tecnológico de Sonora, México.

Dr. Jorge D. Etchevers Barra

Colegio de Postgraduados, México.

Dr. Jorge Herrera Silveira

Instituto Politécnico Nacional, México.

Dra. Leticia Merino Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dra. Mariela Fuentes Ponce

Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Consejo Editorial

Dr. Mario G. Manzano Camarillo

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

Dr. Omar R. Masera Cerutti

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dr. Oscar L. Briones Villarreal

Instituto de Ecología, A.C., México.

Dr. Ramón Sosa Ávalos

Universidad de Colima, México.

Dr. Tulio Arredondo Moreno

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., México.

Dr. Christian Prat

Institut de Recherche pour le Développement, Francia.

Dr. Juan F. Gallardo Lancho

Consejo Superior de Investigación Científica, España.

Dr. Rodrigo Vargas

University of Delaware, U.S.A.

Dr. Werner Kurz

Canadian Forest Service, Canadá.

Índice de Autores

Carlos Orión Norzagaray López

Departamento de Biología Marina, Universidad Autónoma de Baja California.
Mexicali, Baja California, México.

Claudia Teutli Hernández

CINVESTAV, Unidad Mérida, Instituto Politécnico Nacional. Mérida, Yucatán, México.

Emilio José Beier Martin

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Unidad La Paz.
La Paz, Baja California, México.

Gilberto Gaxiola Castro

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
Ensenada, Baja California, México.

Héctor Reyes Bonilla

Departamento Académico de Biología Marina, Universidad Autónoma de Baja California.
La Paz, Baja California, México.

Helmut Maske Rubach

Departamento de Oceanología Biológica, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California, México.

Jorge Alfredo Herrera Silveira

CINVESTAV, Unidad Mérida, Instituto Politécnico Nacional. Mérida, Yucatán, México.

Índice de Autores

José Martín Hernández Ayón

Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California.
Ensenada, Baja California, México.

José Rubén Lara Lara

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
Ensenada, Baja California, México.

Jushiro Adolfo Cepeda Morales

Programa Académico de Biología, Unidad Académica de Agricultura,
Universidad Autónoma de Nayarit. Tepic, Nayarit, México.

Luis Eduardo Calderon Aguilera

Departamento de Ecología Marina, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de
Ensenada. Ensenada, Baja California, México.

María Elena Mesta Fernández

Legado Sustentable, A. C. Ciudad de México, México.

Ramón Andrés López Pérez

Departamento de Hidrobiología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.
Iztapalapa, Ciudad de México, México.

Ramón Sosa Ávalos

Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, Universidad de Colima.
Manzanillo, Colima, México.

Dedicatoria

Dr. Gilberto Gaxiola Castro

In Memoriam

Este primer número de la revista Elementos para Políticas Públicas asociadas al Ciclo del Carbono y sus Interacciones está dedicado a la memoria del Dr. Gilberto Gaxiola Castro, fundador y Premio Nacional del Programa Mexicano del Carbono, cuyas aportaciones en el campo de las ciencias marinas en México, particularmente la Oceanografía y el Ciclo del Carbono Marino, han sido trascendentes, además de su destacado liderazgo en proyectos nacionales e internacionales y la formación de recursos humanos de alto nivel.

Semblanza del

Dr. Gilberto Gaxiola Castro

En diciembre del 2001, en mi etapa inicial como estudiante de maestría, conocí al Dr. Gilberto Gaxiola Castro en su oficina ubicada en el edificio de Oceanología, del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Nunca imaginé que ese día conocería a la persona que cambiaría el curso de mi vida. Así era Gilberto, el tipo de persona que siempre incidió profundamente en la vida de los demás.

El Dr. Gilberto Gaxiola Castro, mejor conocido como Gilo, nació en los Mochis Sinaloa un 13 de noviembre de 1949. Su carrera en el área de oceanografía inicio a los 20 años con un viaje a la ciudad de Ensenada en el verano de 1970, lugar que puso ante sus pies un camino lleno de desafíos que supo resolver con éxito en cada proyecto que emprendió. La licenciatura la cursó en la Universidad Autónoma de Baja California, en la emblemática carrera de Oceanología, la primera a nivel nacional y en Latinoamérica. Gilo perteneció a la décima generación de oceanólogos y, posteriormente, formó parte del CICESE, segundo centro CONACYT creado en 1973. Desde entonces la siempre ascendente carrera científica de Gilo se desarrolló y consolidó al mismo tiempo que el CICESE creció y se convirtió en uno de los centros de investigación más importantes del país. Al pensar en Gilo inmediatamente se le asocia con investigaciones oceanográficas desarrolladas por el CICESE. Sin lugar a dudas, su labor científica reflejada en sus más de 120 publicaciones, numerosos proyectos, alumnos, grupos de investigación, entre otros productos, lo convierte en un icono en las investigaciones oceanográficas de México y Latinoamérica.

El proyecto más importante que Gilo impulsó fue el de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), del cual fue miembro fundador en 1997, junto con un equipo multidisciplinario e interinstitucional. El grupo IMECOCAL pronto cumplirá 20 años de investigaciones, convirtiéndose en la serie de tiempo más importante en la oceanografía mexicana. Durante todos esos años Gilo consiguió numerosos recursos para la investigación, a partir de los fondos CONACYT; cabe destacar que en la última convocatoria 2016 se aprobó su solicitud de ciencia básica para apoyar al programa IMECOCAL. En los últimos años Gilo trabajó arduamente en un proyecto a nivel nacional, el Programa Mexicano del Carbono, el cual nace como un colectivo científico que logró consolidarse como una red temática CONACYT en el 2016, gracias a un proyecto del que Gilo fungió como líder. Su participación en grupos de trabajo siempre causó un fuerte impacto en la gestión de recursos para la investigación, acompañado de una gran apertura hacia el trabajo multidisciplinario, siempre sumando capacidades y con un espíritu de colaboración abierto al intercambio de información.

Para aquellos que tuvimos la fortuna de conocerlo, hablar de Gilo no es sólo referirse a excelencia en investigación, sino que también es sinónimo de grandeza como ser humano, combinación difícil de encontrar. La excelencia en su quehacer se extendía a todas las facetas de su vida, era diligente y se reflejaba en su calidez en el trato con el prójimo. Gilo siempre estaba dispuesto a ayudar cuando alguien lo necesitaba, cumplía un rol social activo dentro de su comunidad apoyando desinteresadamente a todo aquel que lo requiriera. El porte y prudencia que lo caracterizaba no permitía que pasara desapercibido lo cual, aunado a su gran capacidad, lo hacía destacar rápidamente y colocarse en una posición de liderazgo en forma natural, aunque no buscara el protagonismo. Una de las mayores virtudes de Gilo era su trato gentil y sincero, con lo cual siempre ganaba aprecio y respeto en los círculos en que se desenvolvía.

Para los que fuimos sus discípulos, recordamos el alto nivel de exigencia que demandaba de nosotros. La Dra. Leticia Espinoza recuerda su estilo muy particular de corregir nuestros trabajos, con agudeza en sus palabras dejaba muy claro qué se debía corregir y por qué. Sin embargo, era muy justo al momento de celebrar los aciertos “eso sí, como padre amoroso y excelente mentor nos halagaba cuando lo merecíamos”, recuerda Lety. Una de los rasgos de Gilo, de los que fui continuamente sujeto de prueba, era su don especial para lograr que cada uno consiguiera la superación personal y académica. Con confianza planteaba quehaceres de alta exigencia y con astucia nos convencía de nuestras capacidades. He de confesar que siempre logró impulsarnos hacia nuevos desafíos. Al final, su propósito era que mejoráramos desde el interior, primero como personas y, después, como investigadores. Con toda una vida dedicada a la oceanografía Gilo nos dejó un legado, con su excelencia y dedicación guió nuestra formación como investigadores, ahora nos toca a sus discípulos ser portadores de sus enseñanzas. Para ser honesto, tardaremos años en alcanzar su nivel de excelencia. Gilo es el tipo de persona que aún hacen mucha falta en este mundo.

El Dr. Gilberto Gaxiola Castro se despidió con una V de victoria antes de partir, su fortaleza y su estilo de vida dejan una gran enseñanza a todos los que lo conocimos y un sentimiento de admiración y nostalgia. Pertenecía al Sistema Nacional de Investigadores nivel tres. Galardonado profesionalmente en 1994 con el Premio Nacional de Oceanografía por la Comisión Intersecretarial de Investigación Oceanográfica (CIO) de México y en el 2014 por el Programa Mexicano del Carbono, con el Premio Nacional a la Investigación Científica relacionado con el Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México, como resultado de su comprometida labor de investigación y contribución al conocimiento de la dinámica del carbono en ecosistemas acuáticos.

Para mí fue un privilegio haber sido uno de sus discípulos, el Programa Mexicano del Carbono me honra al permitirme describir a quien fuese, sin lugar a duda, el más grande ser humano que haya conocido. Mantendremos vivo su recuerdo e intentaremos seguir con el legado de nuestro querido Maestro y amigo, el Gran Gilo. Estas cortas palabras que trataron de describir a un gran hombre, fueron parte de las vivencias que compartimos quienes fuimos sus alumnos y amigos entre el 2000 al 2010: Leticia Espinosa Carreón, Ramón Sosa Avalos, Benigno Hernández, Eduardo Valdez Holguín, José Luis Peña Manjarrez, Martín de la Cruz Orozco, Marcos Martínez Gaxiola. Todos tuvimos la fortuna de trabajar codo a codo con nuestro mentor y maestro. Sus enseñanzas vivirán en nosotros, juntos mantendremos su legado vivo e intentaremos seguir el camino que puso ante nosotros. Con más de 40 años en la investigación oceanográfica deja un gran vacío y un deseo enorme de honrar su memoria. Las investigaciones de la productividad primaria en ecosistemas marinos del pacífico mexicano en estos momentos quedan en manos de unos pocos, con grandes desafíos para los años venideros, el mayor será continuar con la obra del Dr. Gilberto Gaxiola Castro. Extrañaremos su presencia, bondad y guía.

Dr. Jushiro Cepeda Morales
Universidad Autónoma de Nayarit

Contenido

Importancia del intercambio y reservorios de carbono en los mares y costas mexicanas <i>Gilberto Gaxiola Castro, José Martín Hernández Ayón, José Rubén Lara Lara, Ramón Sosa Ávalos, Jushiro Adolfo Cepeda Morales</i>	13
Aguas oceánicas subsuperficiales sin oxígeno, pero abundantes en carbono inorgánico y nutrimentos, frente a las costas del Pacífico de México <i>Helmut Maske Rubach, José Martín Hernández Ayón, Emilio José Beier Martin</i>	25
La acidificación del océano: situación en aguas mexicanas <i>José Martín Hernández Ayón, José Rubén Lara Lara, Gilberto Gaxiola Castro</i>	35
Carbono azul, manglares y políticas públicas <i>Jorge Alfredo Herrera Silveira, Claudia Teutli Hernández</i>	43
Los arrecifes coralinos de México: servicios ambientales y secuestro de carbono <i>Luis Eduardo Calderon Aguilera, Héctor Reyes Bonilla, Carlos Orión Norzagaray López, Ramón Andrés López Pérez</i>	53
Bases para el desarrollo de la legislación marino costera en México <i>María Elena Mesta Fernández</i>	63

IMPORTANCIA DEL INTERCAMBIO Y RESERVORIOS DE CARBONO EN LOS MARES Y COSTAS MEXICANAS

Gilberto Gaxiola Castro¹, José Martín Hernández Ayón², José Rubén Lara Lara^{1†}, Ramón Sosa Ávalos³, Jushiro Adolfo Cepeda Morales⁴

¹Departamento de Oceanografía Biológica. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (DOB-CICESE), Ensenada, Baja California.

²Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California (IIO-UABC). Ensenada, Baja California.

³Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas. Universidad de Colima (CEUNIVO-UCol). Manzanillo, Colima.

⁴Universidad Autónoma de Nayarit (UAN). Tepic, Nayarit

†Autor para correspondencia: rlara@cicese.mx.

RESUMEN

El conocimiento oportuno y sistemático del ciclo del carbono (flujos y reservorios) en los mares y costas mexicanas, aportará elementos para definir las estrategias y políticas públicas relacionadas con la mitigación y adaptación ante los impactos del cambio climático, como por ejemplo, la elevación del nivel del mar, la migración y/o pérdida de especies marinas de interés comercial, los impactos en los procesos biogeoquímicos (acidificación e hipoxia) y su influencia en las actividades pesqueras, acuaculturales y turísticas de la región, así como las consecuencias socioeconómicas en las diversas actividades que se desarrollan en las zonas costeras. Sin duda, una de las acciones fundamentales del Programa Mexicano del Carbono debe ser promover entre las instituciones gubernamentales, académicas y los tomadores de decisión, el compromiso de apoyar los distintos programas de monitoreo en varias escalas (espacio-temporales) a mediano y largo plazo, de los procesos y variables relacionadas con el ciclo del carbono marino en diferentes ecosistemas de los mares y costas de México.

Palabras clave: *ecosistemas marinos y costeros; biogeoquímica marina; cambio climático.*

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del ciclo del carbono en los diferentes ambientes (terrestres, acuáticos, atmósfera) y su interrelación con los distintos sectores socioeconómicos, es una de las principales metas del Programa Mexicano del Carbono (PMC). Este programa no solamente contempla conocer la contribución del país a las emisiones totales de gases de efecto invernadero y detectar las consecuencias sobre el cambio climático, sino también determinar cómo la emisión de estos gases deriva en otros complejos problemas ambientales recientes y, anteriormente, poco estudiados, provocados mayormente por las actividades humanas (Figura 1).

Las investigaciones realizadas por el PMC también incluyen el papel específico que desarrolla la sociedad, en su conjunto, en los cambios al ciclo del carbono, tales como el impacto de las actividades humanas

en las emisiones de gases de efecto invernadero y las posibles consecuencias del cambio climático en la agricultura, la pesca y el sistema alimentario en general. El conocimiento del ciclo del carbono en el planeta es muy relevante en muchos otros aspectos de la sociedad, como los cambios en la condición del ambiente, el impacto en la calidad del aire, el manejo de los recursos hídricos, la alimentación y la energía de consumo regular.

A partir de la revolución industrial, la concentración de CO₂ en la atmósfera se ha incrementado substancialmente debido a la quema de combustibles fósiles, cambios del uso del suelo, aumento en la deforestación e incremento de la industrialización, lo que contribuye a modificaciones aceleradas en el clima del planeta. Derivadas de estas actividades antropogénicas, existen reportes que refieren la emisión total de aproximadamente 440 000 millones de toneladas de CO₂ hacia la atmósfera, de las



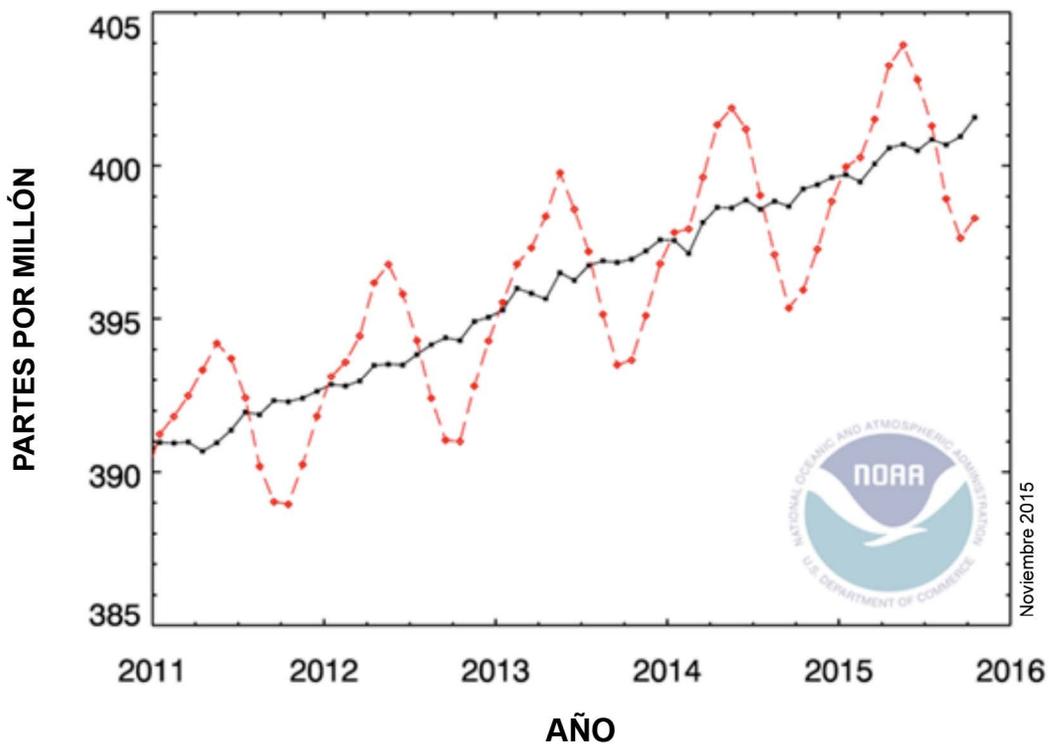
Figura 1. Aportes y procesos antropogénicos que derivan en el aumento de gases con efecto invernadero (centro) y los dos grandes ecosistemas (terrestres y acuáticos, respectivamente) que actúan como almacenes y sumideros de carbono (derecha e izquierda). Tomada del Global Carbon Project.

cuales, la mitad se ha vertido en los últimos 30 años. Actualmente, la concentración promedio de CO_2 en la atmósfera es mayor a $400 \mu\text{atm}$ (Figura 2a y b) y se espera un incremento continuo hasta alcanzar cerca de $800 \mu\text{atm}$ para finales de este siglo o antes. El problema de las grandes emisiones de este gas es que provoca una intensificación del efecto invernadero natural y pone en peligro la estabilidad del clima a nivel global. Se estima que la capacidad del océano para absorber CO_2 de origen antropogénico disminuirá a medida que aumenten las emisiones, con una proporción entre un 56% hacia un 22%, de acuerdo con diferentes escenarios climáticos (Magnan *et al.*, 2015).

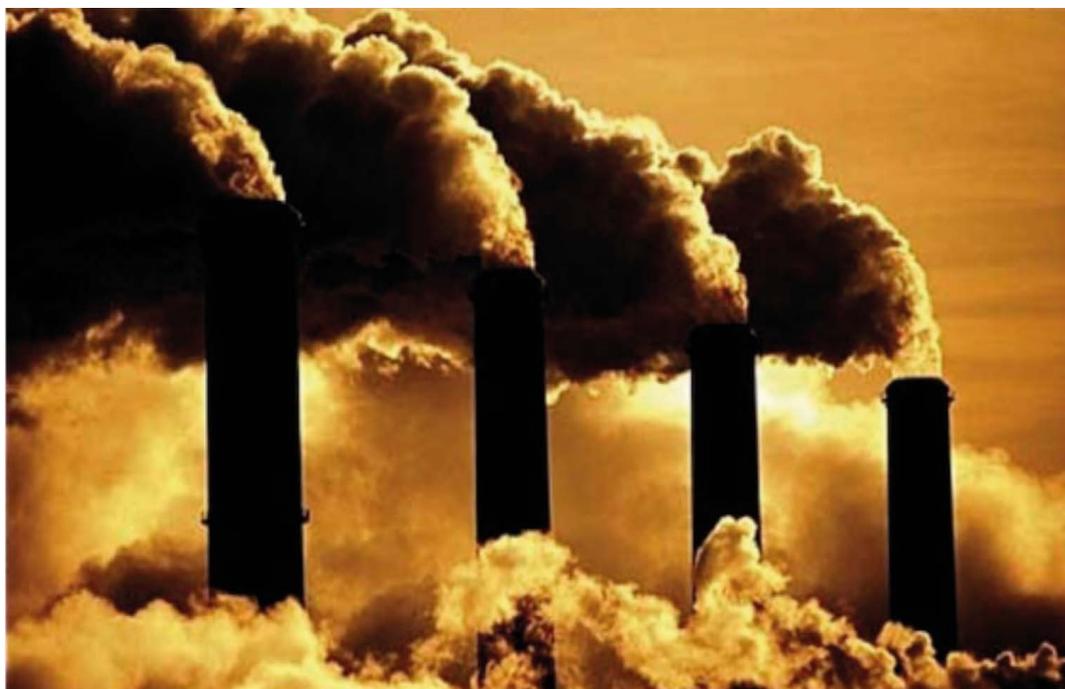
Del total del CO_2 antropogénico liberado entre 2004 y 2013, el 44% se ha acumulado en la atmósfera, 26% se encuentra en el océano y 30% en la biota terrestre (Le Quéré *et al.*, 2015). El carbono incorporado por el océano y biota terrestre ha permitido reducir temporalmente los impactos en el cambio climático del planeta como son el calentamiento, la acidificación del mar, la disminución del oxígeno disuelto y el aumento del nivel del mar (Magnan *et al.*, 2015). Sin embargo, la continua absorción de CO_2 por el océano, que aumenta anualmente, provoca consecuencias en los procesos

biogeoquímicos marinos las cuales parecen no ser reversibles. Como resultado de este aumento en la tasa de incorporación de CO_2 por el océano, se producen varias reacciones químicas con el agua de mar, las cuales finalmente resultan en reducción de la concentración de iones carbonato (CO_3^{2-}) (Feely *et al.*, 2004). La reducción en la disponibilidad de carbonato en el agua de mar, provoca un gran impacto biológico en grupos tan importantes como corales, moluscos, crustáceos, zooplancton, erizos de mar y algunas macroalgas, ya que modifica su tasa de calcificación a partir de la cual construyen sus caparzones y esqueletos calcáreos (Guinotte y Fabry, 2008). Un aspecto todavía no evaluado en su totalidad, es el impacto socioeconómico que estos cambios en los procesos biogeoquímicos traerán sobre las pesquerías costeras y oceánicas, así como en las actividades acuaculturales a nivel nacional y mundial. Las primeras evidencias indican que los cambios en las condiciones del océano han afectado principalmente a los corales de aguas templadas, las praderas de pastos marinos, los pterópodos y eufausidos (grupos importantes del zooplancton marino), algunos moluscos bivalvos (mejillones y ostiones) y, en general, a los peces (Magnan *et al.*, 2015).

PROMEDIO MENSUAL ACTUAL DE CO₂ EN MAUNA LOA



a)



b)

Figura 2. (a) Variación interanual (color rojo) de CO₂ en la atmósfera en los últimos años, medido en Mauna Loa, Hawaii (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>). En color negro se representa la tendencia promedio para el mismo periodo. (b) Emisiones de gases derivadas de la actividad industrial. Tomada de la revista Teorema Ambiental del 2 de noviembre de 2015.

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN MÉXICO

Las mediciones de los flujos y reservorios de carbono en los mares y costas de México son en general muy escasas y esporádicas. La mayor parte de estos estudios se han realizado en las regiones del Océano Pacífico, particularmente en la zonas del noroeste (Coronado-Alvarez *et al.*, 2015; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2007; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2010; De la Cruz-Orozco y Gaxiola-Castro, 2015; Hernández-Ayón *et al.*, 2010; Muñoz-Anderson *et al.*, 2015; Reimer *et al.*, 2013), Golfo de California (Gaxiola-Castro *et al.*, 1978; Hernández-Ayón *et al.*, 2007; Montes-Hugo *et al.*, 1998; Rodríguez-Ibáñez *et al.*, 2013; Zirino *et al.*, 1997), frente a las costas de Jalisco-Colima (Franco-Novela *et al.*, 2014; Sámano-Rodríguez y Sosa-Ávalos, 2013; Sánchez-Nava, 2015; Sosa-Ávalos *et al.*, 2013) y en el Golfo de Tehuantepec (Chapa-Balcorta *et al.*, 2015). Aun cuando se han publicado algunos trabajos sobre reservorios de carbono en lagunas costeras y aguas interiores de Baja California (Ribas-Ribas *et al.*, 2011) y Colima (Aguirre-Hernández, 1997; Sánchez-Nava, 2015; Sosa-Ávalos *et al.*, 2015), los resultados no representan adecuadamente la gran heterogeneidad de los ecosistemas costeros con condiciones mayormente estuarinas presentes desde Sinaloa hasta Oaxaca.

Por medio de campañas oceanográficas e información obtenida con barcos de oportunidad, De la Cruz-Orozco *et al.* (2007), De la Cruz-Orozco *et al.* (2010) y Hernández-Ayón *et al.* (2010) concluyeron que la región templada frente a la Península de Baja California se comporta, en promedio, como una fuente ligera de CO₂ del océano hacia la atmósfera durante el verano y otoño, con una variabilidad estacional y latitudinal. La zona norte de la región oceánica, frente a la península, incorpora CO₂ atmosférico debido a las condiciones de agua más templada y menos salina; la zona sur, por otra parte, se comporta principalmente como una fuente debido a la influencia del agua subtropical más cálida y salina que fluye hacia el norte durante el verano y otoño (Zaistev *et al.*, 2014). En promedio (2004-2005), la región frente a Baja California funcionó como una fuente moderada de CO₂ hacia la atmósfera, con un flujo de 1.12 mmol C m⁻² d⁻¹, equivalente a 0.41 mol C m⁻² año⁻¹ (De la Cruz-Orozco *et al.*, 2010). Sin embargo, la región mostró una variabilidad estacional muy pronunciada, ya que de diciembre a mayo (invierno y primavera) se comportó como sumidero de CO₂, mientras que el resto del año fue

una fuente de este gas hacia la atmósfera (Hernández-Ayón *et al.*, 2010). Esta es la única región de los mares de México que actualmente cuenta con información sobre la variabilidad estacional e interanual de los flujos de CO₂ océano-atmósfera, debido a los datos captados durante las campañas oceanográficas del programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California). Estas campañas han sido financiadas principalmente con proyectos de investigación básica apoyados por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) y por las instituciones participantes (CICESE, UABC, CICIMAR-IPN, CIBNOR, IG-UNAM).

A partir de 2008 se instalaron sistemas de medición continua de pCO₂ del aire y el mar, por medio de sensores localizados en boyas situadas en la costa norte de Baja California (frente a Punta Banda), en la costa de Baja California Sur frente a Bahía Magdalena y en Cabo Pulmo, así como en la zona costera de la Bahía de Manzanillo en Colima. Estos sistemas de medición continua que transmiten por telemetría, ofrecen una resolución muy apropiada de la variabilidad de alta frecuencia (tres horas), la cual se puede asociar a procesos físicos y biogeoquímicos presentes en las zonas costeras. Particularmente, frente a Punta Banda, Baja California, se determinó que los mayores aportes de CO₂ hacia la atmósfera se presentaron asociados a eventos derivados del transporte vertical de agua subsuperficial hacia la superficie, relacionados con surgencias, la cual contiene una gran cantidad de carbono inorgánico disuelto (Muñoz-Anderson *et al.*, 2015; Reimer *et al.*, 2013). Esta agua subsuperficial se asocia con concentraciones altas de nutrientes, por lo que parte del carbono inorgánico se transforma en carbono orgánico particulado y disuelto, vía el proceso fotosintético del fitoplancton. El resto del carbono inorgánico que no se procesa por la fotosíntesis, se libera a la atmósfera como CO₂ hasta que se reestablece el equilibrio. Este ejemplo de la caracterización de los flujos de carbono frente a la costa del norte de Baja California es muy localizado y sus resultados no son factibles de extender para todas las zonas costeras del país, por lo que se requiere de la instalación de un número mayor de sistemas similares de medición continua, en otras localidades con características físicas y procesos diferentes.

En el Golfo de California se han realizado pocos estudios referentes al conocimiento del sistema del CO₂. Uno de los primeros trabajos en esta región fue realizado por Gaxiola-Castro *et al.* (1978) con un

muestreo espacial en todo el golfo, quienes encontraron que los valores más bajos de pH y los más altos del carbono inorgánico total se presentaron en la región de las grandes islas debido a la mezcla vertical generada por las mareas. Años después, Zirino *et al.* (1997) estudiaron la viabilidad de calcular la presión parcial del dióxido de carbono por medio de imágenes de satélite y utilizaron mediciones de temperatura, pH y alcalinidad específica, encontrando esta propuesta prometedora. Hidalgo-González *et al.* (1997) estudiaron el efecto de las mareas en la concentración de la $p\text{CO}_2$ en la región de las grandes islas y determinaron que este proceso es el mecanismo responsable del transporte de CO_2 hacia la superficie. Posteriormente, Montes-Hugo *et al.* (1998) estudiaron los flujos netos de CO_2 en la región norte del Golfo de California en invierno y encontraron que estos fueron principalmente hacia la atmósfera. Recientemente, Hernández-Ayón *et al.* (2007) reportaron que las regiones del norte y las grandes islas son fuente de CO_2 a la atmósfera, mientras que la región central del Golfo de California se comporta como sumidero. También en forma reciente, Rodríguez-Ibáñez *et al.* (2013) determinaron que en promedio el Golfo de California es una fuente de dióxido de carbono hacia la atmósfera. Esto caracteriza a este gran mar interior de México como un aportador de gas de efecto invernadero casi en forma permanente, derivado de los intensos procesos de mezcla que se presentan a todo lo largo de la zona costera y en la región de las grandes islas.

En la región tropical frente a los Estados de Jalisco, Colima y Michoacán, Franco *et al.* (2014) presentaron resultados de flujos de carbono (FCO_2) entre el aire y el mar de dos cruceros oceanográficos realizados en 2009 y 2010. En noviembre de 2009 los FCO_2 variaron desde -0.4 a 2.5 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, indicando que la región actuó como una fuente débil de CO_2 . Durante agosto de 2010 los FCO_2 estuvieron entre -4.4 a 3.3 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, con flujos negativos (hacia el océano) en las estaciones costeras y en la parte sur del área de estudio (frente a las costas del estado de Guerrero). En general, el área de estudio actuó como una fuente débil de carbono hacia la atmósfera, mientras que la zona sur se comportó como un sumidero débil debido al consumo biológico. Sin embargo, se desconoce cuál es el comportamiento durante los otros meses del año. Estos autores encontraron que la advección de masas de agua presentes en la región juega un papel importante al definir si el área actúa como fuente o sumidero de carbono.

Sánchez-Nava (2015) estimó flujos de CO_2 positivos (hacia la atmósfera) en abril de 2013 desde 0.10 a 1.40 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ en las bahías de Manzanillo y Santiago, Colima; mientras que en mayo, julio, agosto, octubre y diciembre los flujos fueron negativos (hacia el océano). En julio se observaron valores entre -8.34 a -10.31 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$. En general, estas bahías actuaron como sumidero de carbono de mayo a diciembre debido al consumo biológico y a los efectos físicos que pudieron favorecer el intercambio de CO_2 entre el aire y el agua, como resultado de la mezcla vertical ocasionada por el paso de huracanes y tormentas tropicales entre julio y octubre. En abril los flujos positivos estuvieron asociados a eventos de surgencias costeras y a la advección vertical del agua subsuperficial con alto CO_2 , bajo pH y agua subsaturada de aragonita. En promedio las bahías actuaron como sumidero de carbono con un valor de -3.21 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ equivalente a -1.17 $\text{mol C m}^{-2} \text{año}^{-1}$.

Sosa-Ávalos *et al.* (2016) calcularon para la Bahía de Manzanillo un FCO_2 promedio de -0.22 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, con una variación de -43.04 a 68.76 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Durante marzo y abril el FCO_2 promedio fue de -3.1 y -3.2 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, respectivamente, indicando que el mar actuó como sumidero de CO_2 debido posiblemente a la incorporación de carbono por la fotosíntesis del fitoplancton. En junio el flujo tuvo un valor de 4.5 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ comportándose el océano como fuente de CO_2 , lo cual podría ser como consecuencia de la mayor temperatura, descomposición de la materia orgánica, procesos de remineralización y a la respiración. En general los flujos negativos estimados en marzo y abril fueron el resultado de la fotosíntesis del fitoplancton derivada de los flujos de nutrientes durante las surgencias costeras; en mayo los pulsos positivos posiblemente se debieron a la advección de agua con alto contenido de CO_2 y los de junio estuvieron relacionados con el incremento de la temperatura superficial que facilita el escape de CO_2 hacia la atmósfera.

Actualmente se desarrollan diversos estudios en las aguas del Golfo de México, para entender, en parte los procesos principales que determinan la variabilidad de los flujos de carbono con relación a la dinámica física, geoquímica y biológica. En junio del presente, bajo el proyecto "Plataformas de observación oceanográfica, línea base, modelos de simulación y escenarios de la capacidad natural de respuesta ante derrames de gran escala en el Golfo de México" auspiciado por el Fondo de Hidrocarburos de SENER-CONACYT, se instalaron

cuatro sistemas de boyas autónomas con sensores para medir pH y la $p\text{CO}_2$ del océano y la atmósfera y, dos sistemas de trampas de sedimentos en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos en el Golfo de México. Esto permitirá generar las primeras series de tiempo de los flujos de carbono entre el océano y la atmósfera, así mismo se tendrá información para estimar los flujos de carbono del sistema pelágico al bentónico para las regiones mencionadas. Esto ofrecerá una información muy valiosa para esa región, la cual hasta ahora ha sido muy escasa.

Una alternativa aplicada recientemente para ampliar el conocimiento acerca de los reservorios y flujos de carbono de los mares mexicanos es la utilización de información derivada de sensores remotos que orbitan la tierra, acoplada a modelos empíricos relacionados con la temperatura superficial del mar y la clorofila del fitoplancton para hacer proyecciones en tiempo y espacio. Un ejemplo de estas relaciones empíricas, es la desarrollada por Zirino *et al.* (1997) entre la temperatura superficial del mar, derivada de sensores en satélites y la $p\text{CO}_2$ del agua medida en el Golfo de California. Sin embargo, para lograr relaciones estadísticas significativas es necesario obtener una gran cantidad de información de campo de las variables a relacionar, así como de ambientes marinos diferentes. Este es un campo de la ciencia que es necesario desarrollar urgentemente en México.

PROPUESTAS PARA EL ESTUDIO SISTEMÁTICO DE LOS MARES MEXICANOS

Las estimaciones de la incorporación anual del CO_2 atmosférico por los océanos a nivel global varía entre 1 Gt a 3 Gt de carbono (1 Gigatonelada = 10^{15} g). Sin embargo, se desconoce que porción de este cambio es resultado de la variabilidad natural del CO_2 atmosférico y cuáles componentes son los más importantes para afectar esta incertidumbre. Esto es todavía más crítico en las zonas costeras y la plataforma continental de los océanos, donde se presenta una alta variabilidad espacio-temporal y donde a nivel global se ha obtenido una menor cantidad de información de estos intercambios y de la magnitud de los reservorios (Borges *et al.*, 2005). Se esperaría que estas regiones actuaran como fuertes sumideros de CO_2 atmosférico debido a las altas tasas de fijación de carbono por la fotosíntesis del fitoplancton (Gruber, 2015). Sin embargo, Laruelle *et al.* (2014) han mostrado que las zonas costeras del océano global fijan

anualmente alrededor de 0.2 Gt C, la cual es cinco veces menor que la captación de CO_2 atmosférico que se había estimado en otros trabajos para estas regiones marinas. A nivel global se han realizado estudios limitados para obtener información de estos intercambios de carbono entre la atmósfera y el océano. Particularmente, en México son escasos los trabajos que han calculado el intercambio de CO_2 entre estos dos grandes reservorios. Los sistemas marinos y costeros comprenden una extensa área del territorio nacional, de ahí la importancia de estudiar los cambios en el flujo de carbono océano-atmósfera y tierra-océano, así como sus implicaciones a la variabilidad climática y los procesos biogeoquímicos marinos. Uno de los retos más importantes del PMC es realizar acciones para promover la implementación y continuidad de programas de investigación en las regiones prioritarias marinas (zonas costeras, márgenes continentales y regiones oceánicas) y de los procesos biogeoquímicos más importantes relacionados con estos cambios a mediano y largo plazo.

La variabilidad de la concentración del CO_2 en el océano está afectada principalmente por procesos físicos dependientes fundamentalmente de la solubilidad del gas en el agua de mar (función de la temperatura y salinidad) y biológicos, determinados por la incorporación del carbono inorgánico disuelto (CO_2 y HCO_3^-) por el fitoplancton marino a través del proceso fotosintético y la producción de CO_2 debida principalmente a la respiración de los organismos heterotróficos. La complejidad de estos procesos es que se pueden presentar en forma combinada o con una fuerte dominancia de alguno de ellos. Otro aspecto a considerar es que las escalas temporales de variabilidad de estos procesos pueden llegar a ser muy diferentes. El primer aspecto a cubrir por el PMC es, por lo tanto, promover el estudio sistemático de los mares y costas de México para determinar con la mayor precisión posible estas escalas, así como sus variaciones en diferentes zonas geográficas y ambientales.

Para cumplir con lo anterior, un primer paso es determinar en forma sistemática la variabilidad espacio-temporal de las especies del carbono (en forma de gas y componentes disueltos) en los mares y costas de México. Una alternativa para obtener esta información es a través de la medición de las variables que se relacionan con el sistema del CO_2 del océano, como son el Carbono Inorgánico Disuelto (CID), el pH, la Alcalinidad Total (At) y la Presión Parcial del CO_2 en el agua ($p\text{CO}_2$). A partir de la información sistemática de estas variables obtenidas en los mares mexicanos

será posible identificar procesos relacionados con cambios de gran escala debido a las emisiones de CO₂ antropogénico, generar algoritmos para calcular cambios en las concentraciones del ion carbonato y estimar la variabilidad espacio-temporal de los flujos de CO₂ en la interface océano-atmósfera utilizando imágenes de satélite (Hales *et al.*, 2012). Este es un paso indispensable para obtener un conocimiento mínimo con el fin de desarrollar escenarios sobre la variabilidad del CO₂ en las regiones marinas del país (Figura 3).

Una de las acciones recomendadas para cumplir con esta meta, es la instalación de boyas instrumentadas en zonas específicas del Golfo de México, Golfo de California y costas del Pacífico mexicano. Estas boyas deberán estar asociadas a programas integrales de monitoreo local como FLUCAR (Fuentes y sumideros de carbono en los márgenes continentales). Como un complemento es necesario hacer estimaciones de mayor alcance espacial y temporal, como las que se realizan frente a la costa occidental de Baja California

por el programa IMECOCAL a partir de campañas oceanográficas trimestrales. Ambas estrategias se deberán complementar con la instalación de paquetes de sensores de flujo continuo, colocados en barcos de oportunidad como lo describen Zirino *et al.* (1997), lo cual permitirá generar escenarios diversos de las variables asociadas al sistema del carbono e información espacial y temporal.

El paso del carbono desde la forma inorgánica disuelta a la forma orgánica particulada (productividad primaria) es debido principalmente al proceso fotosintético. Los procesos biológicos son los responsables de transferir y modificar los compuestos orgánicos del carbono, ya sea hacia niveles tróficos superiores o ser transportados por abajo de las capas superficiales del océano (bomba biológica). Las formas y concentraciones en las que se encuentra la materia orgánica disuelta en los sistemas acuáticos es una de las principales interrogantes en este campo de la ciencia. Esta forma de carbono representa, además, una de las fuentes principales de energía para el crecimiento de organismos unicelulares.



Figura 3. Zonas costeras de Huatulco, Oaxaca, San Blas, Nayarit y Mazatlán, Sinaloa. Tomado de http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/757/1/mx/universo_de_atencion.html.

Actualmente existen solamente un par de programas de los mares mexicanos en el Océano Pacífico donde se ha obtenido información en forma semi-sistemática estacional sobre las tasas de incorporación de carbono inorgánico por el fitoplancton marino. Sin embargo, se requiere implementar programas extensivos en regiones del país, principalmente en el Golfo de México y Mar Caribe, con el fin de contar con un conocimiento general de estos procesos. Solamente en algunas regiones de los mares mexicanos se han hecho experimentos del pastoreo del fitoplancton por el zooplancton para medir transferencias del carbono en la zona epipelágica (García-Pámanes y Lara-Lara, 2013). En estas mismas regiones se han evaluado en forma puntual la transferencia de carbono orgánico particulado producido en la zona eufótica hacia mayores profundidades (García-Pámanes *et al.*, 2011). Por lo anterior, se requiere realizar un gran esfuerzo en este sentido, con el fin de conocer el transporte de la materia orgánica en las capas superiores y hacia el fondo marino, así como su posible permanencia por largos períodos en las capas profundas. Este podría ser uno de los pocos mecanismos que contribuyan al secuestro de largo periodo del carbono atmosférico (CO₂), el cual no ha sido evaluado adecuadamente en los mares mexicanos.

Para tener un conocimiento más completo de la dinámica del carbono es necesario además conocer el papel que desarrollan las bacterias y virus en la incorporación, transformación y transferencia del carbono orgánico disuelto. Este es un campo de la ciencia donde se han hecho avances muy recientes en México. En general, se requiere evaluar lo mejor posible los cambios en las tasas de incorporación del carbono inorgánico por los productores primarios (picofitoplancton, nanofitoplancton y microfitoplancton), relacionados con la variabilidad ambiental del océano a diferentes escalas espaciales y temporales. También es necesario conocer la función que realizan el zooplancton y las larvas de peces en la incorporación de carbono particulado y su transferencia hacia diferentes ambientes (fondo oceánico, plataforma continental, cuerpos costeros, etc.).

IMPORTANCIA DE LA ZONA COSTERA

La zona costera juega un papel fundamental en los ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo y otros elementos. Los flujos de carbono en estos ambientes son más grandes que los observados en zonas

oceánicas (Hansell y Carlson, 2001) y no obstante su importancia global, son pocos los estudios donde se reconoce la contribución de las zonas costeras a los flujos de carbono y nutrientes (Chen *et al.*, 2003). En las costas mexicanas los estuarios “clásicos” (estuarios tipo valle de río inundado) son escasos y predominan las lagunas costeras, que generalmente tienen circulación neutra o antiestuarina. A pesar de la escasez de aportes continentales vía descarga de ríos, se puede generalizar que las lagunas costeras de algunas regiones del noroeste del país presentan condiciones de riqueza en términos de producción primaria, producción secundaria y diversidad de especies, tan altas como las de estuarios más productivos. En estos sistemas costeros es necesario evaluar la magnitud de los reservorios del carbono orgánico e inorgánico y su fertilidad, así como en otras donde prevalece la vegetación de pastos marinos y de manglar. Para ello se deben determinar los flujos de carbono y su intercambio con el océano adyacente, así como la dispersión de condiciones hacia el interior de los cuerpos costeros. Un aspecto importante es conocer el intercambio del carbono debido a las variaciones en las tasas de reciclamiento bacteriano del material orgánico en sedimentos y en la columna de agua. Esto ayudará a establecer el papel de las lagunas costeras, estuarios, bahías someras, marismas y manglares como fuentes o sumideros de carbono.

Debido a su complejidad, los estudios en estas zonas deberán estar conformados por equipos de investigación multidisciplinarios de expertos en cada uno de los diferentes ambientes (marismas, macrovegetación, manglares, estuarios, esteros, bahías, etc.). Se propone realizar estudios en las zonas costeras y bahías más representativas de los diferentes ambientes y climas de México, como en las costas de Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Tabasco, Veracruz y Tamaulipas. Mientras que en el Pacífico se proponen como prioritarias las costas de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima y Oaxaca.

FLUJOS DE CARBONO EN MÁRGENES CONTINENTALES

Los márgenes continentales representan la interface entre los ambientes terrestres-costeros y las aguas oceánicas adyacentes. El ciclo del carbono en los márgenes continentales mundiales está pobremente estudiado y hasta ahora no ha sido objeto de programas

multidisciplinarios de investigación (Figura 4). El resultado es que actualmente no se conoce con precisión si estas regiones son fuentes y/o sumideros netos de GEI (Cai *et al.*, 2006).

Las investigaciones en este tema se deben desarrollar en ambientes representativos de las costas de México que presentan procesos que pudieran impactar los flujos de CO₂ océano-atmósfera y entre la plataforma y el océano (Figura 5). Algunos ejemplos de estas zonas son las áreas de surgencias costeras

frente a la costa occidental de Baja California, las zonas centro (grandes islas) y norte del Golfo de California, la región central del Pacífico mexicano, el Golfo de Tehuantepec, la región norte y central del Golfo de México y el Mar Caribe. Para cubrir las diferentes escalas espacio-temporales se requiere la combinación de diferentes estrategias de muestreo: información generada por satélites, cruceros oceanográficos y boyas oceanográficas (series de tiempo). Paralelamente se deben llevar a cabo los estudios socio-ambientales en

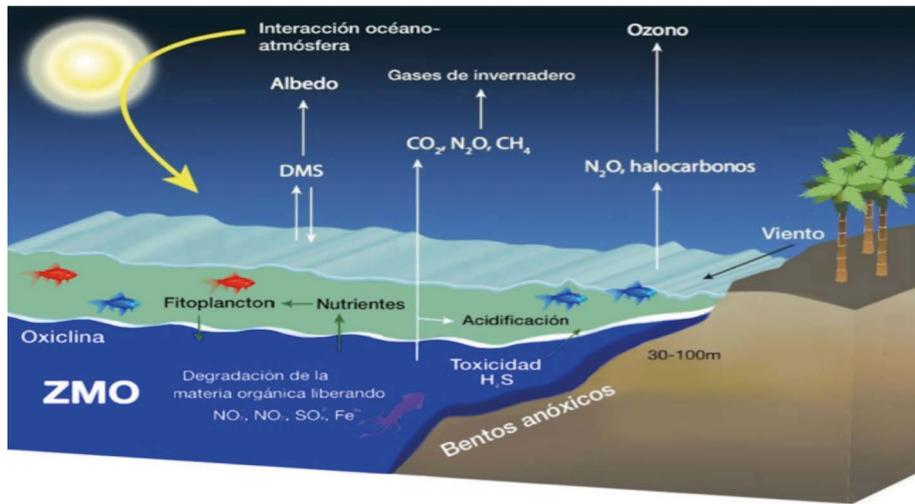


Figura 4. Esquema conceptual de los márgenes continentales y zona costera que muestra la biogeoquímica implícita en agua y atmósfera y su relación con las emisiones de gases invernadero.



Figura 5. Márgenes continentales de México dividido por regiones. Tomado de http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/757/1/mx/universo_de_atencion.html.

las costas cercanas a estos márgenes continentales. Esto incluye a los nuevos asentamientos y desarrollo de actividades turísticas, portuarias, agrícolas e industriales.

Las líneas principales de investigación en México deberán estar encaminadas a resolver preguntas relacionadas con la variabilidad temporal del flujo de exportación (vertical y horizontal) del carbono y determinar su variabilidad temporal de mediano y largo plazo como fuentes y/o sumideros de carbono. Lo anterior debe ayudar a avanzar en el conocimiento de los principales procesos responsables de la variabilidad del carbono (producción primaria, respiración, pastoreo, hundimiento-sedimentación, transferencia a través de la trama trófica, intercambio con la atmósfera, etc.). Además de avanzar en el entendimiento del balance del carbono y evaluar la posible contribución de las actividades antropogénicas al reservorio de carbono de las zonas costeras de los mares mexicanos. Un paso necesario a mediano plazo es generar modelos biogeoquímicos de predicción del potencial incremento de las fuentes y/o reducción de los sumideros de gases invernadero en las zonas costeras.

RECOMENDACIONES HACIA LA APLICACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Para desarrollar los planteamientos anteriores, es necesario crear programas gubernamentales e institucionales que tengan como prioridad el apoyar la investigación científica y tecnológica para generar y ampliar sistemas de monitoreo de los componentes del sistema del carbono en el océano a mediano y largo plazo, así como de los flujos y reservorios de carbono en los mares y costas de México. Estos programas deberán estar encaminados a resolver la falta enorme de información que actualmente existe en la gran mayoría de los ecosistemas acuáticos del país. También, se deberá fomentar la formación de recursos humanos de alto nivel académico que se requieren para estudiar y entender el efecto del incremento del CO₂ atmosférico en los procesos biogeoquímicos del océano y su impacto en los recursos marinos y costeros. Además, se deberá de homogeneizar la metodología utilizada para que el análisis, reportes y bases de datos tengan el mismo formato, para disminuir errores en la estimación de los gases de efecto invernadero.

Los programas de monitoreo deberán de tener el compromiso institucional (gubernamental y académico), ya que no es suficiente el compromiso

individual de los investigadores científicos. El mantener activos estos programas de monitoreo (barcos, boyas, etc.) implica responsabilidades económicas importantes a mediano y largo plazo, que generalmente están fuera del alcance de los proyectos tradicionales apoyados a los académicos. Uno de los compromisos de los investigadores científicos es hacer la traducción de dicho conocimiento para a su vez proveerlo a los tomadores de decisión. En el caso particular del ciclo del carbono, hay al menos dos componentes relacionadas con las políticas públicas: una está relacionada con las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, por sus efectos a los ecosistemas marinos (*e.g.* migración de especies, posible mortandad de organismos sésiles) y costeros derivado del incremento del nivel del mar; la otra componente está relacionada con el impacto a los procesos biogeoquímicos, en particular los efectos en la disminución de carbonatos disueltos derivada de la acidificación del océano. Estos impactos podrán tener implicaciones socio-económicas de gran magnitud para una diversidad de sectores en nuestro país. Por lo tanto, es prioritario profundizar el conocimiento sobre la variabilidad del ciclo del carbono marino y sus procesos, de tal manera de que en el futuro se puedan desarrollar modelos para pronosticar los potenciales impactos a los sectores socioeconómicos y que se puedan definir las estrategias de mitigación y adaptación apropiadas.

LITERATURA CITADA

- Aguirre, H. E. 1997. Estimación de la concentración total y presión parcial del CO₂ en la parte noroeste de la laguna de Cuautlán. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad de Colima.
- Borges, A. V., B. Delille and M. Frankignoulle. 2005. Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: diversity of ecosystems counts. *Geophysical Research Letters*, 32. DOI:10.1029/2005GL023053
- Burke, H. P. G., Strutton, M., Saraceno, R., Letelier, T., Takahashi, R., Feely, C., Sabine and F. Chavez. 2012. Satellite-based prediction of pCO₂ in coastal waters of the eastern North Pacific. *Progress in Oceanography* 103:1-15.
- Cai, W., M. Dai and Y. Wang. 2006. Air-sea exchange of carbon dioxide in ocean margins: a province based synthesis. *Geophysical Research Letters*, 33. DOI:10.1029/2006GL026219
- Chapa, B. C., J. M. Hernández A., R. Durazo, E. Beier, S. R. Alin and A. López P. 2015. Influence of post-Tehuano oceanographic processes in the dynamics of the CO₂ system in the Gulf

- of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Geophysical Research* (en prensa).
- Chen, C. T. A. and A. V. Borges. 2009. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO₂. *Deep-Sea Research II* 56: 578-590.
- Coronado, A. L., R. Lara L., S. Álvarez B. y C. Bazán G. 2015. Variabilidad de los flujos de CO₂ océano-atmósfera, en las aguas costeras del norte de Baja California pp. 490-498. *In: F. Paz y J. Wong (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida y el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Texcoco, Estado de México, México.*
- De La Cruz, O. M. E., G. Gaxiola C. G., J. García C., G. Friederich, F. Chavez y J. Gómez V. 2007. Presión parcial del bióxido de carbono (pCO₂) frente a Baja California. *In: B. Hernández de la T. y G. Gaxiola C. (eds.). Carbono en ecosistemas acuáticos de México. SEMARNAT, INE, CICESE, México, D. F.*
- De La Cruz, O. M. E., J. E. Valdez H., G. Gaxiola C., M. Mariano M. y T. L. Espinosa C. 2010. Flujos de CO₂ océano-atmósfera. pp. 165-179. *In: G. Gaxiola C. y R. Durazo (eds.). Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007. SEMARNAT, INE, CICESE, UABC, México, D. F.*
- De la Cruz, O. M. E. y G. Gaxiola C. 2015. Sistemas de medición continua de pCO₂ en ambientes marinos mediante un analizador de Infrarrojo (LICOR). pp. 483-489. *In: F. Paz y J. Wong (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida y el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Texcoco, Estado de México, México.*
- Feely, R. A., C. L. Sabine, K. Lee, W. Berelson and J. Kleypas. 2004. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science* 305: 362-366.
- Franco, N. A. C., J. M. Hernández A., E. Beier, V. Garçon, H. Maske, A. Paulmier, J. Färber L., R. Castro and R. Sosa Á. 2014. Air-sea CO₂ fluxes above the stratified oxygen minimum zone in the coastal region of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 119: 2923-2937.
- García, P. J. and J. R. Lara L. 2013. Marine zooplankton grazing studies in México: An overview. pp. 92-105. *In: R. Riosmena-Rodríguez (ed.) Invertebrates. Classification, Evolution and Biodiversity. Nova Science Publishers, Inc.*
- García, P. J. A., A. Trasviña C., J. R. Lara L. y C. Bazán G. 2011. Variaciones estacionales del flujo vertical de materia orgánica particulada en la región central del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 37: 33-49.
- Gaxiola, C. G., S. Álvarez B. and R. A. Schwartzlose. 1978. Sistema del bióxido de carbono en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* 5: 25-40.
- Guinotte, J. M. and V. J. Fabry. 2008. Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134: 320-342.
- Gruber, N. 2015. Carbon at the coastal interface. *Nature* 517: 148-149.
- Hansell, D. A. and C. A. Carlson. 2001. Marine dissolved organic matter and carbon cycle. *Oceanography* 14: 41-49.
- Hernández, A. J. M., F. Delgadillo H., T. Camiro V., M. López M. 2007. Estudio de las variables del CO₂ en la región de las grandes islas en el Golfo de California en condiciones de invierno. *In: B. Hernández de la T. y G. Gaxiola C. (eds.). Carbono en ecosistemas acuáticos de México. INE-SEMARNAT, CICESE.*
- Hernández, A. J. M., G. Gaxiola C., F. Chavez, T. Takahashi, D. Feely, C. L. Sabine, B. Hales, R. Lara L. 2010. Variabilidad espacial y temporal del flujo de CO₂ océano-atmósfera. pp. 197-208. *In: G. Gaxiola C. y R. Durazo (eds.). Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007. SEMARNAT, INE, CICESE, UABC.*
- Hidalgo, G. R. M., S. Álvarez, B. y A. Zirino. 1997. Mezcla en la región de las grandes islas del Golfo de California: efecto en la pCO₂ superficial. *Ciencias Marinas* 23: 317-327.
- Laruelle, G. G., R. Lauerwald, B. Pfeil and P. Regnier. 2014. Regionalized global budget of the CO₂ exchange at the air-water interface in continental shelf seas. *Global Biogeochem. Cycles* 28: 1199-1214.
- Le Quéré, C., R. Moriarty, R. M. Andrew, G. P. Peters, P. Ciais, P. Friedlingstein, S. D. Jones, S. Sitch, P. Tans, A. Arneeth, T. A. Boden, L. Bopp, Y. Bozec, J. G. Canadell, F. Chevallier, C. E. Cosca, I. Harris, M. Hoppema, R. A. Houghton, J. I. House, T. Johannessen, E. Kato, A. K. Jain, R. F. Keeling, V. Kitidis, K. Klein G., C. Koven, C. Landa, P. Landschützer, A. Lenton, I. Lima, G. Marland, J. T. Mathis, N. Metzl, Y. Nojiri, A. Olsen, W. Peters, T. Ono, B. Pfeil, B. Poulter, M. R. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. E. Salisbury, U. Schuster, J. Schwinger, R. Séférian, J. Segschneider, T. Steinhoff, B. D. Stocker, A. J. Sutton, T. Takahashi, B. Tilbrook, N. Viovy, Y. P. Wang, R. Wanninkhof, G. Van der Werf, A. Wiltshire and N. Zeng. 2015. *Earth System Science Data*. DOI: 10.5194/essd-7-47-2015. <http://www.earth-syst-sci-data.net/7/47/2015/essd-7-47-2015.html>
- Magnan, A. K., R. Billé, S. R. Cooley, R. Kelly, H. O. Pörtner, C. Turley y J. P. Gattuso. 2015. Interdependencia del océano y el clima: implicaciones para las negociaciones internacionales sobre el clima. *Policy Brief. Clima-Océano y Zonas Costeras* 4: 1-4.

- Montes, H. M. A., S. Álvarez B. and A. Zirino. 1998. The winter air-water CO₂ net flux is not significant in the Gulf of California to the north of 30°N. *Ciencias Marinas* 249: 483-490.
- Muñoz, A. M. A., J. R. Lara L., S. Álvarez B., C. Bazán G. and M. De la Cruz O. 2015. Water-air carbon fluxes in the coastal upwelling zone off northern Baja California. *Ciencias Marinas* 41: 157-168.
- Reimer, J. J., R. Vargas, S. V. Smith, R. Lara L., G. Gaxiola C., J. M. Hernández A., A. Castro, M. Escoto R. and J. Martínez O. 2013. Air-sea CO₂ fluxes in the near-shore and intertidal zones influenced by the California Current. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 118: 1-16.
- Ribas, R. M., J. M. Hernández A., V. F. Camacho I., A. Cabello P., A. Mejía T., R. Durazo, S. Galindo B., A. J. Souza, J. M. Forja and A. Siqueiros V. 2011. Effects of upwelling, tides and biological processes on the inorganic carbon system of a coastal lagoon in Baja California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 95: 367-376.
- Rodríguez, I. C., S. Álvarez B., S. G. Marinone and J. R. Lara L. 2013. The Gulf of California is a source of carbon dioxide to the atmosphere. *Ciencias Marinas* 39: 137-150.
- Sámamo, R. C. A. y R. Sosa A. 2013. Variación temporal de pH y CID en las bahías de Manzanillo, Colima. pp. 461-466. *In: F. Paz, M. Bazán y V. Saynes (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2013. Serie síntesis nacionales. Programa Mexicano del Carbono, Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo, Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Monterrey, Texcoco, México.*
- Sánchez, N. R. 2015. Flujos de CO₂ entre la atmósfera y las aguas costeras de las Bahías de Manzanillo y Santiago. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad de Colima.
- Sosa, A. R. y F. Chávez, J. Mimbela L. 2013. pCO₂ en la superficie del mar y atmosférica en las Bahías de Manzanillo, México. pp. 474-458. *In: F. Paz, M. Bazán y V. Saynes (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2013. Serie síntesis nacionales. Programa Mexicano del Carbono, Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo, Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Monterrey, Texcoco, México.*
- Sosa, A. R., L. Silva I., K. A. Vega C., R. Sánchez N., S. A. Ruiz L. y A. J. García Z. 2015. Carbono inorgánico disuelto estimado en las bahías de Manzanillo, México. pp. 427-433. *In: F. Paz y J. Wong (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida y el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Texcoco, Estado de México, México.*
- Sosa, A. R., F. Chávez, G. Gaxiola C. y L. Silva I. 2016. Flujos de CO₂ entre la atmósfera y el océano en el Pacífico tropical mexicano. pp. 439-445. *In: F. Paz, J. Wong y R. Torres (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A. C. y el Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Texcoco, Estado de México, México.*
- Zaitsev, O. A. Trasviña C., J. Linero C., G. Gaxiola C. and J. Cepeda M. 2014. Oceanographic conditions over the continental shelf off Magdalena Bay (Mexico) in 2011-2012. *Ciencias Marinas* 40: 89-112.
- Zirino, A. R., J. M. Hernández A., R. A. Fuhrmann, S. Álvarez B., G. Gaxiola C., J. R. Lara L. and R. L. Bernstein. 1997. Estimate of surface pCO₂ in the Gulf of California from underway pH measurements and satellite imagery. *Ciencias Marinas* 23: 1-22.

AGUAS OCEÁNICAS SUBSUPERFICIALES SIN OXÍGENO, PERO ABUNDANTES EN CARBONO INORGÁNICO Y NUTRIENTES, FRENTE A LAS COSTAS DEL PACÍFICO DE MÉXICO

Helmut Maske Rubach^{1‡}, José Martín Hernández Ayón², Emilio José Beier Martin³

¹Departamento de Oceanografía Biológica. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California. Ensenada, Baja California, México.

²Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California (IIO-UABC). Ensenada, Baja California, México.

³Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California. Unidad La Paz, Baja California Sur, México.

[‡]Autor para correspondencia: hmaske@cicese.mx

RESUMEN

Las Zonas de Mínimo Oxígeno (ZMO) son masas de aguas oceánicas hipóxicas, con un espesor de hasta 700 m en la columna de agua. En áreas donde las ZMO incursionan en la plataforma continental, resulta en que también el bentos es hipóxico. Sin embargo, las ZMO son distintas de las zonas ‘muertas’ del fondo oceánico, que no se extienden al cuerpo principal de la columna de agua, por ejemplo, en el norte del Golfo de México. Las grandes ZMO se encuentran en las regiones del Golfo de Arabia, la de Benguela, la de África Noroeste o la del Pacífico Este. El Pacífico Oriental tiene la región con la ZMO más extensa, distribuida desde Chile hasta México. Esta ZMO tiene dos centros, uno frente a Perú y el otro frente a México, este último por sí solo constituye la ZMO con más extensión geográfica del mundo y también la ZMO menos estudiada. Las ZMO tienen una importancia ecológica y socioeconómica en la dinámica de nutrientes, la actividad biológica, pesquería y producción de gases que afectan al clima. En estas zonas existen interrogantes tales como: la variabilidad de su extensión, los mecanismos que las mantienen, la edad y la velocidad de desplazamiento y, su influencia en las masas de agua desde la costa de México hasta Canadá. Estos procesos de escala oceánica son de importancia no sólo para entender la subsistencia de la ZMO sino también para realizar pronósticos de lo que puede ocurrir bajo la influencia de los cambios climáticos. Las ZMO siempre han existido y son posibles trazadores del océano anóxico primitivo, en el que se cree que la vida apareció por primera vez. De acuerdo con los reportes, los ciclos climáticos están relacionados con la extensión de las zonas hipóxicas, las cuales podrían contraerse en periodos fríos y expandirse en los cálidos.

Palabras clave: hipoxia oceánica; zona de mínimo oxígeno; ecosistemas marinos; ciclo del carbono.

INTRODUCCIÓN

En los océanos, las zonas del mínimo de oxígeno (ZMO) se encuentran como amplias capas o estratos en el interior de la columna de agua y se diferencian de las regiones de bajo oxígeno del fondo del mar como las localizadas frente al Río Mississippi en las cuencas de fiordos. Las ZMO se encuentran aproximadamente entre 100 m y 800 m de profundidad. Las regiones geográficas de las ZMO se pueden definir por concentraciones de

oxígeno disuelto (OD) menores a 20 $\mu\text{moles kg}^{-1}$ en los perfiles verticales (Paulmier y Ruiz-Pino, 2008). La extensión vertical de las ZMO se puede delimitar por los gradientes verticales más fuertes de oxígeno disuelto (OD) conocidos como oxiclina. Solo en algunas ZMO, la baja concentración de OD llega al límite de su detección de 3 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, que es el límite de detección usando sensores oceanográficos convencionales. Las ZMO frente a México y Chile se caracterizan por contener concentraciones de OD por debajo de este

límite de concentración, en las que el OD sólo es detectable con instrumentación *in situ* (Thamdrup *et al.*, 2014). La ZMO se distribuye aproximadamente de manera simétrica a los lados del Ecuador, donde la parte norte, frente a México es la ZMO de mayor extensión regional (Figura 1). Otras regiones de extensión geográfica importante se encuentran en el Atlántico frente a África en la corriente de Benguela y también en el Mar de Arabia. Todas las ZMO tienen características locales, por ejemplo, la ZMO frente a Chile y Perú forma parte del sistema de surgencias costeras que no es

el caso del ZMO frente a México (Figura 1).

Se debe tener cuidado con el uso de la definición de ZMO, porque en otras regiones oceánicas se encuentran concentraciones de oxígeno relativamente reducidas en profundidades similares a las de las ZMO (Figura 2), sin embargo, el mínimo de oxígeno no se desarrolla con el mismo grado de hipoxia. La Figura 2 muestra que las concentraciones de OD en la zona mesopelágica, entre 100 y 1000 m en el Pacífico, son más bajas en 50 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ en comparación con el Atlántico.

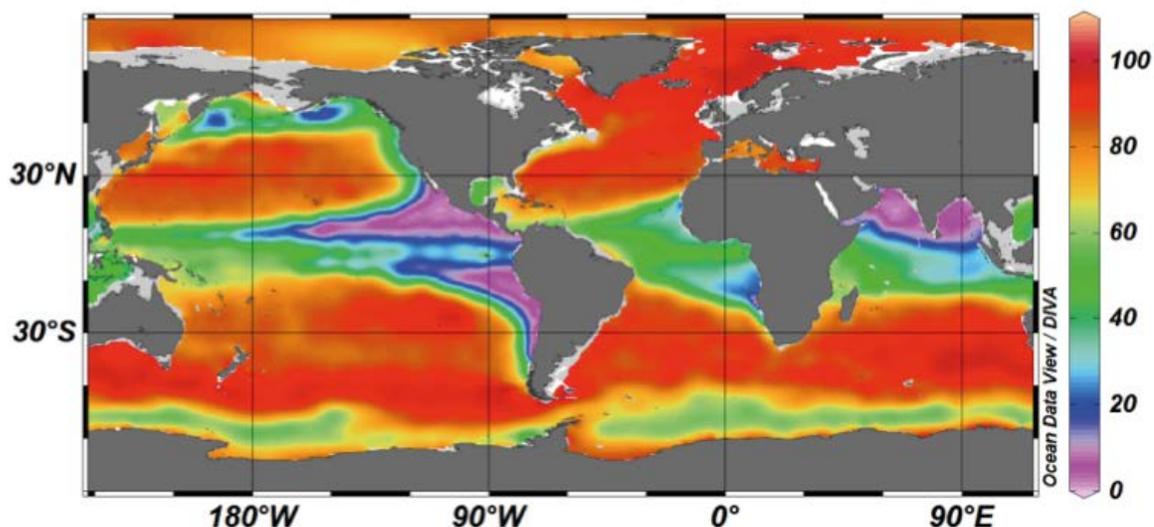


Figura 1. Distribución del porcentaje de saturación de oxígeno a 200 m de profundidad (la barra en colores representa los porcentajes de saturación). Las Zonas del Mínimo de Oxígeno (ZMO) están delimitadas con valores del 20% de saturación, equivalente a concentraciones menores a 50 $\mu\text{mol kg}^{-1}$. Fuente: Climatología de World Ocean Atlas (2005).

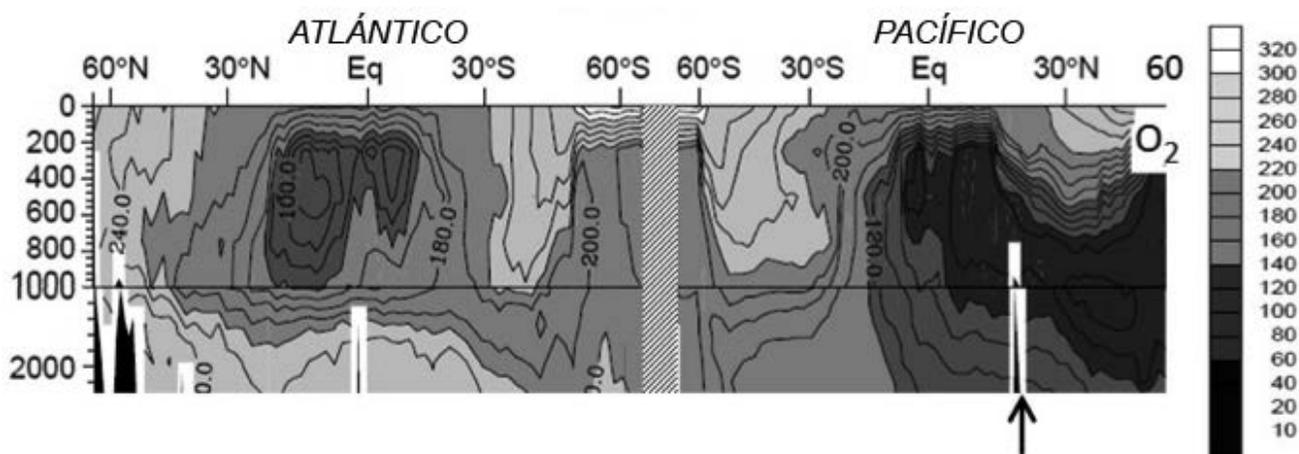
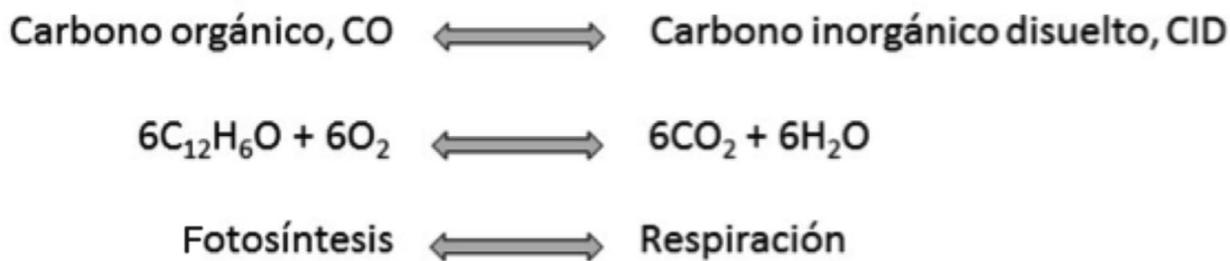


Figura 2. Secciones latitudinales en el Atlántico y el Pacífico de la concentración de oxígeno disuelto en longitudes que, aproximadamente, corresponden con el centro de los dos océanos (modificado de Sarmiento y Gruber 2006). La escala de concentración representa $\mu\text{mol kg}^{-1}$. La escala de la profundidad es distinta por arriba y por debajo de los 1000 m. La flecha señala la latitud donde se localiza la ciudad de Acapulco, ubicada 5000 km hacia el este.

De manera general, el carbono inorgánico disuelto se reduce por fotosíntesis para formar material orgánico y producir oxígeno en la zona eufótica. Este proceso se presenta, entre la superficie del mar hasta profundidades donde la luz solar disponible se reduce al uno por ciento (respecto a la de la superficie). Como resultado de la fotosíntesis, el OD en la superficie se encuentra súper-saturado con respecto a la presión parcial del oxígeno en el aire que se encuentra inmediatamente

adyacente, por lo que éste se escapa hacia la atmósfera. El carbono orgánico (CO) que se forma, se transporta hacia profundidades por debajo de la zona eufótica por hundimiento de las partículas. Este material orgánico cuando se respira, tiene resultados importantes en la química del agua, ya que libera altas concentraciones de carbono inorgánico disuelto (CID), lo que genera ambientes con valores bajos de pH y con valores altos de presión parcial del CO₂ (pCO₂):



Sin embargo, la oxidación de materia orgánica no sólo oxida al carbono orgánico, sino que también libera elementos inorgánicos como fósforo y nitrógeno (Figura 3). Cuando estos elementos se transportan por diversos mecanismos dinámicos hacia la zona

eufótica, sirven como fertilizantes para los organismos fotoautótrofos. En la Figura 3 se puede observar que las ZMO se delimitan en regiones con concentraciones de nitratos mayores a 15 µM de nitrato.

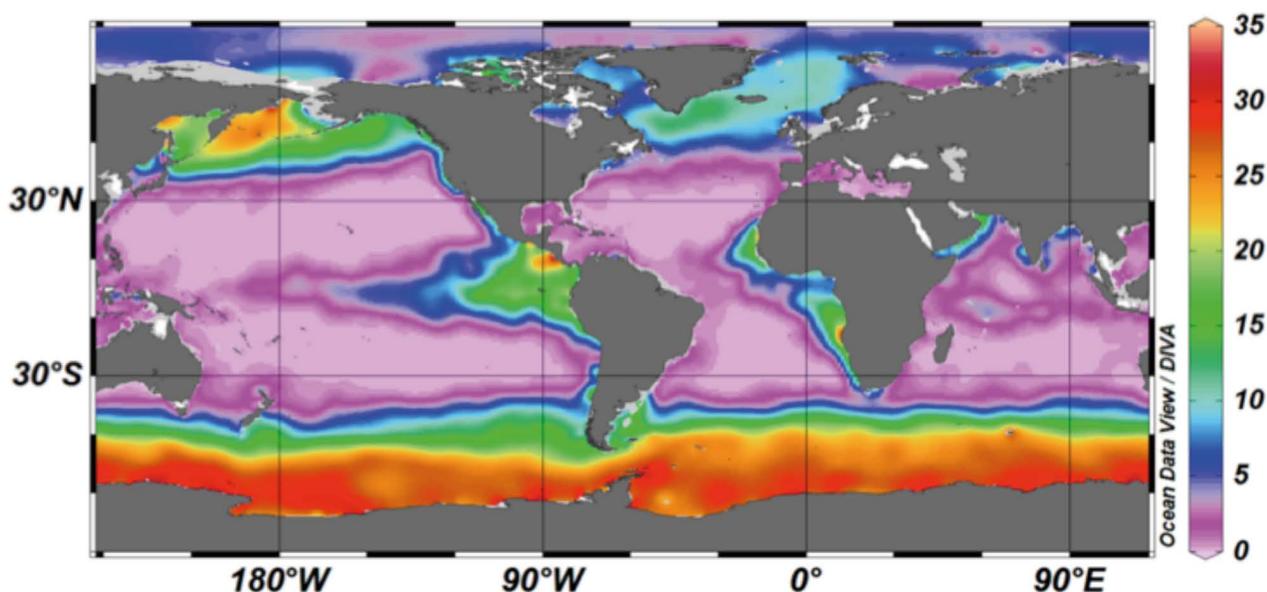


Figura 3. Distribución espacial de la concentración de nitratos a 50 m de profundidad (la barra de colores indica la concentración en µM). Las Zonas del Mínimo de Oxígeno (Figura 1) corresponden aproximadamente con las concentraciones mayores a 15 µmoles (en verde). Fuente: Climatología de World Ocean Atlas (2005).

¿Cómo se transporta la materia orgánica a la zona afótica? La turbulencia en la zona eufótica tiende a mantener a los organismos del plancton en suspensión; sin embargo, existen diferentes procesos que facilitan la formación de partículas lo suficientemente grandes como para mantener una tasa de hundimiento que supera al efecto de mezcla. Estos procesos de formación de partículas son, por ejemplo, la formación de heces de organismos planctívoros como zooplancton o medusas, o la agregación de organismos planctónicos por compuestos orgánicos extracelulares. Las partículas de materia orgánica típicamente se hunden lentamente a una velocidad entre $1 - 100 \text{ m día}^{-1}$ (Kriest y Oschlies, 2008), pero la tasa de hundimiento del material orgánico se reduce de manera exponencial con la profundidad (Martin *et al.*, 1987). Por debajo de la profundidad que define la ZMO, el flujo de materia orgánica que alimenta la respiración es mucho menor y, por tanto, se reduce proporcionalmente el consumo de oxígeno. Lo anterior se presenta en la región mesopelágica (entre 100 y 1000 m) donde ocurre la oxidación de la gran mayoría de estas partículas orgánicas (Sarmiento y Gruber, 2006). En general, organismos desde bacterias hasta protistas, continúan consumiendo y respirando el material orgánico, lo que reduce la concentración de oxígeno a estas profundidades. Sin embargo, debido a que estas aguas profundas no tienen contacto con la atmósfera, la oxigenación depende principalmente de la mezcla con masas de agua de mayor concentración de oxígeno. Por tanto, la combinación entre la tasa de consumo relativamente alta de OD por respiración y oxidación de la materia orgánica frágil, en conjunto con la poca ventilación por mezcla de masas de agua en la región mesopelágica, es la causa de la formación de las ZMO en estas profundidades.

¿Que controla la formación de las ZMO en ciertas partes del mundo? Como se mencionó anteriormente, se cree de manera general, que la formación de ZMO es el producto del desbalance entre la alta tasa de producción de partículas orgánicas en superficie y una tasa alta de hundimiento, en combinación con una reducida tasa de transporte horizontal y vertical de aguas con altas concentraciones de oxígeno (Luyten *et al.*, 1983). La productividad primaria (fotosíntesis) en la zona eufótica contribuye con tasas altas de flujo de materia orgánica lábil en la columna de agua y como respuesta habrá una tasa alta de respiración profunda. La explicación expuesta anteriormente son argumentos generales que necesitan ser comprobados, con datos y, también, mediante la generación de discrepancias

entre modelos y observaciones que no han sido aún explicados (Stramma *et al.*, 2012). Por ejemplo, para la región de la ZMO de México no hay datos que documenten la dirección y velocidad de movimiento del agua. Dichos datos son críticos para evaluar los procesos que forman la ZMO frente a México.

En regiones de ZMO con surgencias costeras, se puede hipotetizar que las ZMO podrían caracterizarse por mantener una alta actividad biológica y heterótrofa que, en combinación con la ventilación débil de las aguas, da como resultado la formación de zonas del mínimo de oxígeno en las aguas sub-superficiales. En la Figura 4 se muestran, para distintos meses del año, la estratificación de la columna de agua tanto en densidad, concentración de oxígeno y biomasa de fitoplancton en un transecto a lo largo de la latitud 20°N (muy cercano a la zona de surgencias en marzo y junio de Cabo Corrientes, o de generación de remolinos ciclónicos y anticiclónicos en agosto y noviembre, Kurczyn *et al.*, 2012). Las isolíneas punteadas en negro, corresponden con las anomalías de densidad potencial, las cuales en marzo se desplazan por surgencias hacia la superficie. Lo mismo se observa en las isolíneas de OD de 9 y $45 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ($9 \mu\text{mol kg}^{-1}$ equivale aproximadamente a 0.2 ml L^{-1}). Como consecuencia, aguas con altas concentraciones de nutrientes inorgánicos y bajo contenido de OD, alcanzan hasta los 50 m de profundidad en la costa, exponiéndose a la llegada de más luz y desarrollando un segundo máximo de fluorescencia tan importante como el primer máximo cercano a la superficie.

La Figura 5 muestra el gran intervalo de profundidad que cubre la ZMO. Cabe mencionar que las Figuras 4 y 5, geográficamente, no corresponden al centro de la ZMO que se encuentra en la latitud de Acapulco. Desafortunadamente, hay todavía menos datos en esta región la cual representa el núcleo regional del ZMO. Las aguas superficiales en regiones de ZMO tienen características biogeoquímicas distintas (Figura 6). Por ejemplo, tienen condiciones reductoras, las cuales permiten emisiones de gases reactivos como metano y sulfuro de hidrógeno (Dugdale *et al.*, 1977; Cicerone y Oremland, 1988). Se caracterizan por ser una fuente de gases como N_2O , CH_4 y CO_2 , los cuales afectan el balance de calor cuando entran a la atmósfera. Además, se ha documentado la emisión de compuestos halogenados reactivos en estas zonas (Saiz-López *et al.*, 2007; Mahajan *et al.*, 2012). Normalmente se espera que la pérdida de nitrógeno molecular hacia la atmósfera

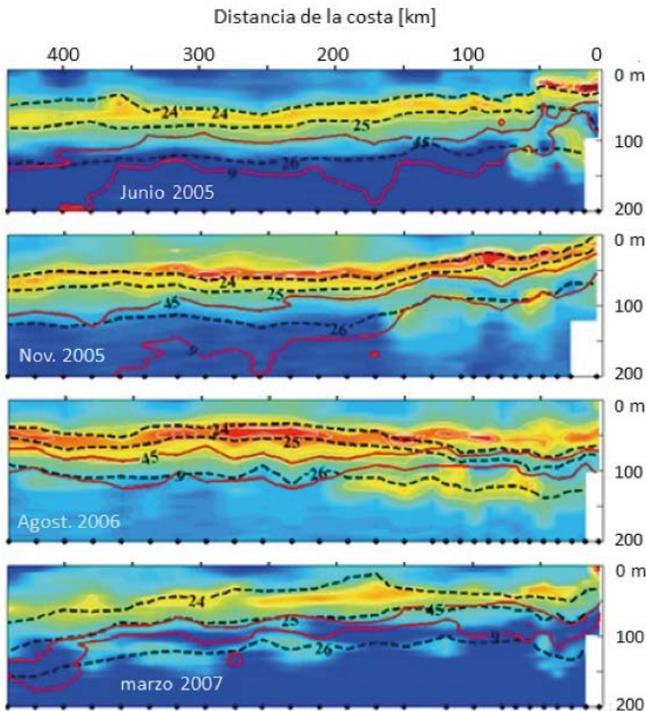


Figura 4. Transectos longitudinales (a lo largo de 20°N) desde Cabo Corrientes (punto rojo en Figura 5) hasta 500 km mar adentro en diferentes temporadas y años. Colores corresponden a valores de la fluorescencia de clorofila *in vivo*, un estimador relativo de la biomasa fitoplanctónica. Las líneas negras quebradas corresponden a valores de anomalías de densidad potencial en kg m^{-3} e indican la estratificación de la columna de agua y líneas rojas continuas corresponden a la concentración de oxígeno de 9 y 45 $\mu\text{mol kg}^{-1}$. Fuente: Cepeda-Morales, 2010.

induce la fijación de nitrógeno para reestablecer las relaciones cuantitativas entre nutrientes inorgánicos para alimentar la producción primaria, sin embargo, el proceso de convertir nitrógeno molecular a nitrógeno orgánico puede ser limitado por falta de hierro (Knapp *et al.*, 2016). La región de la ZMO alimenta la capa superficial con altas concentraciones de nutrientes y bajo pH (Paulmier *et al.*, 2011) que mantiene la alta productividad primaria y secundaria en las aguas superficiales (Figura 6).

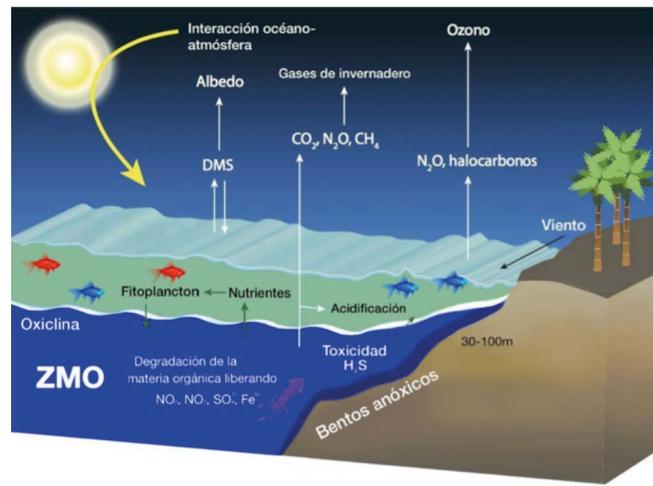


Figura 6. Representación de los procesos biogeoquímicos que se presentan en Zonas del Mínimo de Oxígeno. Fuente: <http://www.solas-int.org/figures-conceptual-diagrams.html>. Modificado por Yisaak Hernandez-Luna.

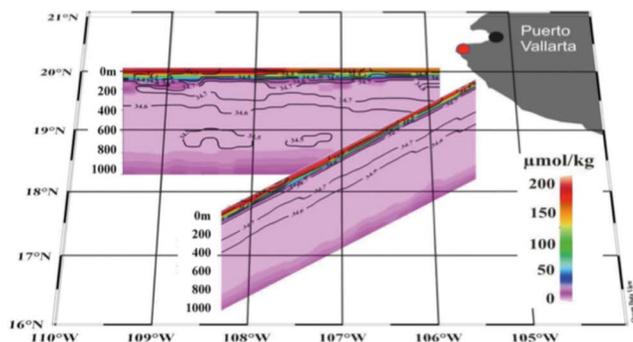


Figura 5. Secciones de la distribución vertical de oxígeno en febrero 2005. Los datos indican un grosor del ZMO de <100 m hasta 800 m, destaca que por debajo de 800 m la concentración de oxígeno disuelto aumenta otra vez. El punto rojo indica el Cabo Corrientes. Fuente: Maske *et al.*, 2010.

El significativo impacto global de las ZMO ha motivado la conformación de proyectos internacionales que abordan en estas regiones estudios desde el 2010. Un proyecto internacional articulado en colaboración con otros grandes proyectos como el IGBP y GEOTRACES CLIVAR están haciendo frente a este tipo de problemas. La investigación propuesta se ha centrado principalmente en la ZMO del Pacífico Suroriental Tropical, en donde se examinan las cuestiones relacionadas con los procesos y los efectos en el clima (<http://www.solas-int.org/mts/research-strategy-5.html>). Los reportes indican que, aun cuando se conoce que las zonas de surgencias son fuentes de CO_2 , N_2O y metano a la atmósfera, no es claro cómo se acoplan estas emisiones (Paulmier *et al.*, 2008), ni tampoco cuál es el efecto asociado en el clima. Los expertos indican que el conocimiento de los factores tales como el grado de mezcla mecánica, la conexión

con la circulación ecuatorial y los flujos de la materia orgánica permitirán determinar el estatus del proceso de respiración en cada una de las regiones en donde existen ZMO (Law *et al.*, 2013).

En párrafos anteriores se mencionaron las concentraciones bajas de oxígeno disuelto en la ZMO frente a México, pero en realidad no se sabe qué tan bajas son estas concentraciones debido a que la manera tradicional en que se han realizado las mediciones; las cuales han sido utilizando técnicas químicas y fotométricas (método de Winkler) en cubierta, pero con limitaciones en la detección por debajo de los 10 μM . Parte del problema de este método, es la contaminación por oxígeno que ocurre durante la colecta de las muestras. Por ejemplo, el PVC de las botellas para muestrear, la vidriería y las soluciones usadas, adsorben suficiente oxígeno como para alterar las muestras. En la actualidad, un método electroquímico que permite medir concentraciones por debajo de 4 μM , se realiza mediante un electrodo tipo Clark de oxígeno, en combinación con una corriente que reduce el oxígeno en el electrolito del electrodo con una resolución de 1.0 nanomolar (Lehner *et al.*, 2015).

DISMINUCIÓN DEL OXÍGENO EN EL PACÍFICO ECUATORIAL

Existe una tendencia general a la disminución del OD en los océanos. Hay pocos lugares en el mundo donde se realicen monitoreos de larga duración con información que permita documentar cambios del OD por década, en los océanos; sin embargo, en lugares ecológicamente tan diferentes como la Estación P, en el norte del Pacífico, Whitney *et al.* (2007) reportaron disminuciones de oxígeno superiores al 20%, a profundidades de 100-600 m y en profundidades de 200-300 m en la bahía del sur de California (Bograd *et al.*, 2015).

Investigaciones recientes sugieren que las ZMO se están expandiendo (Keeling y García, 2002; Stramma *et al.*, 2008; Figura 7). Los autores reportan que en los últimos 50 años ha ocurrido una disminución de las concentraciones de oxígeno disuelto entre los 300 y 700 m de profundidad. En contraste con estas escasas observaciones, hay modelos que predicen un aumento de las concentraciones de OD en la termoclina tropical, con una reducción asociada de las áreas subóxicas (Bopp *et al.*, 2002; Matear y Hirst, 2003). Sin embargo, en la actualidad se menciona que, como resultado del calentamiento del océano, la acidificación y la

desoxigenación actuarán sinérgicamente como factores de estrés en los ecosistemas marinos (Keeling *et al.*, 2010; Gruber, 1980), lo que acelera la necesidad de entender el funcionamiento de las ZMO.

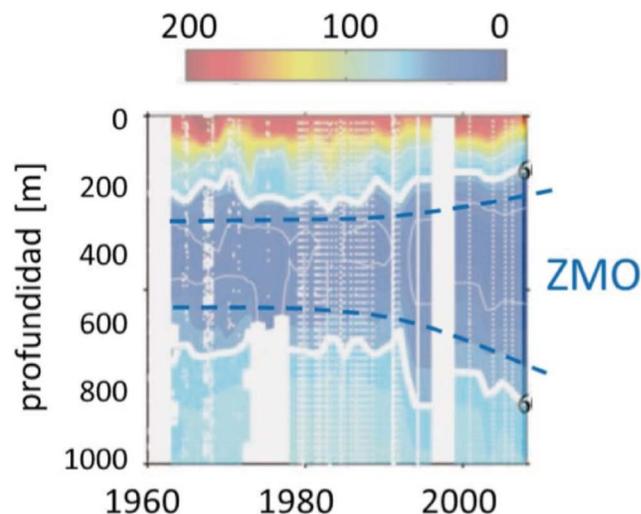


Figura 7. Aumento del grosor de la zona de bajo oxígeno en el Pacífico ecuatorial, aproximadamente a 110° Oeste. La barra de color indica la concentración de oxígeno en $\mu\text{mol L}^{-1}$. Los cambios son más pronunciados después de 1980. Modificado de Stramma *et al.*, 2008.

Por otra parte, se ha reportado la aparición de zonas con muy bajas concentraciones de oxígeno en la plataforma continental del Estado de Oregon (USA) y, que como consecuencia se presenten mortalidades masivas de organismos. Eventos como estos generan un aumento en el interés y en la preocupación por determinar y conocer los efectos de la hipoxia en los sistemas costeros (Grantham *et al.*, 2004, Chen *et al.*, 2008). Un ejemplo de lo anterior es la migración de aguas hipóxicas con concentraciones menores a 1.4 ml L^{-1} hacia aguas menos profundas, frente a las costas de California sobre la plataforma continental, con los riesgos ecológicos asociados (Bograd *et al.*, 2008). Otro ejemplo es lo ocurrido en México, en donde a 5 km de la costa se observó hipoxia con efecto de mortalidad masiva en las aguas costeras al sur de Ensenada (Hernández *et al.*, datos no publicados). Se estima que la disminución en la velocidad de la circulación de las masas de agua, los cambios en los patrones del viento, el aumento en la estratificación, la baja concentración inicial de OD en aguas superficiales de temperatura alta (el oxígeno preformado) y, el lento transporte de las masas de agua de bajo OD, pueden

ser los responsables de los eventos antes mencionados. Se conoce que el OD está estrechamente relacionado con el pH del agua de mar, es decir, que procesos como el de respiración, generan la liberación de CO_2 , lo que disminuye el pH. Por tanto, si aguas hipóxicas son también aguas de menor pH, cuando se transportan por surgencias, como ocurre típicamente en las costas del Pacífico nororiental, se genera un doble efecto en los ecosistemas marinos. La presencia de aguas de bajo pH sobre la plataforma continental, desde Canadá hasta las costas de Baja California en México durante eventos de surgencias (Feeley *et al.*, 2008), aunado a la presencia de aguas con bajas concentraciones de oxígeno, imponen un doble efecto en los ecosistemas marinos del Pacífico Nororiental Subtropical.

ORGANISMOS MARINOS EN ZONAS DEL MÍNIMO DE OXÍGENO

La baja concentración de oxígeno en las ZMO impacta las condiciones óptimas de los organismos en diferentes grados, principalmente por la limitación de la respiración aeróbica mitocondrial. Ekau *et al.* (2010) mostraron que por debajo de una concentración de O_2 de $60 \mu\text{mol L}^{-1}$ (la cual corresponde a una presión parcial crítica, P_{crit} , de aproximadamente 30%), la mayoría de los organismos estarían bajo un impacto significativo por falta de oxígeno. Vaquer y Duarte (2008) reportaron concentraciones letales para diferentes grupos de organismos marinos e indican que por debajo de $1 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ las concentraciones serían letales para gasterópodos y de menos de $2 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ para crustáceos. Hay dos razones por lo que la temperatura ambiental está estrechamente ligada con la concentración de oxígeno y a la actividad respiratoria: 1) porque la solubilidad de oxígeno atmosférico es inversamente proporcional con la temperatura del agua y 2) porque la actividad respiratoria de los organismos ectotermos depende de la temperatura. Deutsch *et al.* (2015) definen un índice metabólico que considera la razón entre tasa de transporte de oxígeno disponible y el consumo de oxígeno necesario para alimentar la actividad metabólica basal. Mediante el uso de dicha tasa, los autores llegaron a la conclusión de que habría una reducción global de los hábitats disponibles para animales marinos. Los conceptos de este análisis se aplican de manera directa a la posible ampliación de las ZMO.

Por otro lado, Brewer y Peltzer (2009) definen un índice de respiración en la ZMO para estimar el

impacto metabólico de la combinación de reducción de oxígeno y el aumento de carbono inorgánico en el océano; sin embargo, tal como Seibel y Childress (2013) documentaron, este índice no tiene fundamento fisiológico. Estos autores argumentan que la mayoría de los organismos marinos tienen una presión parcial crítica de oxígeno (P_{crit}) suficientemente baja para delimitar el metabolismo que está cercano de la presión parcial de oxígeno característico de su ambiente. También mencionan que la concentración de carbono inorgánico disuelto (CID) nunca llega a ser suficientemente alta en el océano, como para afectar a la respiración, además, el ambiente celular en eucariontes se controla aislando la respiración mitocondrial del sistema del CID, ya que está directamente ligado con el pH ambiental. Se supone que el CID impacta en diferentes aspectos fisiológicos de organismos marinos, no sólo a través de la respiración, como se ha conceptualizado en el índice de respiración (Doney *et al.*, 2009).

En las ZMO la concentración de oxígeno por definición es menor de $20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y Vaquer y Duarte (2008) en una revisión bibliográfica sobre organismos, desde peces hasta invertebrados, encontraron un límite de $50 \mu\text{mol kg}^{-1}$ como concentración letal para la mitad de los organismos. La baja concentración de oxígeno de las ZMO restringe el hábitat de los organismos con respiración mitocondrial en las aguas por arriba o por debajo de las ZMO. Muchos de los organismos oceánicos exhiben migración vertical diurna, suben en la noche para alimentarse y bajan durante el día para reducir su visibilidad y posibilidad de pastoreo. Durante el día muchos de estos organismos se encuentran justo en la frontera de la oxiclina buscando bajar lo más posible, pero sin entrar a la zona anóxica. La alta concentración de organismos en la oxiclina se puede documentar mediante mediciones de un sonar, el cual es una manera muy conveniente para generar mapas de la oxiclina durante el día (Bertrand *et al.*, 2010).

Los peces más grandes necesitan altas concentraciones de oxígeno (que sólo se encuentran en las aguas superficiales) para realizar el intercambio de oxígeno entre el agua y las branquias. Gran parte de la pesca de atún en México se encuentra en la región del ZMO y se argumenta que la limitación del hábitat del atún se restringe a la capa superficial la cual cuenta con concentraciones de oxígeno suficiente y que el reducido grosor de esta capa superficial influye de manera importante en la pesquería. Se

supone que la limitación del hábitat (restricción de hábitat), debida a la falta de oxígeno, no sólo influye en la pesquería de atún, sino que también afecta a organismos más pequeños. No obstante, existen diferentes procesos de adaptación de la respiración aeróbica a bajas concentraciones de oxígeno, tales como tasas metabólicas reducidas y una ampliación de la superficie de branquias, por ejemplo, eufausiacea, cefalópodos o protistas. Sin embargo, los mecanismos metabólicos de estos organismos requieren de mayores estudios para su entendimiento. Como se mencionó anteriormente, aparte de la falta de oxígeno, los organismos están potencialmente sujetos al estrés ante la alta concentración de protones en la ZMO. El fuerte gradiente de pH en la oxiclina, hasta 0.5 unidades de pH entre los dos lados de la oxiclina, puede dificultar a los organismos a cruzar la oxiclina. Doney *et al.* (2009) discuten el impacto de la reducción del pH oceánico como consecuencia del aumento de la presión parcial de CO₂ atmosférico. Estos cambios globales actuales son mucho menos drásticos que la disminución de pH en las aguas de ZMO y permiten ver condiciones típicas de los océanos del futuro.

En las costas del Pacífico Tropical frente a México, el intervalo de profundidad del límite superior de la capa del mínimo de oxígeno produce que la plataforma continental sea hipóxica (se incluye el piso marino). En estas condiciones la lluvia de materia orgánica que llega al fondo no se oxida completamente porque pocos organismos son capaces de asentarse y procesar la materia orgánica (cuando normalmente el piso marino se caracteriza por ser un ecosistema activo). Sólo la franja costera arriba de la oxiclina, de aproximadamente 50 m, se queda en gran parte protegido de las aguas hipóxicas de bajo pH. Sin embargo, las profundidades de la oxiclina cerca de la costa son variables y cambian con el ritmo de las condiciones meteorológicas y oceanográficas, por eso esta franja costera somera también tiene cierta probabilidad de exposición a aguas de la ZMO. Esta franja incluye los pocos corales hermatípicos existentes en el Pacífico frente a México. Cuando sube la oxiclina estos corales hermatípicos están expuestos a bajos valores de pH de la ZMO, lo que puede promover la disolución del carbonato de calcio, la cual puede ser una razón de la falta de arrecifes importantes de coral en la costa. Es posible que una ampliación de la ZMO pueda reducir los pocos sitios de coral que existen actualmente en la costa del Pacífico frente a México.

LOS RETOS EN LA ZMO

Existe la necesidad de realizar trabajo multidisciplinario, para lo cual se requiere que se agrupen los especialistas de diferentes instituciones. Por tal motivo, en noviembre del 2014 se realizó el taller “La Zona del mínimo de oxígeno en el Pacífico Mexicano: física, biogeoquímica y ecología. Conocimiento, investigaciones actuales y futuras”. Participaron 20 instituciones de México en donde se resaltaron fortalezas y debilidades, pero se destacó la necesidad de trabajos multidisciplinarios y la necesidad de contar con infraestructura moderna en México. Curiosamente, la ZMO más grande a nivel mundial, es la menos estudiada; existen programas de investigación internacionales sobre las ZMO de África, Mar de Arabia y Perú/Chile, que han generado información y publicaciones y, en consecuencia, un mayor conocimiento sobre estas ZMO. Se han realizado cruceros de investigación en regiones que incluyen los bordes de la ZMO de México, pero por diversas razones, los cruceros solo han cubierto la zona de ‘transición’ al sur del Golfo de California o la región de Golfo de Tehuantepec. En la región central de la ZMO, que se encuentra cerca de Acapulco y como ya se mencionó, los datos oceanográficos son muy limitados.

Es necesario iniciar un programa de investigación de la ZMO frente a México para caracterizar la física, química y biología de la ZMO, en su extensión tridimensional, con cruceros, con vehículos submarinos autónomos, perfiladores ARGO y boyas instrumentadas. Estas mediciones permitirían generar información estacional e interanual requerida para entender y comprender su funcionamiento. En México existe gran interés en generar información sobre el comportamiento de las ZMO en condiciones de El Niño/La Niña ya que es un área muy sensible a estos eventos ecuatoriales. El tema de la desoxigenación del océano (Keeling *et al.*, 2010) no es un tema prioritario para la sociedad y es consecuencia de no estar conciente de esta problemática, al igual que lo es la acidificación del océano. Es muy probable que la desoxigenación oceánica tenga efectos en los ecosistemas marinos, que involucren disciplinas como la oceanografía física, oceanografía biológica, oceanografía química, pesquerías, microbiología marina, paleoceanografía y ciencias del clima.

El entendimiento de la ZMO en zonas de surgencias y regiones productivas es muy importante también con respecto al componente económico e industrial. Por

ejemplo, la abundancia de peces podría disminuir al hacerse más somera la ZMO, con efectos directos en el tamaño del nicho ecológico y con posibles efectos debidos a la acidificación. Otro aspecto de importancia de la ZMO es la variabilidad estacional, interanual y decadal, así como su efecto e impacto a nivel local, regional y global en las pesquerías, la agricultura y el turismo. En México existe la probable eutrofización si no se cuidan los vertimientos a las aguas costeras debido a aportes de materia orgánica y nutrientes de los centros turísticos como Acapulco, Puerto Vallarta y Nuevo Vallarta. Este efecto no será el óptimo si se llegara a combinar con las incursiones de las aguas de la ZMO que contienen concentraciones altas de nutrientes inorgánicos. En este momento la oxiclina en estos lugares posiblemente alcance 30 m de profundidad y probablemente sus nutrientes contribuyen a la eutrofización antropogénica en las bahías. Otro ejemplo son los posibles efectos en zonas coralinas que existen desde el sur de Sinaloa hasta Oaxaca (Reyes y López, 1998), las cuales sufrirían problemas debidos a los posibles valores de pH bajos cuando la oxiclina pierda profundidad. Además, concentraciones altas de nutrientes inorgánicos afectarán negativamente el desarrollo de los corales. Para estas regiones, un criterio de salud de los ecosistemas es conocer la concentración de oxígeno, lo cual puede ayudar en temas de manejo de recursos pesqueros y de playas limpias en temas de turismo. Las ZMO se consideran una ventana al futuro y representan laboratorios naturales que permiten determinar escenarios de bajo pH y bajo oxígeno por lo cual se pueden visualizar los impactos en las estructuras ecológicas, efectos en el clima, situaciones ambientales e impactos sociales.

LITERATURA CITADA

- Bertrand, A., M. Ballón and A. Chaigneau. 2010. Acoustic observation of Living organisms reveals the upper limit of the oxygen minimum zone. *PLoS ONE* 5(4): e10330. DOI:10.1371/journal.pone.0010330.
- Bograd, S. J. C., C. G., DiLorenzo, E., D. M. Palacios, H. Bailey and W. Gilly. 2008. The shoaling of the hypoxic boundary in the California Current. *Geophys. Research Letters*.
- Bopp, L., C. Le Quere, M. Heimann, A. C. Manning and P. Monfray. 2002. Climate induced oceanic fluxes: implications for the contemporary carbon budget. *Global Biogeochem. Cycles* 16, 1022. DOI:10.1029/2001GB001445
- Brewer, P. G. and E. T. Peltzer. 2009. Limits to marine life. *Science* 324: 347-348.
- Cepeda, M. J. 2010. Respuesta de los productores primarios a algunos procesos dinámicos en la región de transición del Pacífico oriental tropical mexicano. Tesis Doctoral en Ecología Marina CICESE. 140 p.
- Cicerone, R. J. and R. S. Oremland. 1988. Biochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochem. Cycles* 2, 299. DOI:10.1029/GB002I004P00299.
- Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely and J. A. Kleypas. 2009. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:169–92. DOI:10.1146/annurev.marine.010908.163834
- Deutsch, C., A. Ferrel, B. Seibel, H. O. Pörtner and R. B. Huey. 2015. Climate change tightens a metabolic constraint on marine habitats. *Science* 348: 1132-1135. DOI:10.1126/science.aaa1605
- Dugdale, R., J. Goering, R. Barber, R. Smith and T. Packard. 1977. Denitrification and hydrogen sulfide in Peru upwelling region during 1976. *Deep-Sea Res.* 24, 601. DOI:10.1016/0146-6291(77)90530
- Ekau, W., H. Auel, H. O. Pörtner and D. Gilbert. 2010. Impacts of hypoxia on the structure and processes in pelagic communities (zooplankton, macro-invertebrates and fish). *Biogeosciences* 7: 1669–1699. DOI:10.5194/bg-7-1669-2010
- Feely, R., C. Sabine, M. Hernandez-Ayon, D. Ianson and B. Hales. 2008. Evidence for upwelling of corrosive, acidified water on to the continental shelf. *Science Express* DOI:10.1126/science.1155676
- Grantham, B. A., F. Chan, K. Mielsen, D. Fox, J. Barth, A. Huyer, J. Luchenco and B. Menge. 2004. Upwelling-driven near shore hypoxia signals ecosystem and oceanographic changes in the northeast Pacific. *Nature* 429: 749-754.
- Gruber, N. 1980. Warming up, turning sour, losing breath: ocean biogeo-chemistry under global change. 2011. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A.* 369. DOI:10.1098/RSTA.2011.0003
- Keeling, R. F., A. Körtzinger and N. Gruber. 2010. Ocean deoxygenation in a warming world. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2010. 2, 199. DOI:10.1146/ANNUREV.MARINE.010908.163855
- Keeling, R. F. and H. E. Garcia. 2002. The change in oceanic O₂ inventory associated with recent global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99: 7848-7853.
- Knapp, A. N., K. L. Casciotti, W. M. Berelson, M. G. Prokopenko and D. G. Capone. 2016. Low rates of nitrogen fixation in eastern tropical South Pacific surface waters. *Proceedings of the National Academy of Sciences* DOI:10.1073/pnas.1515641113
- Kriest, I. and A. Oschlies. 2008. On the treatment of particulate organic matter sinking in large-scale models of marine biogeochemical cycles. *Biogeosciences* 5: 55–72.
- Kurczyn, J. A., E. Beier, M. F. Lavín and A. Chaigneau. 2012. Mesoscale eddies in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite

- llite altimetry. *J. Geophys. Res.* 117, C10021. DOI:10.1029/2012JC007970
- Lehner, P., C. Larndorfer, E. Garcia-Robledo, M. Larsen, S. M. Borisov and N. P. Revsbech. 2015. LUMOS - A sensitive and reliable optode system for measuring dissolved oxygen in the nanomolar range. *PLoS ONE* 10(6): e0128125. DOI:10.1371/journal.pone.0128125
- Luyten, J. R., J. Pedlosky and H. Stommel. 1983. The ventilated thermocline. *L. Physical Ocean.* 13: 292-309.
- Mahajan, A. S., J. C. Gomez Martin, T. D. Hay, S. J. Royer, S. Yvon-Lewis, Y. Liu, L. Hu, C. Prados-Roman, C. Ordoñez, J. M. C. Plane and A. Saiz-Lopez. 2012. Latitudinal distribution of reactive iodine in the Eastern Pacific and its link to open ocean sources. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 12, 15541. DOI:10.5194/ACPD-12-15541
- Martin, J. H., G. A. Knauer, D. M. Karl and W. W. Broenkow. 1987. VERTEX: Carbon cycling in the northeast Pacific Deep-Sea Research 34, 267-285.
- Maske, H., R. Cajal Medrano, A. Trasviña Castro, A. Jiménez Mercado, C. O. Almeda Jauregui, G. Gaxiola Castro and J. Ochoa. 2010. Inorganic carbon and biological oceanography above a shallow oxygen minimum in the entrance to the Gulf of California in the Mexican Pacifica. *Limnol. Oceanogr.* 55: 481-49.
- Matear, R. J. and A. C. Hirst. 2003. Long-term changes in dissolved oxygen concentrations in the ocean caused by protracted global warming. *Global Biogeochem. Cycles* 17, 1125. DOI:10.1029/2002GB001997
- Paulmier, A. and D. Ruiz-Pino. 2008. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Prog. Oceanogr.* DOI:10.1016/j.pcean.2008.08.001
- Paulmier, A., D. Ruiz-Pino and V. Garçon. 2008. The oxygen minimum zone (OMZ) off Chile as intense sources of CO₂ and N₂O. *Cont. Shelf Res.* 2008, 28, 2746. DOI:10.1016/J.CSR.2008.09.012
- Saiz-Lopez, A., A. S. Mahajan, R. A. Salmon, S. J. B. Bauguitte, A. E. Jones, H. K. Roscoe and J. M. C. Plane. 2007. Boundary layer halogens in coastal. *Antarct. Sci.* 317, 348.
- Sarmiento, J. and L. N. Gruber. 2006. *Ocean biogeochemical dynamics.* Princeton U. Press, ISBN-13: 978-0-691-01707-5.
- Seibel, A. A. and J. J. Childress. 2013. The real limits to marine life: a further critique of the respiration index. *Biogeosciences* 10: 2815-2819. DOI:10.5194/bg-10-2815-2013
- Stramma, L., G. C. Johnson, J. Sprintall and V. Mohrholz. 2008. Expanding oxygen-minimum zone in the tropical oceans. *Science* 320: 655-658.
- Stramma, L., A. Oschlies and S. Schmidtko. 2012. Mismatch between observed and modeled trends in dissolved upper-ocean oxygen over the last 50 yr. *Biogeosciences* 9: 4045-4057.
- Thamdrup, B., T. Dalsgaard and N. P. Revsbech. 2014. Widespread functional anoxia in the oxygen minimum zone of the Eastern South Pacific. *Deep-Sea R. I* 6: 36-45. DOI:10.1016/j.dsr.2012.03.001
- Vaquier-Sunyer, R. and C. M. Duarte. 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *PNAS* 105: 15452-15457. DOI: 10.1073/pnas.0803833105
- Whitney, F. A., H. Freeland and M. Robert. 2007. Decreasing oxygen levels in the interior waters of the subarctic Pacific. *Progress in Oceanography* 75: 179-199. DOI:10.1016/j.pcean.2007.08.007

ACIDIFICACIÓN DEL OCÉANO: SITUACIÓN EN AGUAS MEXICANAS

José Martín Hernández Ayón¹, José Rubén Lara Lara², Gilberto Gaxiola Castro³

¹Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, BC.

²Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, BC.

³Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, BC.

✉Autor para correspondencia: jmartin@uabc.edu.mx

RESUMEN

La absorción de CO₂ antropogénico por el océano, reduce la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera y amortigua los efectos del cambio climático. Sin embargo, cuando el CO₂ antropogénico se disuelve en el agua de mar, reacciona para formar ácido carbónico y aumenta la acidez (el pH disminuye), lo que se conoce como “acidificación de los océanos”. En un estudio realizado por instituciones de investigación de EUA, Canadá y México en las aguas costeras del Pacífico, se reportaron valores de pH de hasta 7.6 cerca de la superficie en las costas, cuando el valor normal debería ser entre 8 y 8.1, producto del transporte de aguas frías por surgencias costeras. Los valores bajos de pH se detectaron desde Canadá hasta el sur de la Península de Baja California en México. Estos resultados fueron la primera evidencia de la presencia de aguas “corrosivas” no solo en Canadá y EUA, sino también en las costas mexicanas. Es importante mencionar que, para el caso de México, se desconoce el impacto temporal que la química de estas aguas pudiera causar en moluscos, equinodermos cocolitofóridos y foraminíferos, así como los efectos en la actividad acuícola de las costas. En nuestro país se requiere de información precisa y científicamente válida en la parte marina, para de esta manera poder contribuir en los planes y programas que se enfocan en la mitigación y adaptación al cambio climático. El Programa Mexicano del Carbono (PMC) propone liderar una iniciativa para realizar estudios en las zonas costeras y bahías más representativas de los diferentes ambientes y climas de México. La propuesta pretende cubrir las diferentes escalas espacio-temporales en combinación con diferentes estrategias de muestreo: información generada por satélites, cruceros oceanográficos y boyas oceanográficas (series de tiempo). Paralelamente, se propone llevar a cabo estudios socio-ambientales en los márgenes continentales. Esto incluye nuevos asentamientos y desarrollo de actividades acuaculturales-pesqueras, turísticas, portuarias e industriales.

Palabras clave: aguas corrosivas; pH marino; química del mar; ecosistemas marinos.

INTRODUCCIÓN

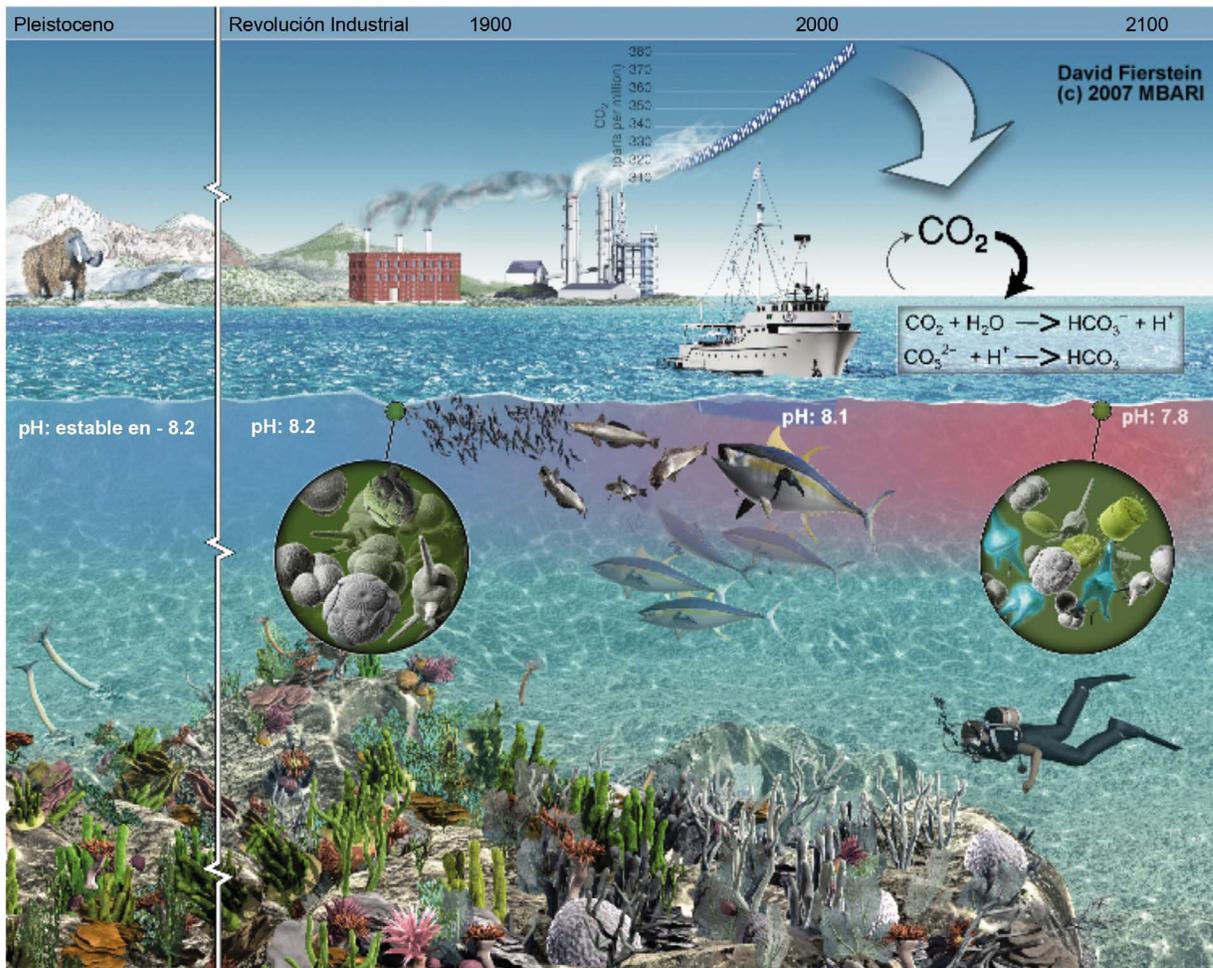
En los últimos ~250 años, la superficie de los océanos ha absorbido un tercio del total de las emisiones de CO₂ antropogénico de la atmósfera, lo que equivale a más de 550 billones de toneladas de carbono (Canadell *et al.*, 2007). Esta absorción de CO₂ por el océano, ha reducido la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera y amortigua, también, los efectos del cambio climático (IPCC, 2007). Sin embargo, cuando el CO₂ se disuelve en el océano, reacciona con el agua para formar ácido carbónico

(CO₂ + H₂O ↔ H₂CO₃) y, cuando el CO₂ antropogénico se absorbe por el agua de mar, aumenta la acidez (el pH disminuye), proceso conocido como “acidificación de los océanos” (Caldeira y Wickett, 2003). El ácido carbónico reacciona con iones de carbonato, ya sea por reacción directa (H₂CO₃ + CO₃²⁻ ↔ 2HCO₃⁻) o a través de la liberación de protones. La saturación de biominerales de carbonato de calcio, como Omega calcita (Ωcalc) y Omega aragonita (Ωarag), es función de la concentración de CO₃²⁻, del calcio (Ca²⁺) y de la temperatura del mar, que influye en el producto de solubilidad, el cual es dependiente de la presión

(K_{sp}^*), $\Omega = [Ca^{2+}] [CO_3^{2-}] / K_{sp}^*$ (Mucci, 1983). Los estados de saturación de aragonita y calcita responden directamente con los cambios de la concentración de CO_3^{2-} , de modo que, si el océano absorbe más CO_2 , el Ω_{arag} y Ω_{calc} disminuirán. Por ejemplo, los valores de $\Omega = 1$, indican que los minerales de carbonato están saturados; por otro lado, cuando el $\Omega > 1$, favorece las condiciones para que ocurra el proceso de precipitación o la preservación de minerales de carbonato. Mientras que cuando el $\Omega < 1$ indica que existe subsaturación de carbonatos y se favorece la disolución. Si el estado de saturación de aragonita y calcita disminuye, se esperan mayores retos fisiológicos en los organismos calcificadores (Fabry *et al.*, 2008; Guinotte y Fabry, 2008). En este aspecto de la saturación, se utiliza el término “corrosivo” para referirse a los efectos de las condiciones del estado de baja saturación que resultan de factores como: 1) la absorción oceánica de CO_2 antropogénico; 2) el incremento de CO_2 en zonas costeras producto de procesos naturales de respiración y 3) el aporte de agua subsuperficial con alto contenido

de CO_2 debido a los procesos de surgencias costeras.

Si se parte del inicio de la era industrial hasta el presente, el pH de las aguas superficiales del océano ha disminuido 0.1 unidades, lo que equivale a un aumento global de ~30% en la concentración de iones hidrógeno. Sin embargo, se prevé que disminuya de 0.3 a 0.4 unidades hacia finales de este siglo (Doney *et al.*, 2009; Feely *et al.*, 2004; Steinacher *et al.*, 2009). Otra forma de ver esto, es en términos de la reducción porcentual de la concentración de iones carbonato (CO_3^{2-}): de acuerdo con los datos y escenarios, en el 2000 las concentraciones de carbonatos disminuyeron ~13% con respecto a los valores pre-industriales y se espera que disminuyan ~26% para el 2030, ~33% en 2050 y ~50% en 2100 (Wolf-Gladrow *et al.*, 1999). Las extrapolaciones para regiones oceánicas con modelos del ciclo del carbono marino, sugieren que las aguas subsaturadas serán cada vez más someras y que esto afectará el hábitat de importantes pesquerías y de diversas comunidades en las próximas décadas (Feely *et al.*, 2004; Orr *et al.*, 2005).



IMPACTOS PREVISTOS PARA LAS COSTAS MEXICANAS

El cambio climático ocasionado por las actividades antropogénicas, favorecerá grandes cambios en la química del mar (disminución del pH), la productividad marina, el incremento de zonas del mínimo de oxígeno, tendrá efectos en la distribución de recursos biológicos, lo que a su vez afectará el intercambio de CO₂ entre la atmósfera y el océano, generando aguas corrosivas o acidificadas, situación que se reportó con anterioridad para las costas de Baja California (Feely *et al.*, 2008). La presencia de aguas corrosivas o acidificadas en el océano, es un tema que actualmente llama mucho la atención por sus efectos negativos en los ecosistemas marinos, ya que ante la disminución del pH se pueden disolver estructuras formadas por carbonatos como las de muchos organismos marinos. El origen de este tipo de aguas se explica por el efecto de la absorción del CO₂ de origen antropogénico y/o por el incremento de CO₂ en el agua que ocurre durante los procesos naturales de respiración de la materia orgánica.

Se sabe que la absorción continua de CO₂ antropogénico por las aguas superficiales de los océanos, las ha vuelto paulatinamente corrosivas para estructuras de carbonato de calcio de organismos marinos. En un estudio realizado por Feely *et al.*

(2008), reportaron valores de pH de hasta 7.6 cerca de la superficie en las costas del Pacífico, producto del transporte por surgencias (Figura 1) y dichos valores se detectaron desde Canadá hasta el sur de la Península de Baja California en México. Lo relevante de este hallazgo, fue que los valores presentaron diferencias negativas de hasta 0.5 unidades de pH con respecto al pH de aguas superficiales y dichos valores fueron la primera evidencia de la presencia de aguas corrosivas no solo en Canadá y EUA, sino también en las costas mexicanas (Figura 1). Este resultado no es una buena noticia, dado que se pronosticaba que estas condiciones ocurrirían hasta dentro de 50 años (Feely *et al.*, 2008). Sin embargo, es importante mencionar que se desconoce el impacto en el corto y mediano plazo que estas aguas pudieran causar en organismos que forman estructuras carbonatadas en las costas de Baja California, muchos de ellos de importancia comercial. Asimismo, existen retos en otras regiones donde se requiere generar información como las costas de Cabo Corrientes que incluye los estados de Nayarit, Jalisco y más al sur en Colima, Guerrero y Oaxaca, en las cuales sus aguas costeras se encuentran dentro de la zona del mínimo de oxígeno y se caracterizan por tener aguas de bajo pH entre 50 y 100 metros de manera natural (Franco *et al.*, 2014; Sánchez-Nava, 2015; Franco *et al.*, 2015).

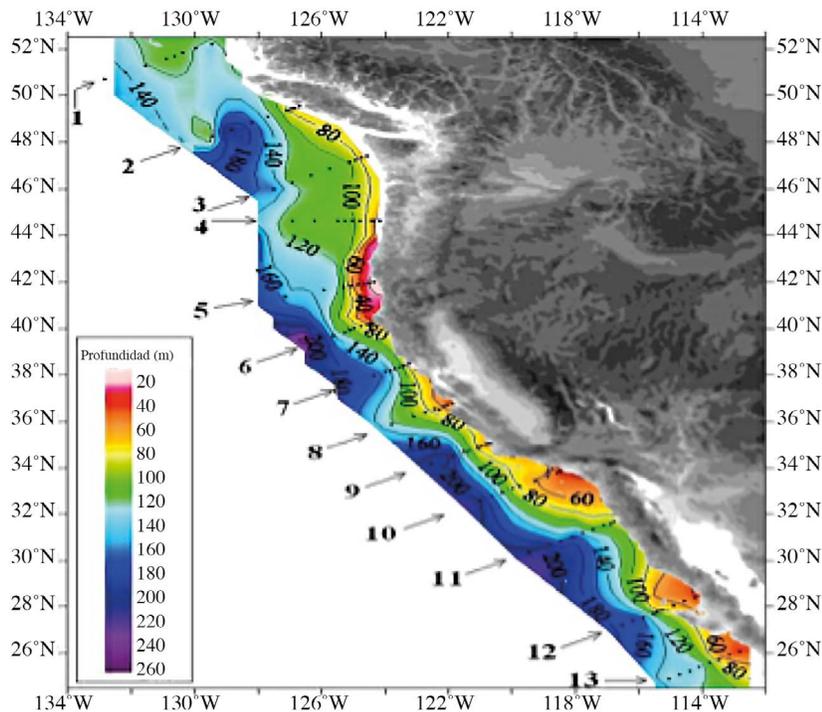


Figura 1. Distribución espacial de la profundidad en metros del agua corrosiva con valor de pH = 7.6 a lo largo de la plataforma continental de las costas de Norte América. Sobresalen los valores bajos a menor profundidad cerca de las costas.

CONSECUENCIAS QUE TENDRÍA ESTE IMPACTO PARA LA VIDA Y ACTIVIDADES BÁSICAS DE LOS POBLADORES EN ESTOS LUGARES

Se reporta, por un lado, que la reducción en la disponibilidad de iones carbonato limita la formación de las estructuras carbonatadas de las principales especies de moluscos y, por otro, que aguas con bajas concentraciones de oxígeno darían lugar a efectos negativos considerables en la abundancia de diversas especies marinas. Esto tendría un impacto perjudicial tanto en la diversidad, como en la pesca y el turismo. Además, muchos de los organismos calcificadores como cocolitofóridos y foraminíferos que forman parte del fitoplancton y zooplancton, son una fuente importante de alimento para los organismos marinos mayores. En cuanto a las comunidades pelágicas, se desconoce el efecto de las aguas corrosivas sobre su distribución y abundancia. Sin embargo, las zonas de baja concentración de oxígeno disuelto, pueden causar una compresión de los hábitats planctónicos (lo que incluye a los huevos y larvas de peces) en la columna de agua sobre y bajo la capa del mínimo de oxígeno, en donde se observan pérdidas de fauna debido a la hipoxia (Farber-Lorda *et al.*, 2010). Un efecto secundario también se presenta como resultado de la restricción en la distribución vertical de los grupos del plancton, lo que los mantiene en condiciones donde se puede presentar una disminución en la diversidad de especies y en la relación presa-depredador, lo que contribuye a la disminución de comunidades de zooplancton y permite que el fitoplancton que no se consume se hunda y se degrade (Stramma *et al.*, 2010; Ekau *et al.*, 2009; Siebel, 2011). En EUA, las agencias federales y estatales siguen muy de cerca las actividades de investigación que se enfocan en determinar los efectos de la disminución de pH y del oxígeno disuelto en los ecosistemas marinos.

INVESTIGACIONES Y ACCIONES CONCRETAS QUE ACTUALMENTE SE REALIZAN POR PARTE DEL SECTOR ACADÉMICO Y ESPECIALIZADO

En el Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California (IIO-UABC), en conjunto con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), se llevan a cabo investigaciones y

monitoreo dirigidos hacia el desarrollo de una mejor comprensión del impacto de la acidificación de los océanos en los estuarios y ecosistemas costeros mexicanos. Hay evidencias en el Norte de California de que dicho problema se relaciona con una disminución de la producción de larvas del ostión japonés *Crassostrea gigas* con problemas de sobrevivencia. En Baja California hay zonas costeras con industria de mariscos que también presentan resultados negativos, sin que los productores de moluscos conozcan el problema. El reto de las instituciones mexicanas es participar junto con los pescadores y los tomadores de decisiones, en el desarrollo de planes de monitoreo y de investigación para estudiar el problema, que lleve a propuestas de mitigación y adaptación. En México desde que se encontraron evidencias de agua corrosiva se iniciaron investigaciones en dos líneas de trabajo:

1) Cruceros oceanográficos en la costa de Baja California

El programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California) es un programa de vigilancia de los océanos en la Región Sur de la Corriente de California frente a Baja California, México y está en marcha desde el otoño de 1997. Es el modelo de programa CalCOFI que cubre la región oceánica del sur y centro de California y es coordinado por los EUA. El programa IMECOCAL proporciona información relevante para entender el comportamiento de los recursos pelágicos transfronterizos que habitan tanto en las aguas de México, como en las de Estados Unidos. El objetivo a largo plazo del programa es mejorar la capacidad de predecir la respuesta del ecosistema pelágico al cambio climático regional y mundial, así como a los efectos conjuntos de las prácticas de recolección de México y Estados Unidos. La UABC, desde el 2008, se responsabiliza del seguimiento mediante mediciones de la acidificación del océano (OA, por sus siglas en inglés) en estaciones costeras consideradas en este programa.

2) Implementación de sitios de monitoreo costero

Las series de tiempo permiten aumentar la comprensión de los procesos ecológicos y son integrales para la mejora de los modelos

de la dinámica oceánica ecológica y físico-biogeoquímica. La evidencia directa sobre el aumento de carbono inorgánico disuelto (CID) y la disminución del pH en las aguas superficiales del océano se obtuvo a partir de observaciones de series de tiempo. La UABC y el CICESE, desde 2006, realizan seguimientos bimensuales/mensuales en la estación ENSENADA ubicada al sur de Punta Banda en Ensenada, Baja California y, a partir del 2008, en un sitio cercano a dos zonas de actividad de acuicultura de ostión y mejillones. El objetivo es mantener a largo plazo el monitoreo de datos químicos y biológicos.

En México, a partir del 2005, investigadores del papel del carbono en la atmósfera, la parte terrestre, el océano y la dimensión humana, conforman el Programa Mexicano de Carbono (PMC). Dicho programa se auspició inicialmente por el INE-SEMARNAT y surgió en respuesta a los compromisos gubernamentales con programas internacionales similares (North American Carbon Program y el Global Carbon Program). El problema de la acidificación del océano forma parte de la agenda científica nacional del PMC y atiende, en parte, los compromisos nacionales e internacionales de México como parte de la Estrategia Nacional de Cambio Climático y los compromisos de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Se resalta que el cambio climático ocasionado por las actividades antropogénicas, causará grandes cambios en la química del mar, lo que tendrá consecuencias socioeconómicas significativas y destaca la necesidad de estudiar y entender el proceso para las costas mexicanas.

¿EL PAÍS SE ENCUENTRA PREPARADO PARA ENFRENTAR O ADAPTARSE A ESTOS CAMBIOS?

Es difícil responder a esta pregunta cuando se trata de un proceso de reciente aparición y se carece de información apropiada para entender sus efectos. Por un lado, el fenómeno se detectó en las costas de Baja California, pero se desconoce lo que ocurre en el resto de las costas del país, en donde se tienen ambientes oceanográficos y ecológicos completamente diferentes. Sin embargo, dado que el problema es mundial, hay información y acciones que se generan en otros países, que sirven de base para el desarrollo de acciones futuras para disminuir

la vulnerabilidad ante los impactos potenciales de la variabilidad y el cambio climático a los sistemas naturales y socioecológicos. De manera recíproca, las investigaciones y resultados de los proyectos mexicanos, generan información relevante para atender compromisos de México ante instancias internacionales sobre el tema de la acidificación, como es el caso del Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON). En el mapa de la Figura 2, se muestran los sitios que componen la red internacional de observatorios sobre el tema de la acidificación, en los que se incluye a México con la red IMECOCAL y Estación en Ensenada (http://www.pmel.noaa.gov/co2/GOA_ON/2013/). Sin embargo, destaca que para el resto de las costas de México no existen programas similares.

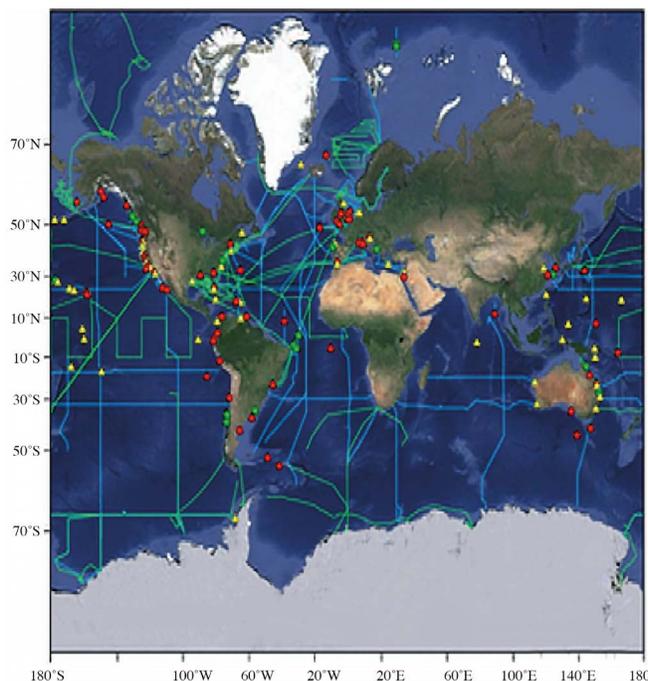


Figura 2. Mapa de la red internacional de las diferentes plataformas (ver símbolos) donde se realizan o se planea realizar observaciones de la acidificación del océano (actualización Junio del 2013). Los símbolos en rojo representan boyas que están en funcionamiento, en verde los sitios en los que se tiene planeado instalar las boyas, en amarillo se indican futuros sitios donde se realizarán series de tiempo, en verde están los muestreos que se realizan sobre barcos de oportunidad (e.g. barcos de carga) y, en azul, las rutas oceanográficas en las que se realiza monitoreo a manera de series de tiempo. La actualización muestra un mapa interactivo (<http://portal.goa-on.org/Explorer>).



FORTALEZAS Y DEBILIDADES PARA REALIZAR ESTUDIOS SOBRE LA ACIDIFICACIÓN EN MÉXICO

En México se requiere de información científicamente validada en la parte marina para poder contribuir sobre los posibles efectos de la acidificación en mares y costas. Además, mayor precisión en dicha información, permitiría contribuir en los planes y programas enfocados a la mitigación y adaptación al cambio climático. A continuación, se enumeran las fortalezas y debilidades que permitirán tener una idea general del estado de las capacidades para estudiar este tipo de problemas en los ambientes marinos mexicanos.

Fortalezas

1. Existe gran interés de las instituciones académicas sobre el tema de acidificación en México.
2. Se cuenta con experiencia en la manipulación del sistema de CO₂, de acuerdo con estándares internacionales, misma que se encuentra plasmada en numerosos artículos científicos.
3. Existe personal capacitado y con reconocimiento internacional en la medición del sistema de carbonato (pH, alcalinidad y carbono inorgánico disuelto) con altos niveles de precisión, que utilizan material de referencia y siguen la Guide for best practices for ocean acidification research and data reporting (<http://www.epoca-project.eu/index.php/guide-to-best-practices-for-ocean-acidification-research-and-data-reporting.html>).
4. Existe un sólido grupo de investigadores a nivel nacional, sobre ecología marina, oceanografía química y, fisiología y ecología de corales.
5. En las costas de México hay una gran variedad de ecosistemas marinos (e.g. estuarios, surgencias) que pueden utilizarse como “laboratorios naturales” para realizar estudios de acidificación del océano para su mejor comprensión.

Debilidades

1. Hay pocos laboratorios para la medición del sistema de carbonato para la realización de inter-calibraciones de forma adecuada.
2. Se requiere entrenamiento para la calibración y estandarización de protocolos para la medición de pH y pCO₂ con sistemas autónomos (e.g. SEAFET y SeapHOx).
3. Se requiere entrenamiento para manipular el sistema de CO₂ (pH), de acuerdo con estándares internacionales (*single-stressor experiments*).
4. Se requiere mayor capacidad técnica para la realización de experimentos *in situ*, sobre todo asociados a las condiciones de la Zona del Mínimo de Oxígeno (bajos O₂ y pH) y en zonas de surgencia costera.
5. Existe muy poca información del estudio de la AO en especies costeras y hay mucho menos estudios en especies oceánicas.
6. Se carece de una red de monitoreo (e.g. series de tiempo) del océano costero de manera que se pueda determinar la variabilidad natural del sistema de carbonatos en diferentes zonas de México.
7. Se requiere de compromisos institucionales serios y robustos (instituciones académicas y de apoyo financiero) para la operación de redes de monitoreo a largo plazo.

De la discusión anterior, que plantea retos importantes, se desprende la necesidad de institucionalizar los esfuerzos de monitoreo y comprensión de la dinámica de los ciclos biogeoquímicos en los mares y costas de México, a través de la creación de una Ley de Mares y Costas.

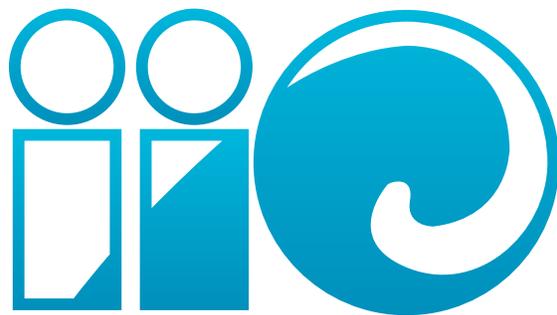
CONCLUSIONES

La acidificación de las costas y océanos de México es ya una realidad, pero se desconoce su distribución espacial y variabilidad temporal. Dada la complejidad de

este proceso, deben de continuarse e iniciarse (en otras costas de México) estudios y monitoreo dirigidos por equipos de investigación multidisciplinarios expertos en cada uno de los diferentes ambientes (marismas, macro-vegetación, manglares, estuarios, esteros, bahías, etc.). El Programa Mexicano del Carbono propone liderar esta iniciativa para realizar estudios en las zonas costeras y bahías más representativas de los diferentes ambientes y climas de México: en el Golfo de México, proponiéndose las costas de Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Tabasco, Veracruz y Tamaulipas. Mientras que en el Pacífico se proponen las costas de

los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima y Oaxaca. Para cubrir las diferentes escalas espacio-temporales se requiere de la combinación de diferentes estrategias de muestreo: información generada por satélites, cruceros oceanográficos y boyas oceanográficas (series de tiempo). Paralelamente se deben llevar a cabo experimentos de campo y estudios socio-ambientales en los márgenes continentales. Esto incluye zonas de acuicultura o de pesquerías costeras, así como en nuevos asentamientos relacionados con el turismo y la industria energética.

Grupo Estudios de la Acidificación en Ambientes Marinos de México



Instituto de Investigaciones Oceanológicas



LITERATURA CITADA

- Caldeira, K. and M. E. Wickett. 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425: 365-365.
- Canadell, J. G., C. Le Quéré, M. R. Raupach, C. B. Field, E. T. Bultenhuis, P. Clals, T. J. Conway, N. P. Gillett, R. A. Houghton and G. Marland. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of The National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 18866-18870.
- Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely and J. Kleypas. 2009. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Sciences* 1: 169-192.
- Ekau, W., H. Auel, O. H. Portner and D. Gilbert. 2009. Impacts of hypoxia on the structure and processes in the pelagic community (zooplankton, macro-invertebrates and fish). *Biogeosciences Discuss.* 6: 5073-5144.
- Fabry, V. J., B. A. Seibel, R. A. Feely and J. C. Orr. 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science* 65: 414-432.
- Farber, Lorda J., E. J. Beier Martin and V. M. Godinez Sandoval. 2010. Vertical distribution of zooplankton in the oxygen minimum zone of the Mexican tropical Pacific during autumn and the habitat compression hypothesis. *IMBER Update Newsletter* 16.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, K. Lee, W. Berelson and J. Kleypas. 2004. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science* 305: 362-66.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, J. M. Hernandez-Ayon, D. Ianson and B. Hales. 2008. Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the continental shelf. *Science Express*. DOI:10.1126/science.1155676

CARBONO AZUL, MANGLARES Y POLÍTICA PÚBLICA

Jorge Alfredo Herrera Silveira^{1‡}, Claudia Teutli Hernández¹

¹CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida

[‡]Autor para correspondencia: jorge.herrera@cinvestav.mx

RESUMEN

El desarrollo costero y las actividades humanas asociadas, han tenido impactos negativos en los ecosistemas costeros, tales como la reducción de cobertura de manglares y pastos marinos, con la consecuente pérdida de servicios ambientales. Uno de estos servicios, que actualmente se ha reconocido por su importancia para la mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático, es la captura y almacén de carbono orgánico en pastos marinos y manglares, a lo que se le conoce como “Carbono Azul”. Recientes investigaciones demuestran que, por unidad de superficie, los manglares y pastos marinos almacenan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre, por lo que su conservación y restauración se reconocen como estrategias de mitigación y adaptación de los efectos del cambio climático. En el caso particular de los manglares, México tiene la oportunidad de contribuir con esas estrategias al contar con una extensión de manglar que lo coloca en el cuarto lugar a nivel mundial. Si bien, existen estimaciones de los almacenes de carbono en manglares, la realidad es que son muy escasos y aún no se cuenta con una estrategia nacional para determinar los flujos de carbono. Por otra parte, la conservación y restauración de manglares constituyen un reto a pesar de la situación de protección en el que se encuentran. Existen estrategias como el programa REDD+ y el pago por servicios ambientales, que pueden implementarse para los ecosistemas de carbono azul, pero es necesaria su adecuación y adaptación debido a las particularidades ecológicas que tienen los manglares y pastos marinos.

Palabras clave: *ecosistemas costeros; pastos marinos; servicios ecosistémicos costeros.*

INTRODUCCIÓN

Los elementos químicos como carbono, nitrógeno, oxígeno, fósforo, entre otros, tienen almacenes en la atmósfera, hidrósfera, litósfera y biósfera y, circulan constantemente entre éstos por diferentes vías y a velocidades distintas. A esta interacción de elementos entre almacenes y vías de circulación se les conoce como ciclos biogeoquímicos (Mitsch y Gosselink, 2000).

En la naturaleza, los elementos químicos casi nunca se distribuyen homogéneamente en los almacenes. Hay elementos que son más abundantes en la atmósfera (nitrógeno, oxígeno) y otros en la litósfera (fósforo, azufre). Además, se encuentran presentes tanto en formas químicas orgánicas como inorgánicas. Por ejemplo, el carbono se encuentra como parte de moléculas orgánicas como los carbohidratos y las proteínas (en plantas y animales), pero también está presente en forma inorgánica como bióxido de carbono (CO₂) o bicarbonato, en la atmósfera e hidrósfera, (Ciais *et al.*, 2013).

Para que la naturaleza funcione correctamente, debe existir un equilibrio entre la abundancia de los elementos en sus almacenes y la velocidad en la que se transfieren y transforman al pasar de un almacén orgánico a uno inorgánico y viceversa. Sin embargo, el hombre de forma intencional, o no intencional, ha modificado tanto los almacenes como las velocidades de circulación de los elementos. Por ejemplo, intencionalmente lo ha hecho al añadir fertilizantes que contienen nitrógeno y fósforo para aumentar la producción agrícola, pero al mismo tiempo contamina no intencionalmente las aguas de ríos, lagunas y mar, con los restos de fertilizantes no usados en el campo, que se transportan por escorrentía a los cuerpos de agua.

En el caso del carbono, los almacenes en la biósfera, litósfera, atmósfera e hidrósfera, así como las velocidades de flujo, se han alterado por actividades humanas como la deforestación, cambio de uso del suelo, quema de combustibles fósiles, entre otras. El resultado ha sido el aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera (Figura 1) a niveles que tienen efectos en las características del clima (Canadell *et al.*, 2007).

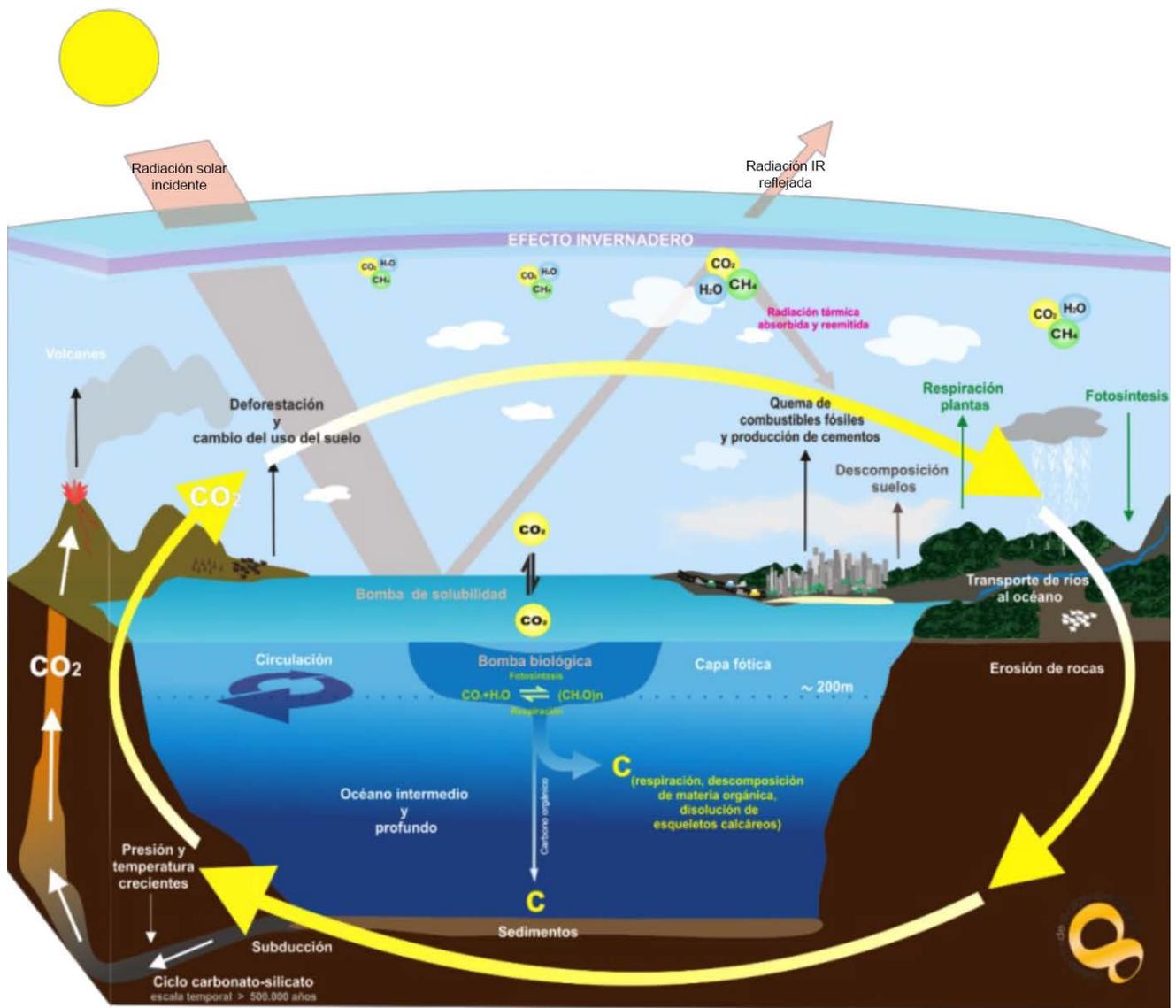


Figura 1. Ciclo biogeoquímico del carbono y los cambios por actividades humanas. (http://earthobservatory.nasa.gov/Library/CarbonCycle/carbon_cycle4.html)

Se sabe que una de las principales causas del cambio climático (CC) es el aumento en los gases de efecto invernadero (GEI), tales como bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nítrico (N_2O). El CC es un problema con características únicas debido a su naturaleza global; su impacto se observa a largo plazo e involucra interacciones complejas tanto entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos) como sociales, económicos y políticos (IPCC, 2001).

El clima regula todos los procesos naturales de los que depende el desarrollo social y económico. La

actividad agrícola, en muchas regiones, depende de la temporalidad y abundancia de las lluvias, así como de los cambios de temperatura del aire. La actividad pesquera es variable en cuanto a las especies que se capturan, porque los peces dependen de las corrientes marinas y sus características, como temperatura y salinidad, mismas que a su vez son controladas por la temperatura y el agua dulce que llega del continente después de las lluvias. Hasta las actividades turísticas de un año son dependientes del clima, en verano porque se requiere de sol y temperaturas agradables en las playas y, en invierno,

porque se requiere nieve para las pistas de esquí. Por lo tanto, los gobiernos desarrollan políticas que favorecen las actividades que generan recursos económicos y bienestar. Sin embargo, durante mucho tiempo estas políticas no consideraron que las actividades del hombre repercutirían negativamente en el ciclo biogeoquímico del carbono y que esto tendría efectos negativos en el clima y el funcionamiento de los ecosistemas (Canadell *et al.*, 2007; Robbins *et al.*, 2009).

EFECTOS DEL CC EN LOS ECOSISTEMAS COSTEROS Y CARBONO AZUL

El CC tiene efectos en todos los ecosistemas. Sin embargo, los ecosistemas costeros (EC) son más vulnerables a sus impactos, ya que reciben los efectos tanto de los ecosistemas terrestres, como de los marinos (Cuadro 1; Figura 2).

Cuadro 1. Factores del cambio climático que afectarán las costas; procesos asociados que se afectarán y sus impactos. Adaptado de Lovelock y Ellison (2007).

Factor	Procesos	Impacto
Incremento del nivel del mar	Estructura y productividad de la vegetación.	Cambios en la cobertura hasta mortalidad de la vegetación.
Tormentas extremas	Reclutamiento, cambios en patrones de inundación (hidroperiodo).	Cambios en la topografía por elevación (acreción) o erosión.
Incremento de oleaje y viento	Cambios en la salinidad del agua, aporte de sedimentos.	Cambios en los patrones fenológicos.
Incremento de temperatura del aire y del mar	Cambios en los ciclos biogeoquímicos, en los sedimentos	Reducción de la productividad y de los aportes de materia orgánica.
Variaciones en la precipitación y humedad	Cambios en el balance de aporte de agua dulce (subterránea, ríos, precipitación) y marinos.	Salinización de los sedimentos.
	Cambios en la dinámica del agua.	Reducción de la diversidad

Los EC ocupan un lugar privilegiado por su riqueza natural y la diversidad de servicios ambientales que prestan. Su papel ecológico y económico ha sido reconocido mundialmente debido a que funcionan como sumideros de carbono, lo que significa que el CO₂ que se captura mediante la fotosíntesis y se transforma en biomasa vegetal (troncos, raíces, hojas), cuando muere se queda en el sedimento, pudiéndose almacenar por miles de años. También se les reconoce como zonas de alimentación, refugio y crecimiento de juveniles de crustáceos, moluscos y peces; actúan como

sistemas naturales de control de inundaciones y como barreras contra huracanes e intrusión salina; controlan la erosión y protegen las costas; mejoran la calidad del agua al funcionar como filtro biológico; bajo ciertas condiciones pueden adaptarse y sobrevivir a cambios en el nivel del mar; mantienen procesos de sedimentación; son refugio de flora y fauna silvestre y, poseen un alto valor estético, recreativo y de investigación (Costanza *et al.*, 1997; Lovelock y Ellison, 2007).

De acuerdo con lo anterior, la degradación de los EC redundará en la pérdida de servicios ambientales,

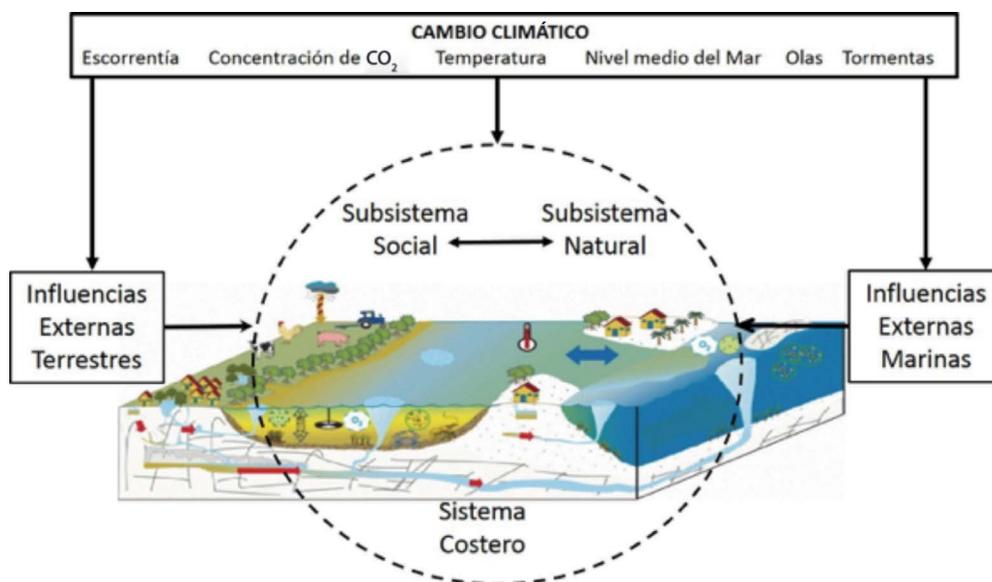


Figura 2. Impacto de los efectos del cambio climático en los ecosistemas costeros relacionados (modificado de IPCC, 2001).

de biodiversidad, de infraestructura costera y hasta de seguridad alimentaria. Si las características estructurales y funcionales de los ecosistemas costeros se encuentran en buenas condiciones proporcionan beneficios al hombre, pero cuando se degradan, la posibilidad de obtener beneficios de éstos se reduce considerablemente (Rolón y Bourillón, 2010; FAO, 2011), por lo tanto, es impostergable la implementación de políticas que aseguren la conservación y restauración de los ecosistemas costeros.

Uno de los servicios ambientales que proveen los ecosistemas costeros, en particular los manglares, pastos marinos y marismas salobres y, que se utiliza como soporte para la implementación de políticas de mitigación y adaptación de los EC a los efectos del CC, es la captura y almacenamiento de CO₂ en forma de carbono orgánico (CO), tanto en la vegetación como en los sedimentos. A esta forma de almacenamiento de CO en manglares, pastos marinos y marismas salobres, se le conoce como Carbono Azul (CA). Estos ecosistemas almacenan altas concentraciones de CO por ser receptores de materia orgánica que viene de otros ecosistemas (asociados a cuencas de ríos que llegan a la costa) y, a que la inundación (periódica o continua) disminuye la tasa de descomposición de la materia orgánica que se deposita en el suelo, por lo que se acumula en el sitio (Nelleman *et al.*, 2009; Pendleton *et al.*, 2012). La magnitud de los almacenes de CO de los ecosistemas de CA es mucho mayor que la de los ecosistemas terrestres (Figura 3).

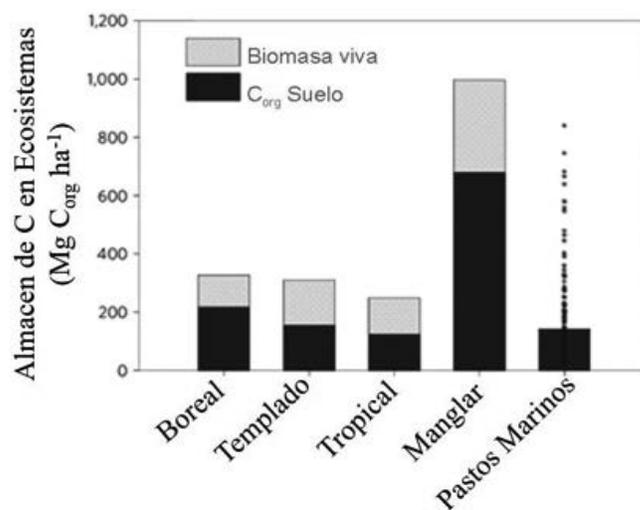


Figura 3. Almacenes de carbono en diferentes tipos de ecosistemas. Los ecosistemas relacionados con el carbono azul (manglares, marismas y pastos marinos) presentan valores significativamente mayores que los ecosistemas terrestres (Fourqurean *et al.*, 2012).

El CA implica la tasa de secuestro anual (incrementos en biomasa con el tiempo), la cantidad de carbono almacenado en biomasa, tanto en la superficie, como bajo el suelo y, el carbono que se almacena en los sedimentos, que es el más importante, tanto por su magnitud como por su permanencia, ya que se conserva ahí por miles de años (CEC, 2013). Sin embargo, si bien el carbono aéreo de grandes extensiones se puede estimar por medio de sensores remotos y calibrando la información con datos de campo, en el caso del

carbono de los sedimentos, sólo se puede hacer con mediciones directas en campo y análisis de laboratorio (IPCC, 2014). Por lo anterior, es imprescindible hacer estimaciones del carbono orgánico en los sedimentos de los ecosistemas de manglar, pastos marinos y marismas. Se ha observado que la profundidad a la que se puede encontrar carbono orgánico en los sedimentos de estos ecosistemas va desde centímetros hasta varios metros (Howard *et al.*, 2014).

A pesar de que los hábitats del carbono azul cubren menos del 0.5% de la superficie marina, almacenan más del 50% del total del carbono de los sedimentos oceánicos. Por otra parte, constituyen sólo el 0.05% de la biomasa vegetal terrestre, pero almacenan hasta tres veces más carbono por unidad de área que cualquier ecosistema terrestre, en los sedimentos (Pendleton *et al.*, 2012; Howard *et al.*, 2014).

Los ecosistemas del carbono azul capturan y almacenan entre 235 y 450 Tg de C año⁻¹, lo que equivale casi a la mitad de las emisiones de todo el sector mundial del transporte que se estiman en 1000 Tg C año⁻¹. Si se evita la pérdida y degradación de estos ecosistemas y se acelera su recuperación a través de acciones de restauración, se puede compensar entre el 3% y el 7% de las emisiones actuales de combustibles fósiles (7200 Tg C año⁻¹ en total) en dos decenios, que es más de la mitad de lo proyectado mediante la reducción de la deforestación de bosques tropicales. El efecto sería equivalente por lo menos al 10% de las reducciones necesarias para mantener la concentración del CO₂ en la atmósfera por debajo de 450 ppm (Houghton, 2007; Robbins *et al.*, 2009; CEC, 2013). Por consiguiente, si se gestionan correctamente los almacenes de CA, potencialmente pueden desempeñar un papel importante en la mitigación del CC.

UN GRAN ALMACENADOR DE CARBONO: LOS MANGLARES

De acuerdo con Donato *et al.* (2011), entre los ecosistemas que forman parte del carbono azul, los manglares llaman la atención de la comunidad internacional ya que estudios en la región del Indo-Pacífico demuestran que estos ecosistemas almacenan mayores concentraciones de carbono (~1000 Mg C ha⁻¹), en comparación con los bosques boreales (~350 Mg C ha⁻¹), bosques templados (~349 Mg C ha⁻¹) y bosques tropicales (~230 Mg C ha⁻¹), Figura 3.

El carbono capturado por los manglares, en forma de CO₂, a través de la fotosíntesis y almacenado

(producción) en hojas, ramas, troncos, raíces y en los sedimentos, puede transportarse (flujos) a otros ecosistemas, con lo que se contribuye al funcionamiento y conectividad de un ecosistema a otro (Figura 4). Se estima que la caída de hojarasca es de aproximadamente 218 ± 72 Tg C año⁻¹, el promedio de exportación de carbono orgánico total es de 2.52 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, mientras que la producción de raíces y troncos son de los flujos menos conocidos. El promedio global de la producción de troncos es de 10 Mg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que el promedio de la productividad de raíces se estima entre 1.8 a 11.46 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Dittmar *et al.*, 2006; Bouillon *et al.*, 2008).

A pesar de que existe un gran número de estudios sobre el ciclo de la materia orgánica en los ecosistemas de manglar (Kristensen *et al.*, 2008), sigue sin haber consenso acerca de la magnitud y contribución real de la producción primaria y destino de la materia orgánica proveniente de los manglares, así como de los procesos que intervienen en el balance neto de dicho intercambio (Bouillon *et al.*, 2008).

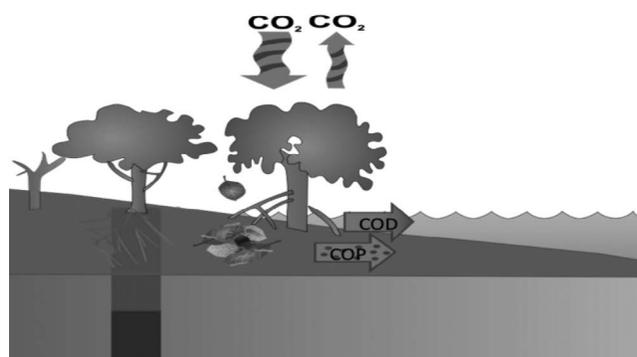


Figura 4. Principales almacenes y flujos de carbono en un ecosistema de manglar.

Los manglares tienen interés especial para México, ya que por su extensión (764 486 ha) ocupan el cuarto lugar a nivel mundial. En la Península Yucatan (PY) el 98% de la línea de costa se encuentra ocupado por manglar y contiene el 55% de este ecosistema de México, del cual un 76.2% está actualmente bajo protección y se considera en el tratado intergubernamental conocido como “Convención Ramsar” en el que se los países miembros, como México, se comprometen a mantener las características ecológicas de sus humedales de importancia internacional y planificar el uso sostenible de todos los humedales situados en sus territorios (Ramsar, 1971; Rodríguez *et al.*, 2013).

No obstante que se cuenta con mapas a escala nacional de la extensión de los manglares (Rodríguez *et al.*, 2013), no hay suficientes datos para estimar el carbono en manglares a nivel regional o local con la suficiente precisión y valor de incertidumbre para ser considerados en un programa de pago de bonos de carbono. Este tipo de pago es un instrumento para hacer frente al cambio climático, que tiene como objetivo reducir la tala de bosques especialmente en los trópicos, a través de incentivos económicos a propietarios de áreas con bosques para conservarlos, con lo que se retiene carbono como biomasa, se conserva la biodiversidad y otros servicios ambientales a nivel local y regional (Murray *et al.*, 2011).

De acuerdo con Rodríguez *et al.* (2013), en México se presentan principalmente tres especies de mangle: rojo (*Rhizophora mangle* L.), blanco (*Laguncularia racemosa* L.), negro (*Avicennia germinans* L.) y la especie asociada mangle botoncillo (*Conocarpus erectus* L.). Estos ecosistemas están constituidos por pocas especies, pero la variabilidad de geofomas, clima e hidrología, además de las perturbaciones naturales (huracanes) y humanas, ofrecen un marco ambiental para que desarrollen diferentes tipos ecológicos de manglar (ribereño, de franja/borde, cuenca, chaparro y peten).

De un total aproximado de 200 estudios sobre manglares de México, sólo 48 contienen datos o información para una primera estimación del CO almacenado en este ecosistema (Figura 5) y sólo 5 de ellos evalúan todos los almacenes de CO en diferentes tipos de manglar de acuerdo con los lineamientos metodológicos del IPCC (2014). El promedio de carbono almacenado en los manglares de México es de 364 Mg C ha⁻¹ (Herrera *et al.*, 2016), que contrasta con el promedio para ecosistemas terrestres (62.6 mg C ha⁻¹; Vega, 2009). Los mayores almacenes se localizan en los manglares del Golfo de México (>1200 Mg C ha⁻¹; Herrera *et al.*, 2016).

De los escasos estudios que consideran estos tipos de manglar, Caamal *et al.* (2012) identifican que los

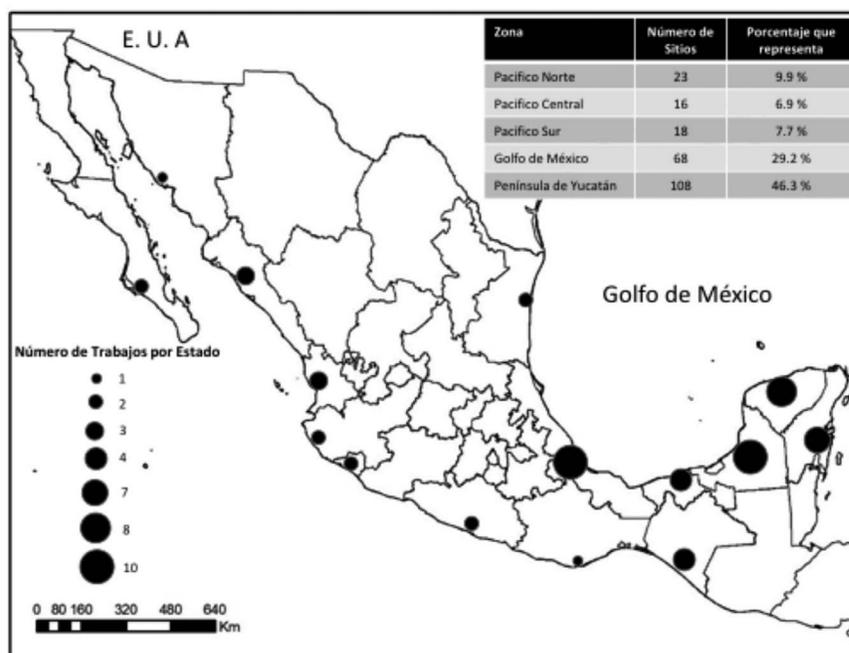


Figura 5. Mapa de los estados de la República Mexicana en donde se reportan datos de trabajos y de sitios con estudios sobre carbono en manglares.

manglares tipo peten que se caracterizan por árboles altos (<15m) son los que más carbono almacenan tanto en la parte aérea como subterránea. Sin embargo, a pesar que el manglar chaparro presenta como

característica ser de baja altura (<3m) y por tanto su biomasa y carbono aéreo es muy bajo (<50 Mg C ha⁻¹), la magnitud del almacén de carbono subterráneo es significativo (Figura 6).

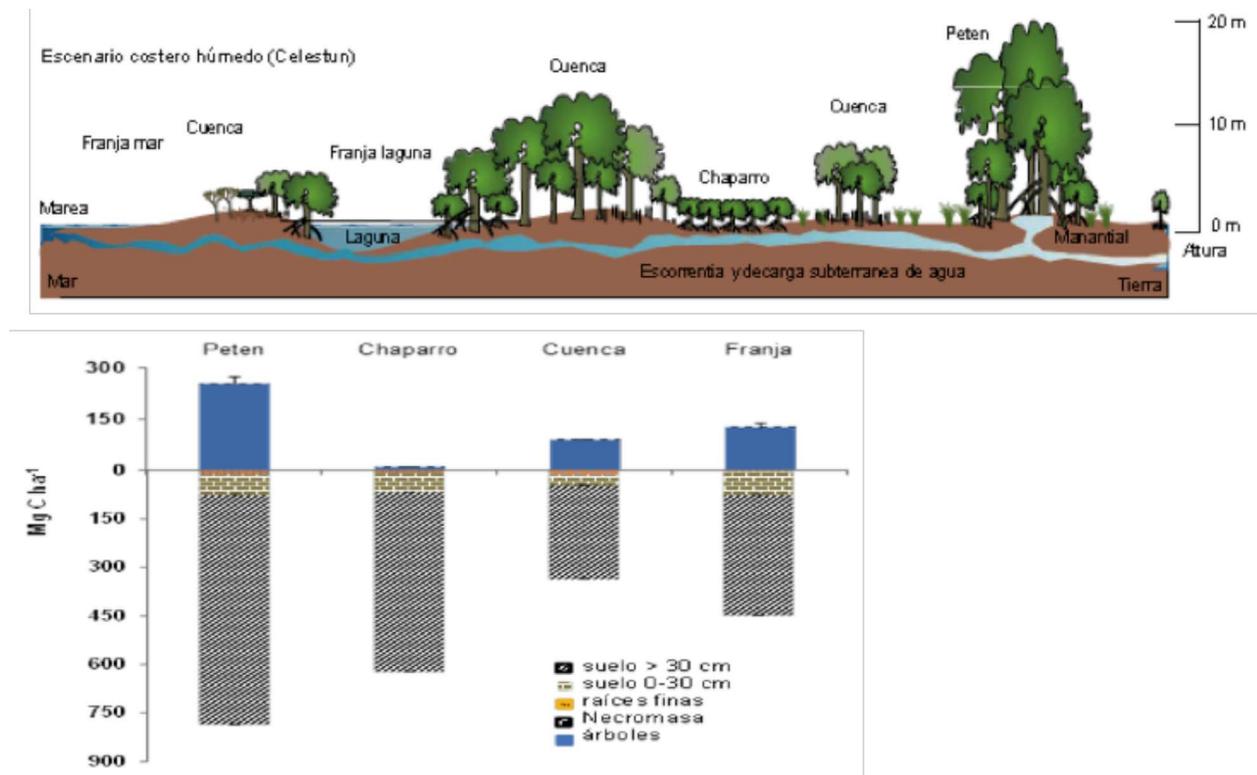


Figura 6. Diferentes tipos ecológicos de manglar y las diferentes concentraciones de almacenamiento de carbono orgánico que tiene cada uno de ellos (Caamal *et al.*, 2012).

ESTRATEGIAS DE POLÍTICA Y GESTIÓN DEL CARBONO EN MANGALRES

A nivel internacional y nacional se han propuesto protocolos, normas y leyes, como estrategias que tienen como objetivo la protección de los humedales, y en última instancia de forma no explícita reducir las emisiones de gases efecto invernadero. Esta estrategia de política puede llevar a reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas a través de mitigar los efectos y adaptarse a los impactos por los efectos del cambio climático. Internacionalmente existe el Protocolo de Tokio, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) y las Conferencias de la Partes (COPs). En México previo a la Ley de Cambio Climático se puede mencionar la Ley General de Bienes Nacionales, Ley General del Equilibrio Ecológico

y Protección al Ambiente (LGEEPA), Ley General de Vida Silvestre y su reglamento, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable y su reglamento, que coadyuvan a la protección, conservación y restauración de los humedales.

Sin embargo, llevar a la práctica acciones concretas y específicas por ecosistema para esta reducción de GEI no es una tarea fácil. Entre los mecanismos que podrían ser útiles para los ecosistemas de carbono azul y, en específico para los manglares de México, podría nombrarse al programa REDD+ y el Pago por Servicios Ambientales, ambos mecanismos de política pública. Existen experiencias e iniciativas para otros ecosistemas terrestres y con reglas de operación ya establecidas que pudieran adaptarse a las características de los ecosistemas de manglar.

El programa REDD+

El programa de Reducción de Emisiones por Deforestación y la Degradación forestal (REDD+), se usa como una herramienta potencial para reducir emisiones de GEI por deforestación y degradación forestal, así como para aumentar el almacenamiento de carbono. Con este programa se busca reducir emisiones evitando la liberación de carbono almacenado en los árboles cuando se talan; además de fomentar el almacenamiento adicional de carbono al dejar los árboles en pie y promover la reforestación (Gibbs *et al.*, 2007; Gorden *et al.*, 2011).

Cabe señalar que si bien los esquemas como REDD+ muestran un gran potencial, también hay retos importantes en el financiamiento y sistemas de incentivos eficaces que proporcionen reducciones de carbono eficientes y, a la vez, la protección de las comunidades que dependen de los recursos naturales. Al igual que la financiación de REDD+, la financiación del carbono azul podría fluir a través de la planificación nacional, el desarrollo de programas piloto y los pagos por la verificación de reducción de emisiones (Gorden *et al.*, 2011; Siikamäki *et al.*, 2012).

La comprensión y el reconocimiento del papel del carbono azul en la mitigación del cambio climático pueden ayudar en el desarrollo de un esquema similar que podría apoyar el uso sostenible de los ecosistemas costeros. Sin embargo, hay todavía incertidumbre alrededor de los factores que influyen en la captura y almacenamiento de carbono en los manglares y, por lo tanto, cómo podría funcionar un régimen de pago.

Pago por Servicios Ambientales

Los bienes y servicios que los seres humanos obtenemos a partir de la estructura y funciones de los ecosistemas se conocen como servicios ambientales (SA). Los SA con los cuales estamos vinculados directamente son la cantidad y calidad del agua, la calidad del aire y los alimentos de buena calidad, ya que estos son los principales requerimientos para la vida. Sin embargo, también existen otros SA que son igualmente importantes, pero son menos tangibles, como la protección contra desastres naturales como los huracanes, el control de plagas, la recreación y la captura y almacenamiento de CO₂. Por lo tanto, existe estrecha relación entre la condición de los ecosistemas, la calidad de los SA y el mantenimiento de la vida humana (Turner *et al.*, 2008).

De acuerdo con lo anterior, otro mecanismo para que a través de estrategias de política pública se haga énfasis en la conservación y restauración de

los ecosistemas, en particular los relacionados con el carbono azul y, en especial con los manglares, es el pago por SA. Este mecanismo ha sido una estrategia para solucionar el conflicto entre conservación y desarrollo. Si se desea conservar, el proceso tiene que traer beneficios para los dueños del recurso que se ha identificado provee un determinado SA.

Sin embargo, esta estrategia tiene dificultades de instrumentación, por lo que se deben considerar algunos aspectos antes de implementarlos como ¿qué es lo que se va a pagar? Puede haber varios servicios ambientales, algunos de ellos claramente identificados y otros son más complejos, por ejemplo: hidrológicos, captura de carbono, biodiversidad. ¿Quién va a pagar por el servicio? Se asume que quien se beneficie del servicio, más esto no es necesariamente una relación directa.

En México, desde el 2003 la Comisión Nacional Forestal opera el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) y el Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono y, desde el 2004, los programas Derivados de la Biodiversidad para Fomentar el Establecimiento y Mejoramiento de Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA). Sin embargo, esta estrategia se dirigió a la preservación del bosque templado y tropical, por lo que se carece del mecanismo de política pública para los bosques de manglar y pastos marinos (Bravo *et al.*, 2008). No obstante, existe entre las modalidades de pagos por SA el desarrollo de proyectos de secuestro de carbono. Cualquiera de estos esquemas para ecosistemas costeros también es propenso a enfrentar dificultades de instrumentación.

RETOS DE LA INVESTIGACIÓN

La escasez de estudios relacionados no sólo con los almacenes y flujos de carbono, sino con otros elementos (N y P), en los manglares de México, implica que están abiertas múltiples líneas de investigación relacionadas con los ciclos biogeoquímicos en estos ecosistemas.

La variabilidad de climas, geoformas, condiciones hidrológicas, niveles y tipos de impacto, son oportunidades para estudios de variabilidad espacial y temporal de procesos que se relacionan con el almacenamiento y flujos de carbono en manglares. Detectar patrones de acuerdo con gradientes ambientales, tipos ecológicos y perturbaciones, ayudaría a definir patrones relacionados con los recursos, estresores e hidrología, de acuerdo con diferentes ambientes geomorfológicos e impactos.

Otro tipo de estudio que está creciendo en interés por el tipo de información a nivel del ecosistema que provee, es el de flujos de CO₂ y CH₄ mediante el uso de las torres de covarianza de vórtices (Eddy Covariance).

La importancia del almacén de C orgánico en sedimentos de manglares y el papel de las características del hidropereodo en el funcionamiento de estos ecosistemas, es una oportunidad para futuras investigaciones.

Actualmente las técnicas de caracterización de la composición molecular de las fuentes de materia orgánica y las de trazadores isotópicos, ofrecen la oportunidad de rastrear el origen de la materia orgánica (alóctono, autóctono) y entender los cambios que estos ambientes han experimentado en el largo plazo. Los resultados de este tipo de investigaciones se pueden asociar con el actual funcionamiento ecosistémico e incorporar esta información en modelos ecológicos para simulaciones de escenarios futuros, cuyos resultados pueden orientar acciones de adaptación y mitigación.

Desde la perspectiva del proceso ciencia-tecnología e innovación, la investigación sobre la restauración ecológica es muy prometedora, pero es aún más incipiente que todas las líneas de investigación anteriores. ¿Cómo alcanzar mayores tasas de captura y almacenamiento de C a través de acciones de restauración? es una de las preguntas más relevantes en este tema, con fuertes implicaciones de política pública y relación con la sociedad. La restauración ecológica es la estrategia que requiere la vinculación y acuerdos institucionales o de grupo y que aglutina a la academia, el gobierno, las ONG y grupos organizados de la sociedad civil, ya que es una actividad que requiere acciones de mediano y largo plazo. La restauración, en especial de manglares, se reconoce como una de las estrategias más eficientes de adaptación y reducción de la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático de las costas tropicales.

En conclusión, el carbono azul tiene el potencial de contribuir a las políticas de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático y, partiendo del conocimiento actual, se recomienda incentivar las valoraciones de carbono tanto en los ecosistemas de manglar como de pastos marino, así como la restauración ecológica, principalmente de áreas de manglar. Sin embargo, hay que recurrir a grupos de trabajo que han demostrado tener experiencia, ya que muchos estudios no se han hecho o seguido estrategias que aseguren datos robustos o éxito en los proyectos.

LITERATURA CITADA

- Bouillon, S., A.V. Borges, E. Castañeda-Moya, T. Diele, T. Dittmar, N. C. Duke, E. Kristensen, S. Y. Lee, C. Marchand, J. J. Middelburg, V. H. Rivera-Monroy, T. J. Smith III and R. R. Twilley. 2008. Mangrove production and carbon sinks: A revision of global Budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles* 22: GB2013, DOI:10.1029/2007GB003052
- Bravo, F., V. Le May, R. Jandl and K.V. Gadow (eds.). 2008. *Managing forest ecosystems: the challenge of climate change*. Springer Netherlands, 340 p.
- Caamal-Sosa, J. P., A. Zaldívar, F. Adame-Vivanco, C. Teutli-Hernández, M. T. Andueza, R. Pérez y J. A. Herrera-Silveira. 2012. Almacenes de carbono en diferentes tipos ecológicos de manglares en un escenario cárstico. pp. 478-483. *In: F. Paz y R. Cuevas (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Texcoco, Estado de México, México, 887 p.
- Camacho-Valdez, V. y A. Ruiz-Luna. Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias* 1(4): 3-15.
- Canadell, J. G., C. L. Quéré, M. R. Raupach, C. B. Field, E. T. Buitenhuis, P. Ciais, T. J. Conway, N. P. Gillett, R. A. Houghton and G. Marland. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104:18866-18870.
- CEC. 2013. *North American Blue Carbon Scoping Study*. Montreal, Canada. Commission for Environmental Cooperation. 49 p.
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R. B. Myneni, S. Piao and P. Thornton. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. *In: T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.). Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, N. Y., USA.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farberk, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Suttonkk and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 387.
- Dittmar, T., N. Hertkorn, G. Kattner and R. J. Lara. 2006. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans, *Global Biogeochem. Cycles* 20, GB1012. DOI:10.1029/2005GB002570
- Donato, D. C., J. B. Kauffman and D. Murdiarso D. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Natural Geoscience*, 4:293-97.

- FAO. 2011. La seguridad alimentaria: información para la toma de decisiones. <http://www.fao.org/docrep/014/al936s/al936s00.pdf>
- Fourqurean, J. W., C. M. Duarte, H. Kennedy, N. Marbà, M. Holmer, M. Mateo, E. T. Apostolaki, G. A. Kendrick, D. Krause-Jensen, K. J. McGlathery and O. Serrano, O. 2012. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience* 5: 505–509.
- Gibbs, H. K., S. Brown, J. O. Niles and J. A. Foley. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environ. Res. Lett.* 2:1-13.
- Gorden, D., B. C. Murray, L. Pendleton and B. Victor. 2011. Financing options for blue carbon: opportunities and lessons Learned from the REDD+ experience NI R 11-11 Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions. Duke University.
- Houghton, R. A. 2007. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35:313-347.
- Howard, J., S. Hoyt, K. Isensee, M. Telszewski and E. Pidgeon (eds.). 2014. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.
- IPCC. 2001: Cambio climático. 2001. La base científica. Contribución del Grupo de trabajo I al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell y C. A. Johnson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos. 944 p.
- IPCC. 2005. Carbon dioxide capture and storage. B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos and L. Meyer (eds.). Cambridge University Press. Reino Unido. 431 p. Disponible en www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports_carbon_dioxide.htm
- IPCC. 2014-2013. Supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. W. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda and T. G. Troxler (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- Kristensen, E., S. Bouillon, T. Dittmar and C. Marchand. 2008. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany* 89: 2001-2019.
- Lovelock, C. E. and J. C. Ellison. 2007. Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the Great Barrier Reef to climate change. In J. E. Johnson and P. A. Marshall (eds.). *Climate change and the great barrier reef: a vulnerability assessment*. Townsville, Australia Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office 237–269.
- Mitsch, J. W. and G. J. Gosselink. 2000. *Wetlands*. John Wiley and Sons, New York. 920 p.
- Murray, B. C., L. Pendleton A., W. Jenkins and S. Sifleet. 2011. Green payments for blue carbon economic incentives for protecting threatened coastal habitats. Duke Nicholas. Institute for Environmental Policy Solutions Report NI R 11-04. 42 p.
- Nellemann, C., E. Corcoran, C. M. Duarte, L. Valdes, C. De Young, L. Fonseca and G. Grimsditch. 2009. Blue carbon: a rapid response assessment. United Nations Environment Programme. <http://www.grida.no>
- Pendleton, L., D. C. Donato, B. C. Murray, W. S. Crooks, A. Jenkins, S. Sifleet, C. Craft, J. W. Fourqurean, J. B. Kauffman, N. Marba, P. Megonigal, E. Pidgeon, D. Herr, D. Gordon and A. Baldera. 2012. Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLOS ONE* 7(9):1-7. e43542.
- Ramsar. 1971. Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas. Oficina de Normas Internacionales y Asuntos Legales Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). París, Francia.
- Robbins, L. L., P. G. Coble, T. D. Clayton and W. J. Cai. 2009. Ocean carbon and biogeochemistry scoping workshop on terrestrial and coastal carbon fluxes in the Gulf of Mexico. St. Petersburg, FL. May 6-8, 2008. U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1070. 46 p.
- Rodríguez-Zúñiga, M. T., C. Troche-Souza, A. D. Vázquez-Lule, J. D. Márquez-Mendoza, B. Vázquez-Balderas, L. Valderrama-Landeros, S. Velázquez-Salazar, M. I. Cruz-Lopez, I. R. Ress, A. Uribe-Martinez, S. Cerdeira-Estrada, J. Acosta-Velázquez, J. Díaz-Gallegos, R. Jiménez-Rosenberg, L. Fueyo-MacDonald and C. Galindo-Leal C. 2013. Manglares de México: extensión, distribución y monitoreo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 128 p.
- Rolón, E. and L. Bourillón. 2010. Servicios ambientales en áreas marinas y costeras. *CONABIO. Biodiversitas* 93:11-14.
- Siiikamäkia, J., J. N. Sanchiricoa and S. L. Jardine. 2012. Global economic potential for reducing carbon dioxide emissions from mangrove loss. *PNAS* 109 (36): 4369–14374.
- Turner, R. K., S. Georgiou and B. Fisher. 2008. Valuing ecosystem services: the case of multi-functional wetlands. London. Cromwell Press. 240 p.
- Valiela, I., J. L. Bowen and J. K. Cork. 2001. Mangrove forests: one of the world’s threatened major tropical environments. *Bioscience* 51: 807–815.
- Vega L. E. 2009. Importancia económica de las Áreas Naturales Protegidas como sumideros de carbono. *The Nature Conservancy* 360:114-120.

LOS ARRECIFES CORALINOS DE MÉXICO: SERVICIOS AMBIENTALES Y SECUESTRO DE CARBONO

Luis Eduardo Calderon Aguilera^{1*}, Héctor Reyes Bonilla², Carlos Orión Norzagaray López³,
Ramón Andrés López Pérez⁴

¹Departamento de Ecología Marina. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California. Ensenada, Baja California, México.

²Departamento Académico de Biología Marina. Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, Baja California Sur, México.

³Departamento de Biología Marina. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, Baja California, México.

⁴Departamento de Hidrobiología. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa. Iztapalapa, Ciudad de México, México.

*Autor para correspondencia: leca@cicese.mx

RESUMEN

Los arrecifes coralinos son ecosistemas de alto valor ecológico, económico y social. Son “oasis marinos” de alta productividad, albergan una gran biodiversidad y proveen valiosos servicios ambientales como protección de la línea de costa, banco de germoplasma, turismo, recreación, investigación y valor estético. Asimismo, funcionan como almacenes de carbonato de calcio ya que están compuestos por organismos calcificadores como corales hermatípicos, algas calcáreas, esponjas, pastos marinos, macroalgas, moluscos, crustáceos y otros grupos taxonómicos. Con base en la última información publicada sobre tasas de crecimiento, densidad esquelética, tasa de calcificación, cobertura de coral y características del arrecife, se calcula la tasa anual bruta de secuestro de carbono en las principales comunidades coralinas del Pacífico mexicano. En Cabo Pulmo, Baja California Sur, dicha tasa es de 8 657 toneladas de carbonato de calcio al año, mientras que en Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, es de 162; en Islas Marietas 53.85, en Bahías de Huatulco, Oaxaca, 47, en Manzanillo, Colima, 26, en Isla Isabel, Nayarit 16 y en Tenacatita, Jalisco, 12 toneladas al año. Por lo anterior, se proponen como política pública una mayor coordinación entre autoridades, el desarrollo de una política nacional para la protección de arrecifes de coral, la reactivación del Consejo Consultivo Nacional Científico y Técnico de los Arrecifes Coralinos de México y la aplicación efectiva de sanciones.

Palabras clave: *ecosistemas costeros; sistema arrecifal; servicios ecosistémicos costeros.*

INTRODUCCIÓN

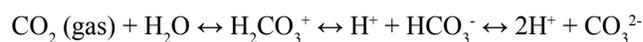
Los arrecifes de coral son reconocidos como los ecosistemas con mayor biodiversidad por unidad de área, ya que aquí se encuentran representados prácticamente todos los grupos taxonómicos marinos. A pesar de que no alcanzan el 1% de la superficie del océano, su productividad puede ser 10 veces mayor que la del océano abierto. Su distribución geográfica está limitada a la zona tropical y subtropical, en donde la temperatura mínima no sea inferior a los 18 °C. Además, requieren de aguas claras, sustrato duro donde asentarse, alta salinidad y luz solar. Esto último es fundamental porque precisamente la alta productividad de los arrecifes coralinos se debe a la simbiosis entre la planta, o sea el dinoflagelado simbiote (comúnmente

llamado zooxanthela) y el animal, esto es el coral. Estos dinoflagelados aportan del 80% al 130% del carbono de la fotosíntesis a sus hospederos (los corales), los cuales emplean apenas la mitad de esa energía. El resto se expulsa en forma de mucus rico en carbohidratos, el cual es consumido por los invertebrados y peces residentes de las cabezas de coral que eventualmente son la base de la producción secundaria del sistema (Birkeland, 1996; Sheppard *et al.*, 2009).

Un arrecife de coral es una formación biogénica, es decir, formada por organismos vivos, que modifica sustancialmente el sustrato. Los corales hermatípicos, nombre que precisamente significa formadores de arrecifes, son los principales constructores de arrecifes, aunque también hay otros organismos con esqueletos de aragonita o carbonato de magnesio (algas coralinas,

algas frondosas como *Halimeda* spp., bivalvos, caracoles, briozoarios, esponjas, etc.), los cuales se cementan por una serie de reacciones biogeoquímicas y por procesos de empaquetamiento de los granos dentro de las cavidades que deja la caliza (Fabry *et al.*, 2008). La cantidad de carbonato de calcio que es depositado por los corales depende de las condiciones ambientales ya que, en aguas cálidas, poco productivas y muy iluminadas, los esqueletos crecen más rápido y estas zonas pueden tener una mayor tasa de crecimiento o acreción (Kleypas *et al.*, 1999). Además, también son relevantes los aspectos filogenéticos ya que especies de morfología ramificada (géneros *Acropora*, *Pocillopora*) crecen entre cuatro y 10 cm al año, mientras que los corales masivos (*Porites*, *Monastrea*) lo hacen lentamente, con menos de un cm por año (Carricart-Ganivet, 2004; Carricart-Ganivet *et al.*, 2007) y, por lo tanto, contribuyen de manera distinta a la estructura arrecifal. Esta estructura está constituida por CaCO_3 .

El sistema de carbonatos en el agua de mar se entiende de la siguiente manera:



Esta ecuación reversible indica que el CO_2 que entra de la atmósfera al océano reacciona con el agua formando ácido carbónico y sus productos de disociación, bicarbonato y carbonato. La suma de todas las especies químicas del bióxido de carbono disuelto se denomina bióxido de carbono inorgánico total: ($\text{TCO}_2 = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$), (Alvarez Borrego, 2007; Fabry *et al.*, 2008).

La fotosíntesis consume CO_2 , lo que llevaría a la ecuación hacia la izquierda, por lo que la concentración de H^+ disminuiría y en consecuencia el pH aumenta; por el contrario, la respiración desplazaría la ecuación hacia la derecha, aumentando la concentración de H^+ dando lugar a que el pH disminuya. La fotosíntesis es un proceso que llevan a cabo diversos grupos vegetales del arrecife. Los típicos productores primarios en el océano son las diatomeas, dinoflagelados, cocolitofóridos y otros protistas residentes de la columna de agua, los cuales sostienen la producción pesquera del planeta. Sin embargo, en el caso de los arrecifes de coral predominan las algas filamentosas (cianofitas) y coralinas (calcáreas) por lo que la medición directa de la productividad orgánica en los arrecifes de coral normalmente se hace solo para la parte béntica. La columna de agua es típicamente tan clara y transparente que prácticamente no contiene

organismos fotosintetizadores suspendidos.

Los arrecifes coralinos son el resultado del delicado balance entre el depósito de carbonato de calcio y la erosión por diversas causas (oleaje extremo, daño mecánico por buzos inexpertos, anclajes, bioerosión por erizos, poliquetos y esponjas), pero también dependen de la química del agua. Como ya se explicó en otro artículo de este número (ver Hernández Ayón *et al.*, 2016¹), la calcificación de los corales depende del estado de saturación de la aragonita, que es la forma de carbonato de calcio con la que están hechos los corales. El estado de saturación de la aragonita, representado como Ω_{arag} se calcula como:

$$\Omega_{\text{arag}} = [\text{Ca}^{+2}][\text{CO}_3^{2-}] / K_{\text{sp}}$$

Donde los paréntesis indican la concentración de los iones y K_{sp} el producto de solubilidad. Si $\Omega_{\text{arag}} > 1$ se dice que el agua está saturada y si $\Omega_{\text{arag}} < 1$ está subsaturada.

Los corales requieren de condiciones de pH básico (>8.0) y aguas saturadas de aragonita ($\Omega_{\text{arag}} > 3$). En otro artículo de este número se trata a profundidad el problema de la acidificación del océano, el cual es una amenaza más para los corales.

La tasa de calcificación de un coral se calcula como el producto de la densidad ($\text{g CaCO}_3 \text{ cm}^{-3}$) por la tasa de crecimiento (cm año^{-1}). Norzagaray-López *et al.* (2015) estimaron la tasa de calcificación del coral masivo *Porites* en varias localidades del Pacífico mexicano. Ellos encontraron que dicha tasa era de hasta $1.22 \text{ g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en Cabo Pulmo, Baja California Sur y de solo 0.49 en Islas Marietas, Nayarit.

Los arrecifes coralinos de las costas mexicanas

En nuestro país, los arrecifes se encuentran distribuidos en todas las costas; en el sur del Golfo de México existen sistemas frente a Tuxpan, el Puerto de Veracruz y Antón Lizardo, los cuales han sido estudiados desde hace décadas, y ofrecido sus servicios ambientales al país desde hace más de cinco siglos. Hacia el Este del Golfo, en el Banco de Campeche y el Norte de Yucatán existe una serie de bajos y arrecifes emergidos (Cayo Arcas, Cayo Arenas, Triángulos y Alacranes), famosos tanto por su alta diversidad de especies como por el hecho de que han sido impactados por las actividades de extracción petrolera.

La belleza de la Riviera Maya se debe a los arrecifes

¹ Hernández Ayón, J. M., J. R. Lara Lara, G. Gaxiola Castro. 2017. La acidificación del océano: situación en aguas mexicanas. En este número.

coralinos que bordean sus costas. La arena blanca y suave que hace tan atractivas sus playas es producto de miles de años de formación y erosión. Se le conoce como *Sistema Arrecifal Mesoamericano* y se comparte con Belice, Guatemala y Honduras. Después de la Gran Barrera de Australia es el arrecife de barrera más grande del mundo.

Como ya se dijo, un arrecife de coral es una estructura biogénica que modifica sustancialmente el sustrato, y su formación tarda miles de años. Bajo esta definición, el único arrecife costero en el Pacífico mexicano es el de Cabo Pulmo, pues en las costas de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca existen comunidades coralinas, pero no arrecifes coralinos propiamente dichos. En el Archipiélago Revillagigedo sí existen arrecifes coralinos y de menor dimensión en la Isla Isabel, las Islas Marías, Nayarit y más pequeños en las Islas Marietas. Sin embargo, todos son importantes ya que proveen servicios ambientales como zonas de refugio, alimentación, crianza y reclutamiento de muchas especies y valor estético para la práctica de buceo y otras actividades recreativas.

SERVICIOS AMBIENTALES Y ARRECIFES CORALINOS

Los arrecifes coralinos proveen importantes servicios ambientales como estructura física, proveen protección contra el oleaje y otros eventos de tormentas y huracanes. También son verdaderos bancos de biodiversidad, sitios de crianza y crecimiento de muchas especies, algunas de ellas de importancia comercial. El papel de los arrecifes coralinos para el turismo es crucial para la economía de las comunidades aledañas, además del valor estético y cultural que proporcionan. Según declaraciones del Secretario de Turismo², de enero a julio de 2016 México había recibido a 17 millones de turistas, los que dejaron una derrama de más de 10 063 millones de pesos. El destino de *sol y playa* sigue siendo el favorito de los turistas y en mucho la belleza de las playas se debe a los arrecifes coralinos.

Protección de la línea de costa

En septiembre de 2013 dos huracanes categoría 1 azotaron casi simultáneamente ambas costas de México: Manuel, en el Pacífico, e Ingrid por el



Figura 1. El estudio de los arrecifes coralinos se hace mediante buceo autónomo (Arturo Ayala).

Atlántico. Hasta el 23 de septiembre de 2013, solo Manuel había provocado un saldo de 123 muertos, 33 heridos, 68 desaparecidos, 59 mil evacuados, y al menos 218 mil 594 personas afectadas y 35 mil viviendas dañadas (Figura 2). Muchos de los daños se debieron a la modificación del uso de suelo, ya que se desmontaron zonas de manglares y se modificó la línea de costa. El cambio en el uso de suelo es una de las perturbaciones que más afecta a ecosistemas en nuestro país (Calderon-Aguilera *et al.*, 2012).

Las playas del Pacífico mexicano tradicionalmente han sido polo de atracción de turismo nacional e internacional por sus bellezas naturales. Una construcción a la orilla del mar tiene un gran atractivo visual y, en consecuencia, puede alcanzar altos precios en el mercado inmobiliario. Sin embargo, ese incentivo económico muchas veces lleva a modificar drásticamente los ecosistemas costeros, como por ejemplo desmonte de manglares, construcción de marinas, diques y otras estructuras que alteran la dinámica litoral (balance de sedimentos, acreción y sedimentación), descargas

² <http://eleconomista.com.mx/foro-economico/2016/08/14/mexico-se-alza-oro-turismo>. Visitada el 30 de agosto de 2016.

de aguas residuales y otros impactos ambientales. Aunado a ello, el cambio climático está provocando que fenómenos naturales como tormentas y huracanes se incrementen en frecuencia e intensidad, por lo que es

aún más importante contar con información actualizada y sustentada científicamente.



Figura 2. Daños causados por el huracán Manuel en la costa del Pacífico (Paul J Richards/Getty Images).

En el Caribe mexicano el papel de los arrecifes coralinos como protectores de la línea de costa quedó ampliamente demostrado en julio de 2005, durante el paso de “Emily” y en octubre de “Wilma”; mientras que en Cancún las pérdidas fueron multimillonarias por el deterioro que tienen los arrecifes aledaños, en Cozumel se logró contener el 90% de la energía de esos meteoros de tremenda magnitud (Álvarez-Filip y Gil, 2006; Álvarez-Filip *et al.*, 2006).

Un arrecife (o comunidad coralina) cuyo balance de carbonatos sea positivo, es decir, que su tasa de acreción sea mayor que su tasa de erosión, disipará mejor el oleaje provocado por eventos extremos, tales como huracanes y tormentas. El incremento en las emisiones de CO₂ derivado del cambio climático está provocando un aumento de este gas en la presión atmosférica y, por lo tanto, su disolución en el océano (Hoeg-Guldberg *et al.*, 2007). A este fenómeno se le conoce como acidificación – ya que baja la alcalinidad del mar - y puede provocar que

la densidad esquelética de organismos calcificadores, como corales escleractíneos, erizos, estrellas de mar y otros cuyo esqueleto esté compuesto de carbonato de calcio y en particular de la forma de aragonita, disminuya y en consecuencia sea más frágil. La tasa de calcificación de corales se ve favorecida cuando hay una sobresaturación de aragonita esto es, cuando $\Omega_{\text{arag}} > 3$ (donde Ω_{arag} es la constante de saturación de aragonita). Para poder evaluar el estado de saturación de aragonita es necesario entender el sistema del carbono en agua de mar. Este sistema comprende el estudio de las variables de pH, carbono inorgánico disuelto (CID), la alcalinidad total y la presión parcial del dióxido de carbono (pCO₂). Por otro lado, el calentamiento global está induciendo a que los eventos meteorológicos como tormentas y huracanes sean más frecuentes y de mayor intensidad (Bender *et al.*, 2010), por lo que el análisis de la protección natural de la zona costera que brindan ecosistemas como los arrecifes coralinos y manglares, adquiere mayor relevancia.

Banco de biodiversidad, crianza y crecimiento

Como se mencionó anteriormente, en los arrecifes de coral se encuentran representados prácticamente todos los grupos taxonómicos del medio marino, desde virus hasta depredadores tope. El potencial para aprovechamiento biotecnológico es altísimo, aunque poco conocido. Los peces son uno de los grupos taxonómicos más conspicuos que se encuentran en los arrecifes de coral; en Bahía de Banderas se han reportado 81 especies, en Cabo Pulmo 66, en Bahías de Huatulco 63 y en Tenacatita 52 especies (Calderón Aguilera *et al.*, 2009). También hay numerosas especies de invertebrados como crustáceos (camarones decápodos, del género *Trapezia* y *Alpheus* y carideos), moluscos (bivalvos y gasterópodos) y equinodermos (erizos, estrellas y algunas de importancia comercial como el pepino de mar).

Arrecifes y turismo

La Riviera Maya debe su bonanza (y, ojalá que no, su trágico destino, como se discute más adelante) a los arrecifes coralinos. El turismo es la tercera fuente de divisas del país y, proporcionalmente, la Riviera Maya es la que más aporta en este rubro.

En la costa del Pacífico, las comunidades coralinas, si bien no son propiamente arrecifes, también son importantes para el turismo. En la costa de Oaxaca, sobretodo en Huatulco, las comunidades coralinas son foco de atracción para turistas subacuáticos; en Guerrero, cerca de Ixtapa – Zihuatanejo, En Michoacán en Caleta de Campos y en Manzanillo, Colima también hay operadores turísticos enfocados al buceo. En Jalisco, sobretodo en Puerto Vallarta donde hay paseos a El Arco e Islas Marietas, así como en Chamela, Melaque y Tenacatita. Isla Isabel, Nayarit ha sido objeto de varios estudios científicos, aunque no tanto turísticos.

Mención aparte merece el buceo turístico en el Archipiélago Revillagigedo, ya que hay por lo menos siete operadores, todos extranjeros, que cobran desde 3 400 dólares americanos por persona por viaje más otros cargos (NITROX, combustible, entrada al área natural protegida). México debería cobrar más a los extranjeros (como sucede en varios países, por ejemplo, Costa Rica) y promover empresas nacionales para esa actividad. Las bellezas naturales son de los mexicanos, las ganancias no.

El Mercado de Bonos de Carbono y los arrecifes mexicanos

Además de los servicios ambientales antes descritos, los arrecifes coralinos también son importantes desde el punto de vista del mercado de bonos de carbono, ya que son en sí mismo estructuras de carbonato de calcio que tienen almacenadas toneladas de carbono en forma de carbonato de calcio. Un bono de carbono se define como el derecho a emitir una tonelada de CO₂, de tal forma que quien no emite se beneficia con el pago de aquellos, ya sean empresas o países, que sí emiten, de acuerdo con el Protocolo de Kioto. En diciembre de 1997, representantes de 37 países industriales y de la Unión Europea se reunieron en Kioto, Japón para establecer metas de reducción de emisiones de CO₂. En México a partir de 2014 se implementó el impuesto al carbono y, a la fecha, ha generado ingresos por más de mil millones de dólares³. El protocolo de Kioto vence su vigencia en 2020, por lo que el 12 de diciembre de 2015 durante la XXI Conferencia sobre Cambio Climático (COP21) 195 países miembros firmaron el Acuerdo de París en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Este Acuerdo establece las medidas para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del Calentamiento Global.

Calderon-Aguilera *et al.* (2007) estimaron los cambios en la tasa de depósito de carbonato de calcio por corales hermatípicos en cuatro localidades del Pacífico mexicano. Para ello, calcularon la producción potencial de carbonato de calcio (P_n):

$$P_n = d_i \cdot g_i \cdot cc_i$$

Donde d_i = densidad esquelética de la especie de coral i , g_i = tasa de crecimiento en extensión de la especie de coral i y cc_i es la cobertura de coral de la especie i . La tasa de calcificación de un coral se calcula simplemente como el producto de d_i por g_i .

Dichos autores encontraron que mientras en 1987 en Cabo Pulmo se depositaban 13 427 toneladas por hectárea por año, en 2003 había descendido a 2 555, es decir, aproximadamente una quinta parte y su equivalente en bonos de carbono. En el arrecife de La

³ World Bank Group; ECOFYS. 2016. Carbon Pricing Watch 2016. Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24288> License: CC BY 3.0 IGO.

Entrega, Oaxaca, de 915 toneladas en 1997, bajó a 491 en 2003. Esto lo atribuyeron a la pérdida de cobertura de coral vivo por diversas razones. Estas cifras pueden dar una idea del valor de los arrecifes como almacenes de carbono.

Hasta 2013, los cálculos de presupuestos de carbono en el Pacífico mexicano⁴ (PM) se basaban en estimaciones de las tasas de crecimiento observadas en otros lugares. Posteriormente, Cabral-Tena y *et al.* (2013) calcularon la densidad esquelética de *Porites panamensis* en tres localidades del Golfo de California. Estos autores encontraron que la tasa de calcificación variaba significativamente entre localidades y que era tan baja como $0.4 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en Bahía de los Ángeles hasta 1.3 en Bahía de La Paz. Otro hallazgo importante fue que la tasa de calcificación era mayor en machos ($18 - 23\%$) que en hembras y que esto se debía a la tasa de crecimiento, pues la densidad esquelética era la misma en ambos sexos. Con la misma especie Norzagaray-López *et al.* (2015) pero en un gradiente latitudinal mayor (desde Bahía de los Ángeles 29° N hasta Islas Marietas 20° N) determinaron que la tasa de calcificación (TC) también dependía del morfotipo, pues en su forma masiva la TC era de $1.22 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y en la forma incrustante de sólo 0.49 . En 2016 se han publicado dos trabajos más sobre este tema, uno con *Porites lobata* (Tortolero-Langarica *et al.*, 2016) y otro por Medellín-Maldonado *et al.* (2016) que incluyó ocho especies. Tortolero-Langarica *et al.* (2016) encontraron que *P. lobata* presenta tasas de calcificación muy bajas. Por otra parte, Medellín-Maldonado *et al.* (2016) incluyeron por primera vez especies de crecimiento masivo (*P. panamensis*, *P. lobata*, *Pavona gigantea*, *Pavona varians*) y especies de crecimiento ramificado (*Pocillopora meandrina*, *P. damicornis*, *P. verrucosa* y *P. capitata*) y encontraron que los corales ramificados tienen TC más altas ($2.99 - 5.23 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) que los masivos ($0.34 - 1.13 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$).

Con toda esta información, aunada a datos históricos sobre la distribución de corales en el Pacífico mexicano (Reyes Bonilla *et al.*, 2005.) y datos recientes de cobertura de coral, Medellín-Maldonado *et al.* (2016) hicieron un cálculo de la cantidad de carbonato de calcio almacenado en las principales comunidades coralinas y arrecifes del PM. Para ello primero se calculó la Producción bruta (PB) de cada localidad como la sumatoria de la *Pn* de las principales

especies de coral (Cuadro 1). Posteriormente se calculó el carbono secuestrado (en toneladas de C por hectárea por año) como el producto de la PB ponderado por la cobertura de coral promedio por el espesor promedio del parche coralino. Finalmente, se multiplicó por la superficie de cada localidad para obtener el carbono secuestrado total. El Cuadro 2 muestra que en Cabo Pulmo, sin contar las pérdidas por erosión, en total se retienen 8 657 toneladas de C al año, seguido de Ixtapa – Zihuatanejo con casi 162 toneladas. Estas cantidades pueden parecer pequeñas si se comparan, por ejemplo, con la de otros ecosistemas como bosques lluviosos. Sin embargo, el secuestro de carbono sólo es uno de los varios servicios ambientales que proporcionan estos ecosistemas, por lo que vale la pena su conservación.

Recomendaciones para políticas públicas

En vista de todos los beneficios que aportan los arrecifes coralinos, ya sea por los servicios ambientales que proporcionan, como por su papel en el flujo del carbono, queda claro que deben ser objeto de protección. Afortunadamente la mayoría de ellos ya cuenta con algún estado de protección (Parque Nacional Cabo Pulmo, Parque Nacional Islas Marietas, RB Archipiélago de Revillagigedo, PN Bahías de Huatulco). Además, México, como signatario de diversos acuerdos internacionales como la Convención de las Naciones Unidas sobre el derecho del mar, la Convención de Humedales de Importancia Prioritaria Internacional Ramsar, la Convención de la Diversidad Biológica y otras está obligado a proteger sus arrecifes de coral⁵.

El caso de Cabo Pulmo es el más conocido y documentado, donde se estima que la biomasa de peces pelágicos mayores se ha incrementado 11 veces desde el decreto de área natural protegida (Aburto-Oropeza *et al.*, 2011; Calderon Aguilera, 2013; Reyes Bonilla *et al.*, 2014)

Sin embargo, hay arrecifes como los que se encuentran en las inmediaciones de Ixtapa – Zihuatanejo que aún se encuentran en buen estado, pero que están siendo amenazados por turismo no regulado. El impacto que puede tener un buzo inexperto es grave si

⁴ Para el caso del Caribe mexicano sí se cuenta con datos medidos *in situ*.

⁵ Una muy buena revisión del marco legal en esta materia puede encontrarse en: AIDA (2015). La protección de los arrecifes de coral en México. Rescatando la Biodiversidad marina y sus beneficios para la humanidad. Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente. pp. 40.

Cuadro 1. Tasa de calcificación (TC, g cm⁻² año⁻¹), cobertura de coral relativa (CC, %) y producción potencial de CaCO₃ (Pn, kg m⁻² año⁻¹) de las principales especies de corales escleractineos en arrecifes del Pacífico mexicano.

Especie	Cabo Pulmo			Isla Isabel			Islas Marietas			Manzanillo		
	TC	CC	Pn	TC	CC	Pn	TC	CC	Pn	TC	CC	Pn
<i>Porites sp</i>	1.73	22%	2.4488	1.00	10%	0.498	1.00	10%	0.492	1.00	13%	0.6278
<i>Pavona sp</i>	1.58	15%	1.559	1.58	12%	1.22	1.58	5%	0.497	1.58	6%	0.6146
<i>Pocillopora sp</i>	5.23	63%	32.99084	5.23	78%	40.794	2.23	85%	18.955	5.23	81%	42.5722
Total			37.00			42.51			19.94			43.81

Especie	Tenacatita			Ixtapa			Huatulco		
	TC	CC	Pn	TC	CC	Pn	TC	CC	Pn
<i>Porites sp</i>	1.00	5%	0.247	1.00	9%	0.451	1.00	3%	0.149
<i>Pavona sp</i>	1.58	6%	0.474	1.58	6%	0.542	1.58	6%	0.542
<i>Pocillopora sp</i>	5.23	89%	46.547	5.23	85%	44.455	5.23	91%	47.593
Total			47.27			45.45			48.28

Cuadro 2. Producción bruta (kg CaCO₃ m⁻² año⁻¹), cobertura de coral (%), espesor del arrecife (m), carbono secuestrado (ton ha⁻¹ año⁻¹), área del arrecife (ha) y tasa de carbono secuestrado (ton año⁻¹), en las principales formaciones arrecifales del Pacífico mexicano.

Arrecife	Prod Bruta	Cobertura Coral	Espesor	C secuestrado	Área (ha)	Tasa de C Secuestrado
Cabo Pulmo	37.0	12	1.50	66.60	130	8 657.68
Isla Isabel	42.5	9.18	2.8	1.31	12	15.74
Islas Marietas	19.9	12	2.5	1.79	30	53.85
Manzanillo	43.8	54	3	4.26	6	25.55
Tenacatita	47.3	90	4.5	4.79	2.5	11.96
Ixtapa	45.4	60.61	3	11.57	14	161.97
Huatulco	48.3	43.38	4	6.28	7.5	47.13
Total				96.60	202	8 973.88

se considera que, si rompe de un aletazo un fragmento de coral de 10 cm, a una tasa de crecimiento de un centímetro al año, tardaría 10 años en recuperarse. Es por ello que los prestadores de servicio turísticos deben de aperebir a los buzos sobre el cuidado que deben tener al bucear cerca de corales. Más aún, debería hacerse una zonificación de acceso a buzos en función de su experiencia en buceo. En Hawaii, por ejemplo, los buzos son llevados a zonas de naufragios o arrecifes muertos, pero no a arrecifes funcionales (Calderon Aguilera, Observación personal, junio de 2016). Además, la remoción de sedimento y descargas de aguas residuales pueden afectar a los corales. En Manzanillo, Colima también hay comunidades arrecifales en buen estado que es necesario conservar, con alta diversidad biológica, pero sujetas a impacto antrópico.

El caso de la Rivera Maya, si no sea actúa pronto, será la crónica de una muerte anunciada. Al deforestar manglares, que funcionan como los riñones de la costa y al afectar a los arrecifes coralinos con aguas residuales, la modificación de la línea de costa y el turismo no regulado, la Rivera Maya perderá sus aguas cristalinas y sus playas de arena blanca. Todos los ecosistemas tienen una capacidad de carga finita, cuando se rebasa esa capacidad, el ecosistema se colapsa. O se pone un freno al desarrollo costero o muy pronto no habrá paisaje que atraiga al turismo. Los arrecifes coralinos son ecosistemas frágiles y muy vulnerables; si no se protegen lo que a la naturaleza le llevó miles de años construir, en una generación humana se puede perder.

En síntesis, hay una serie de acciones que se deben llevar a cabo para proteger los arrecifes de México. (AIDA, 2015) propone las siguientes:

1. Coordinación entre autoridades, ya que en la zona costera hay diversas instancias y autoridades que tienen injerencia.
2. Desarrollo de una política nacional específica para la protección del arrecife de coral, misma que incluya una revisión continua de leyes, acciones y políticas necesarias, estimación de la capacidad de carga, entre otras.
3. Creación de un consejo o comisión intersecretarial. A este respecto cabe mencionar que, aunque en la práctica no funciona, por

Decreto Presidencial del 19 de mayo de 2000⁶ se creó el Consejo Consultivo Nacional Científico y Técnico de los Arrecifes Coralinos de México (COCCYTAC), por lo que se recomienda su reactivación.

4. Aplicación efectiva e incremento de sanciones. Aún en el caso de áreas naturales protegidas la vigilancia es muy débil, por lo que muchas veces no se cumple con lo señalado en el Programa de Manejo de ellas.

AGRADECIMIENTOS

A los revisores, por sus comentarios y observaciones, que mejoraron sustancialmente este trabajo.

⁶ Acuerdo por el que se crea el Consejo Consultivo Nacional Científico y Técnico de los Arrecifes Coralinos de México. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2055644&fecha=31/12/1969&print=true

LITERATURA CITADA

- Aburto, O. O., B. Erisman, G. R. Galland, I. Mascareñas O., E. Sala and E. Ezcurra. 2011. Large recovery of fish biomass in a no-take marine reserve. *PLoS One*, 6(8): e23601.
- AIDA. 2015. La protección de los arrecifes de coral en México. Rescatando la Biodiversidad marina y sus beneficios para la humanidad. Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente. pp. 40.
- Álvarez, F. L. and I. Gil. 2006. Effects of Hurricanes Emily and Wilma on coral reefs in Cozumel, Mexico. *Coral Reefs*, 25(4): 583-583. DOI: 10.1007/s00338-006-0141-6
- Alvarez, F. L., E. Millet M. and H. Reyes B. (2006). Impact of Hurricanes Emily and Wilma on the Coral Community of Cozumel Island, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 84(3), 295-306.
- Alvarez, B. S. 2007. Flujos de carbono en los Golfos de California y México. pp. 337-353. *In: Hernández de la Torre B. and G. Gaxiola Castro (eds.). Carbono en ecosistemas acuáticos de México.* México, D.F. Instituto Nacional de Ecología.
- Bender, M. A., T. R. Knutson, R. E. Tuleya, J. J. Sirutis, G. A. Vecchi, S. T. Garner and I. M. Held. 2010. Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science*, 327(5964): 454-458.
- Birkeland, C. 1996. Why some species are especially influential on coral-reef communities and others are not. *Galaxea* 13: 77-84.
- Cabral, T. R., H. Reyes B., S. Lluch C., D. Paz G., L. E. Calderon A., C. O. Norzagaray L. and E. Balart. (2013). Different calcification rates in males and females of the coral *Porites panamensis* in the Gulf of California. *Marine Ecology Progress Series*, 476: 1-8. DOI: 10.3354/meps10269
- Calderon, A. L., V. Rivera M., L. Porter B., A. Martínez Y., L. Ladah, M. Martínez R., J. Alcocer, A. Santiago P., H. Hernandez A., V. Reyes G., D. Pérez S., V. Díaz N., J. Sosa R., J. Herrera S. and A. Búrquez. 2012. An assessment of natural and human disturbance effects on Mexican ecosystems: current trends and research gaps. *Biodiversity and Conservation*, 21(3): 589-617. DOI: 10.1007/s10531-011-0218-6
- Calderón, A. L. E., H. Reyes B. and J. D. Carriquiry. 2007. El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: estudios en el Pacífico mexicano. *El carbono en aguas costeras y lacustres*. pp. 215-226.
- Calderon, A. L. E., H. Reyes B., M. C. Mozqueda, J. I. Urciaga G., P. A. Álvarez del Castillo, C. Erosa R., F. J. Fernández R., T. C. Frausto I., X. G. Moreno S. y C. O. Norzagaray L. 2013. Cabo Pulmo, arrecife coralino de valiosos servicios ambientales. *Ciencia y Desarrollo* 265: 6-13.
- Calderón, A. L. E., H. Reyes B., R. A. López P. R. A., A. Cupul M., M. D. Herrero P., J. D. Carriquiry, and P. Medina R. 2009. Fauna asociada a arrecifes coralinos del Pacífico mexicano. *Ciencia y Desarrollo* 35(230): 38-45.
- Carricart, G. J. P. 2004. Sea surface temperature and the growth of the West Atlantic reef-building coral *Montastraea annularis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 302(2): 249-260. DOI: 10.1016/j.jembe.2003.10.015
- Carricart, G. J. P., J. M. Lough and D. J. Barnes. 2007. Growth and luminescence characteristics in skeletons of massive *Porites* from a depth gradient in the central Great Barrier Reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 351(1-2): 27-36. DOI: 10.1016/j.jembe.2007.05.038
- Fabry, V. J., B. A. Seibel, R. A. Feely and J. C. Orr. 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 65(3): 414-432. DOI: 10.1093/icesjms/fsn048
- Hoeg, G. O., P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias P., N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi and M. E. Hatziolos. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318: 1737-1742. DOI: 10.1126/science.1152509
- Kleypas, J. A., J. W. McManus and A. B. Meñez L. 1999. Environmental limits to coral reef development: where do we draw the line? *American Zoologist* 39(1): 146-159.
- Medellin, M. F., R. A. Cabral T., A. Lopez P., L. E. Calderon A., C. O. Norzagaray L., C. Chapa B. and R. C. Zepeta V. 2016. Calcificación de las principales especies de corales constructoras de arrecifes en la costa del Pacífico del sur de México. *Ciencias Marinas* 42(3): 209-225.
- Norzagaray, L. C. O., L. E. Calderon A., J. M. Hernández A., H. Reyes B., J. P. Carricart G., R. A. Cabral T. and E. F. Balart F. 2015. Low calcification rates and calcium carbonate production in *Porites panamensis* at its northernmost geographic distribution. *Marine Ecology* 36(4): 1244-1255.
- Reyes, B. H., L. E. Calderon A., G. Cruz P., P. Medina R., R. A. López P., M. D. Herrero P., G. E. Leyte M., A. L. Cupul M. and J. D. C. Beltrán., J. D. C. 2005. Atlas de los corales pétreos (Anthozoa: scleractinia) del Pacífico Mexicano. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Universidad de Guadalajara / Centro Universitario de la Costa, Universidad del Mar. Ensenada, Baja California, México.
- Reyes, B. H., P. A. Álvarez del Castillo C., L. E. Calderón A. C. E. Erosa R., F. J. Fernández R., T. C. F., B. M. Luna S., X. G. Moreno S., M. C. Mozqueda T., C. O. Norzagaray L. and D. P. Ramírez. 2014. Servicios ambientales de arrecifes coralinos: el caso del Parque Nacional Cabo Pulmo, Baja California Sur. pp. 49-79. *In: J. I. U. García (ed.) Desarrollo regional en Baja California Sur: una perspectiva de los servicios ecosistémicos.* Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, Baja California Sur, México.



- Sheppard, C. R. C., S. K. Davy and G. M. Pilling. 2009. The biology of coral reefs. The biology of habitats series. Oxford.
- Tortolero, L. J., A. Rodríguez T., J. Carricart G. and A. Cupul M. 2016. Skeletal extension, density and calcification rates of massive free-living coral *Porites Lobata dana*, 1846. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 478: 68-76.

BASES PARA EL DESARROLLO DE LA LEGISLACIÓN MARINO COSTERA EN MÉXICO

María Elena Mesta Fernández^{1†}

¹Legado Sustentable, A. C.

[†]Autor para correspondencia: legadosustentable@gmail.com

RESUMEN

México cuenta con un gran número de disposiciones jurídicas que regulan la Zona Marino Costera, así como la conservación y aprovechamiento sustentable de ecosistemas y recursos naturales marino-costeros, pero es un hecho que existen serias insuficiencias en el marco legal, que es necesario subsanar para orientar las conductas reguladas hacia un objetivo general previsto en el artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: el Desarrollo Integral y Sustentable. Desde el ámbito del análisis jurídico y, a partir de principios constitucionales y de compromisos internacionales que México ha ratificado en materia de derecho del mar y derecho ambiental, el presente artículo busca exponer los grandes retos y desafíos que representa para México la conservación efectiva de las zonas marino costeras y de los elementos que la conforman, así como la necesidad de dar un uso sustentable a los recursos y servicios en ellas comprendidos. Para tal efecto, se analizan las principales causas de ineficiencia e ineficacia del marco legal aplicable a las zonas marino-costeras en México y se presentan algunas bases para el diseño de un nuevo marco legal y de políticas públicas aplicable a nivel nacional, que sea efectivo, eficaz y eficiente para regular y fomentar, de manera general, un desarrollo integral sustentable en zonas marino-costeras, así como la conservación de bienes y servicios ambientales que proveen los ecosistemas marino-costeros. Con ello se busca abonar a la construcción de nuevos modelos normativos que contribuyan al desarrollo de las bases para transitar hacia un derecho para el desarrollo sustentable.

Palabras clave: marco jurídico de zonas marino-costeras; recursos marino-costeros; manejo marino-costero; desarrollo sustentable.

INTRODUCCIÓN

La zona costera (ZC) o zona marino-costera (ZMC) es aquella franja interface del continente, el océano y la atmósfera, que abarca desde menos de 200 m de profundidad en el mar, hasta 100 km tierra adentro o 50 m de elevación. A nivel global, se reconoce la importancia de los mares y costas para promover un desarrollo sustentable, así como de los impactos que tienen las actividades humanas sobre los ecosistemas (PNUD, 1992).

México cuenta con zonas marino-costeras de un gran valor estratégico ya que permiten la realización de diversas actividades económicas que constituyen una importante fuente de ingresos al país, entre ellas, la extracción de hidrocarburos y minerales, el turismo, la pesca, la acuicultura y la transportación marítima. De los

32 estados de la República Mexicana, 17 cuentan con zona costera, la cual cubre una extensión aproximada de 1 100 000 km² y concentra 15.9 millones de habitantes (aproximadamente el 15% de la población total del país) en 156 municipios con frente costero, que presentan las mayores tasas de crecimiento anuales: 2.8% en promedio, contra 1.8% a nivel nacional (UNAM, 2015).

Aunado a lo anterior, los mares y costas mexicanos cuentan con una gran riqueza natural, en la que se encuentran los ecosistemas más productivos del mundo y proveen bienes y servicios ambientales prioritarios para el desarrollo económico-social presente y futuro del país. Dichos ecosistemas son de los más frágiles y susceptibles a los efectos del cambio climático global, sobre todo si se considera que están bajo una presión constante, tanto de origen natural (e.g. huracanes) como humano (e.g. sobreexplotación, contaminación, impactos

ambientales generados por diversas actividades) a lo que se suman los efectos del cambio climático.

En México se han desarrollado diversos instrumentos y mecanismos de política pública que advierten la importancia de la conservación de las ZMC, todos ellos consecuentes con los compromisos que México ha suscrito como signatario de diversos acuerdos internacionales relacionados, por un lado, con la Convención de las Naciones Unidas sobre Derecho del Mar y, por otro, con los acuerdos firmados en la Cumbre de Desarrollo y Medio Ambiente celebrada en Río de Janeiro en 1992 (PNUD, 1992). No obstante, la sustentabilidad de mares y costas mexicanos se encuentran bajo riesgo debido a la falta de una regulación efectiva que asegure la defensa de los recursos naturales, el aprovechamiento sustentable y estratégico de las costas, la protección del ambiente, la coordinación de las diferentes instancias gubernamentales y la garantía de los derechos de sus habitantes, visitantes, inversionistas y demás personas con intereses asociados a las zonas costeras (Carmona, 2013).

El presente análisis busca responder a los grandes retos y desafíos que representa la conservación efectiva de las zonas marino-costeras y de los elementos que las conforman, así como la necesidad de dar un uso sustentable a los recursos y servicios en ellas comprendidos. En el ámbito del análisis jurídico, se identificarán las bases para el diseño de un nuevo marco legal y de políticas públicas aplicable a nivel nacional, que sea efectivo, eficaz y eficiente para regular y fomentar, de manera general, un desarrollo integral sustentable en zonas marino-costeras, así como la conservación de bienes y servicios ambientales que proveen y apoyar la construcción de nuevos modelos normativos que contribuyan al desarrollo de las bases para transitar hacia un derecho para el desarrollo sustentable (Brañes, 2004).

METODOLOGÍA

Se procedió al análisis de diversas leyes e instrumentos jurídicos que hacen alusión al desarrollo sustentable en las zonas marino-costeras de México, así como a la conservación de los ecosistemas marino-costeros, incluyendo los bienes y servicios ambientales que proveen, mediante el empleo de una metodología propia denominada Metodología de Análisis de Eficiencia, Eficacia, Efectividad de la Legislación (AMAIEEEL), la cual utiliza un conjunto de criterios (Cuadro 1) análogos a los empleados por el enfoque de marco lógico en la planeación (Banco Mundial,

2015). A través del AMAIEEEL es posible detectar vacíos e insuficiencias en la legislación en cuanto a: (i) la relevancia que tiene el tema del Desarrollo Integral y Sustentable (DIS) en la legislación y planeación nacional, (ii) los principios, criterios o enfoques en las leyes asociados a las zonas y recursos marino-costeros, (iii) diseños institucionales relacionados con la gestión y gobernanza y, (iv) instrumentos y mecanismos. Se identificaron las principales causas que se traducen en ineficiencias de la legislación, que obstaculizan un desarrollo integral y sustentable en zonas marino-costeras en México. Asimismo, se identificaron las oportunidades para el diseño y desarrollo de medidas efectivas de conservación de los distintos servicios ecosistémicos como elemento fundamental para lograr un desarrollo integral y sustentable en el país.

Cabe hacer mención de que la adaptación de la metodología AMAIEEEL retoma los conceptos de eficiencia y eficacia utilizados por Brañes (2001); con base en las categorías de análisis empleadas por el autor, cuando se habla de falta de idoneidad en la legislación se hace referencia a que ésta asume un enfoque equivocado para el tratamiento jurídico de los problemas y, cuando se hace alusión en este estudio a la falta de desarrollo de la legislación, se asume estar ante cualquiera de los siguientes tres supuestos: (i) la legislación es inexistente, (ii) la legislación es insuficiente toda vez que falta desarrollar la legislación ambiental sustantiva y presenta un incipiente grado de desarrollo y, (iii) la legislación es incompleta toda vez que en el sistema jurídico faltan normas que desarrollen con mayor especificidad el contenido de otras que ya se encuentran en vigor y hacen posible su aplicación.

ESTADO ACTUAL DE LA LEGISLACIÓN SOBRE MARES Y COSTAS EN MÉXICO

Marco legal aplicable a las zonas marino-costeras

México ha generado un marco legal que regula las zonas marino-costeras en muy diversos ámbitos. Sobre los mares y costas del país rigen y se aplican un gran número de instrumentos legales y normativos, tanto de carácter federal, como estatal y municipal; adicionalmente, existen instrumentos internacionales que han sido firmados y adoptados por el país. Estos instrumentos normativos pueden clasificarse en instrumentos comprendidos en el Derecho del Mar y, por otra parte, aquellos que pertenecen al Derecho Ambiental y al Derecho al Desarrollo Sustentable (Cuadro 2).

Cuadro 1. Criterios de análisis de la legislación con base en la metodología de Análisis de Impacto, Efectividad, Eficacia y Eficiencia de la Legislación (AIEEEL).

Criterio	Concepto	Objeto de evaluación del presente estudio
Impacto	Es el grado en la que la norma es capaz de modificar positiva o negativamente, de manera permanente, las condiciones iniciales en el entorno que justificaron su expedición (logra el objetivo general esperado).	Cambios permanentes esperados en el entorno: Desarrollo Integral Sustentable (DIS) en Zonas Marino-Costeras (ZMC) de México.
Efectividad	El grado en el cual el instrumento de política logra modificar la conducta, actitud o desempeño del sector a través de la aplicación efectiva de sus disposiciones (logra los objetivos específicos).	Objetivos específicos: Conservación de servicios ambientales.
Eficacia	El grado de la aplicabilidad del instrumento normativo, es decir, qué tanto las medidas y especificaciones técnicas previstas en él se aplican para obtener los productos o resultados deseados.	Grado en que la norma produce los resultados esperados de su aplicación.
Eficiencia	El grado de idoneidad en el diseño de una norma jurídica para alcanzar los objetivos que se tuvieron en cuenta al momento de su expedición, al utilizar apropiadamente las capacidades y recursos de los sujetos obligados.	Calidad del contenido de la legislación-instrumentos, mecanismos y procesos.

Cuadro 2. Bases Sustantivas del derecho ambiental y desarrollo sustentable en la Constitución (CPEUM).

CPEUM	Síntesis de su contenido
Artículo 1	Reconocimiento de los derechos humanos.
Artículo 4	Derecho que tiene toda persona a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar y el reconocimiento a nivel constitucional de la responsabilidad por daño ambiental.
Artículo 25	Reconoce como principio del Estado Mexicano, la responsabilidad que éste tiene de la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable; su potestad para impulsar la productividad y sustentabilidad en las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente.
Artículo 27	Reconoce el derecho que tiene la Nación de regular el aprovechamiento de los recursos naturales susceptibles de apropiación, en beneficio social, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública y cuidar de su conservación. Establece el dominio inalienable e imprescriptible que tiene la Nación sobre ciertos recursos naturales.
Artículo 133	Reconoce con carácter de ley suprema los tratados y convenios internacionales celebrados por México en términos de lo dispuesto por la propia constitución.

Contenido de las diferentes leyes sectoriales: vacíos e insuficiencias

Si bien es cierto que México cuenta con un gran número de disposiciones jurídicas que regulan la Zona Marino Costera, así como la conservación y aprovechamiento sustentable de ecosistemas y recursos naturales marino-costeros, también lo es que existen en el marco legal serias insuficiencias que es necesario subsanar para orientar las conductas reguladas hacia un objetivo general previsto en el artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM): El Desarrollo Integral y Sustentable (DIS). Entre las causas raíz que han hecho ineficiente e ineficaz a la legislación marino-costera se encuentran: a) la falta de visión, objetivos y enfoques compartidos del DIS en la legislación y, b) la regulación sectorial ineficaz e ineficiente de la ZMC.

Falta de visión, objetivo y enfoques sectoriales: falta de una visión compartida sobre el desarrollo integral sustentable en México.

Como resultado de un análisis de los principios y objetivos que constituyen el fundamento del Estado-Nación en nuestra constitución (Cuadro 2) y su impacto en la legislación secundaria (Cuadro 3), se desprende que una de las razones más profundas de las insuficiencias de la Legislación sobre Mares y Costas (LMC) es la manera como se han ido regulando los bienes y servicios existentes en ellos y la ausencia de una política nacional orientada hacia un DIS como mandata la CPEUM en su artículo 25. Lo anterior se debe, por una parte, a la falta de una visión y definición única de este concepto en la propia constitución, o bien, en la legislación secundaria, así como de los medios o instrumentos de política general para transitar hacia este objetivo de país.

Cuadro 3. Legislaciones sobre mares y costas (CIMARES, 2012; CONABIO, 2010).

I. Federales

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Ley de Planeación.
- Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.
- Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica.
- Ley General de Bienes Nacionales y su Reglamento para el uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar.
- Ley de Desarrollo Rural Sustentable.
- Ley General de Asentamientos Humanos.
- Ley General de Población.
- Ley General de Protección Civil.
- Ley General de Educación.
- Ley de Ciencia y Tecnología.
- Ley General de Desarrollo Social.
- Ley General de Salud.

Cuadro 3. Legislaciones sobre mares y costas (CIMARES, 2012; CONABIO, 2010).

(Continuación)

- Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados.
- Ley Federal de Sanidad Animal y su Reglamento.
- Ley Federal de Sanidad Vegetal y su Reglamento.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y sus reglamentos.
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
- Ley General de Vida Silvestre.
- Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables, su Reglamento y el Acuerdo por el que se Establece un Esquema de Regulación para la Pesca Deportiva – Recreativa.
- Ley de Productos Orgánicos.
- Ley General de Turismo.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
- Ley de Aguas Nacionales.
- Ley Federal del Mar y su Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias.
- Ley de Puertos.
- Ley de Vías Generales de Comunicación.
- Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal.
- Ley de Navegación y Comercio Marino.
- Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica.
- Ley Federal de Competencia Económica.
- Ley para el Desarrollo de la Competitividad de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa.
- Ley para Impulsar el Incremento Sostenido de la Productividad y la Competitividad de la Economía Nacional.
- Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.
- Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.
- Ley de Energía para el Campo.
- Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos
- Ley Federal de Derechos.
- Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas.

Cuadro 3. Legislaciones sobre mares y costas (CIMARES, 2012; CONABIO, 2010).

(Continuación)

- Ley Minera.
- Ley de Petróleos Mexicanos.
- Ley de Vivienda.
- Normas oficiales mexicanas de los sectores miembros de la CIMARES.

II. Internacionales sobre el Derecho del Mar

- Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR).
- Convenio para la Protección y el Desarrollo del Medio Marino de la Región del Gran Caribe.
- Protocolo de Cooperación para Combatir los Derrames de Hidrocarburos en la Región del Gran Caribe del Convenio para la Protección y el Desarrollo del Medio Marino de la Región del Gran Caribe.
- Convención sobre el Mar Territorial y la Zona Contigua (1958).
- Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre y los Sedimentos de los Buques.
- Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (1973) y su Protocolo de 1978 (MARPOL 73/78) y Anexos I, II y V.
- Convenio Internacional sobre Cooperación, Preparación y Lucha contra la Contaminación por Hidrocarburos (1990).
- Acuerdos para la Promoción y Protección Recíproca de las Inversiones.
- Convención relativa a la Organización Consultiva Marítima Intergubernamental (1948).
- Organización Marítima Internacional (OMI).

III. Internacionales sobre Derecho Ambiental y Derecho al Desarrollo Sustentable

- Convención Internacional para la Reglamentación de la Caza de la Ballena (1946).
- Convención sobre Pesca y Conservación de los Recursos Vivos de Alta Mar (1958).
- Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas. Convención de Ramsar (1971).
- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora, CITES (1972).
- Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural (1972).
- Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.

Cuadro 3. Legislaciones sobre mares y costas (CIMARES, 2012; CONABIO, 2010).*(Continuación)*

- Agenda XXI. Capítulo 17 Protección de Océanos y de los Mares de todo tipo, incluidos los mares cerrados, semicerrados y de las zonas costeras y protección, utilización racional y desarrollo de sus recursos vivos (1992).
- Convenio sobre la Diversidad Biológica, CDB (1993).
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992).
- Acuerdo sobre el Programa Internacional para la Conservación de los Delfines (1998).
- Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT).
- Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (CICAA).
- Comisión Ballenera Internacional (CBI).
- Comisión sobre Cooperación Ambiental de América del Norte (TLCAN/CCA).

IV. Acuerdos voluntarios

- Código de Conducta para la Pesca Responsable (FAO).

V. Estatales

- Constituciones Políticas de los Estados con Litoral.
- Leyes Ambientales y de Regulación de Recursos Naturales de los Estados con Litoral.
- Leyes de Regulación de los Asentamientos Humanos de los Estados con Litoral.
- Leyes de Promoción y Desarrollo Económico y Turístico de los Estados con Litoral.
- Reglamentos de las Leyes Ambientales, de Regulación de los Recursos Naturales y de los Asentamientos Humanos y de Promoción y Desarrollo Económico y Turístico.

VI. Reglamentos y Bandos Municipales aplicables

VII. Normas Oficiales Mexicanas y Normas Voluntarias.

- NMX-aa-120-scfi-2006 Que Establece los Requisitos y Especificaciones de Sustentabilidad de Calidad de Playas

Como consecuencia de la ineficiencia se encuentran diversas evidencias de disposiciones en el sistema jurídico que muestran la ausencia de una idea apropiada del desarrollo sustentable. Como se señala por algunos autores, hay una escasa presencia de la idea del desarrollo sustentable en la

legislación económica (Brañes, 2004) situación que se manifiesta en la ausencia de un enfoque común del desarrollo sustentable entre las diversas leyes que se analizaron, lo que a su vez genera heterogeneidad de contenido y estructural en el sistema jurídico en su conjunto (Cuadro 4).

Cuadro 4. Legislación para el desarrollo sustentable en México.

Legislación	Acrónimo	Artículos
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	CPEUM	Artículos 1, 2, 4, 25
Ley de Planeación	LP	Artículos 2, 9, 21 y 21 Bis (crecimiento sostenido y sustentable).
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (Publicada en D.O.F el 01 de marzo de 1988)	LGEEPA	Artículos 1º, 3º fracción XI
Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables (Publicada en el DOF el 24 de julio de 2007)	LGPA	Artículo 1º
Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Publicada en D.O.F el 25 de febrero de 2003)	LGDFS	Artículo 1 (Desarrollo forestal sustentable).
Ley de Aguas Nacionales (Publicada en D.O.F el 01 de diciembre de 1992)	LAN	Artículo 3. Fracciones XXI, XXVIII y XXIX
Ley General de Cambio Climático (Publicada en el DOF el 06 de junio de 2012)	LGCC	Artículo 1
Ley para Impulsar el Incremento Sostenido de la Productividad y la Competitividad de la Economía Nacional (Publicada en el DOF el 06 de mayo de 2015)	LPyC	Artículo 3 fracción II. (Desarrollo económico alto, sostenido y sustentable) y artículo 8, Fracción II, inciso c) (crecimiento sostenido y sustentable). Así como artículo 11.

Nota: Este cuadro contiene artículos que hacen alusión expresa al término desarrollo sustentable.

Visiones sectoriales del territorio y sus elementos.

Una de las razones más profundas de las insuficiencias de la legislación en materia de mares y costas tiene que ver con la manera como se conciben los diferentes bienes jurídicos bajo tutela: (i) cada sector de la administración pública federal, estatal y municipal, regula y establece políticas sobre mares y costas según su propio enfoque de gestión, generando sus propios conceptos y figuras legales, en consecuencia, se generan ficciones legales e instrumentos que en ocasiones resultan inadecuados y contradictorios entre sí, produciendo efectos negativos sobre los bienes y servicios marino costeros. Tal es el caso del derecho ambiental, en el cual se observa cómo su cometido se diseñó de manera limitada y no tiene en consideración las complejidades de los ecosistemas y las interrelaciones de sus componentes, así como las vinculaciones que existen entre el medio ambiente y el desarrollo (Brañes, 2004). Así mismo, esta deficiencia de enfoques limitados en el diseño se observa en la legislación sobre bienes nacionales, la cual se orienta a regular la denominada Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT), sin considerar las interrelaciones existentes entre ecosistemas marino-costeros o la importancia de esta zona para el desarrollo sustentable del país (Ramos, 2011).

Regulación sectorial ineficaz e ineficiente de la ZMC

Distribución de competencias y coordinación interinstitucional ineficaz. Las deficiencias en el diseño institucional actual de las dependencias y organismos encargados de la aplicación de los mandatos contenidos en la legislación en materia de Mares y Costas es un problema serio si se considera que en dicha administración intervienen 13 secretarías federales, las secretarías de medio ambiente de los 17 estados costeros y las autoridades competentes de 167 municipios. Entre los principales problemas detectados figuran los siguientes: (i) existe una distribución de competencias entre las diversas dependencias de la Administración Pública Federal (APF) basada en funciones, atribuciones y objetivos que se han asignado conforme a diferentes políticas sectoriales a través del tiempo (urbana, turística, de uso del suelo, aprovechamiento de la ZOFEMAT, ambiental, etc.) lo que hace que su administración se dé conforme a distintas concepciones acerca de la ZMC en general y de la ZOFEMAT en particular, (ii) no existen esquemas de gestión y gobernanza apropiados que garanticen un manejo integrado de

los recursos marino-costeros. No obstante que en la legislación se ha intentado establecer esquemas de concurrencia y mecanismos de coordinación intra e interinstitucionales, así como distribución de competencias y esquemas de descentralización de funciones hacia estados y municipios en cuanto a la administración de la ZOFEMAT, en la práctica no se ha logrado establecer un sistema de coordinación efectivo para el manejo de la ZMA. Un ejemplo patente de lo anterior es la Comisión Intersecretarial de Manejo de Mares y Costas (CIMARES), cuyo funcionamiento ha resultado opcional, propiciando que su operación sea ineficiente e ineficaz.

Instrumentos de gestión ineficaz e ineficiente. Del análisis de la legislación en materia de mares y costas se desprende que esta es heterogénea en cuanto a: (i) la concepción del territorio marino-costero, (ii) la definición de bienes y servicios existentes en mares y costas, (iii) el enfoque en el tratamiento de los bienes y servicios en MyC con relación al mercado, la competitividad y el desarrollo integral y sustentable, lo que deriva en principios y criterios de política sectoriales en ocasiones incongruentes y/o en conflicto, (iv) el tipo de limitaciones o modalidades que se impone a la propiedad privada a través de instrumentos de política que en algunos casos resultan contradictorias, provocando conflictos o problemas de aplicación efectiva, e.g. en los permisos de aprovechamiento de la ZOFEMAT actual, no están claros los tipos de medidas que pueden resultar apropiadas desde el punto de vista ecosistémico para la conservación de servicios ambientales, por tanto, los alcances y límites de las obligaciones impuestas a los sujetos obligados a través de instrumentos de planeación y regulatorios se fijan de manera discrecional por parte de la autoridad ambiental (Dirección de la ZOFEMAT) y pueden resultar ineficientes e ineficaces dada la definición y alcance que tiene los límites territoriales fijados para delimitar la ZOFEMAT y, (v) los instrumentos normativos (NOMs y NMX) e instrumentos de carácter territorial en materia ambiental (como los ordenamientos ecológicos del territorio, áreas naturales protegidas y las áreas destinadas voluntariamente a la conservación) no están vinculados a instrumentos económicos, así como los incentivos y acciones de fomento lo que resta eficiencia y eficacia a ambos instrumentos (SEMARNAT, 2011).

En conclusión, se puede decir que hoy en día el derecho aplicable a mares y costas en México se enfrenta al reto de llegar a consolidar una gestión

moderna vinculada a una verdadera agenda de desarrollo integral y sustentable que encuentre respuestas adecuadas a los cambios que son necesarios, asegurando niveles de aplicación satisfactorios en función de procesos de evaluación del desempeño de las instancias responsables de la gestión, así como de la eficacia y eficiencia de los instrumentos de gestión con base en indicadores sociales, ambientales, económicos y culturales que sean relevantes para el país.

Falta de espacios y mecanismo de participación ciudadana. Si bien en la legislación se establecen espacios de participación social en los organismos encargados de aplicar la ley, en la práctica los órganos de participación tienen funciones consultivas y escasa oportunidad de incidencia en la formulación, desarrollo y evaluación de los programas y actividades debido a que sus propuestas y recomendaciones no son vinculantes para la toma de decisiones de las autoridades, aunado a la insuficiente información disponible para poder participar en los procesos de toma de decisión.

OPORTUNIDADES, RETOS Y DESAFÍOS

En tratados y convenios internacionales relacionados con ZMC

México ha suscrito diversos instrumentos internacionales asociados a la ZMC. Uno de estos es la denominada Declaración de Río firmada en la Cumbre Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro, Brasil, 1992 (Cumbre de Río), la cual incluye un documento programático denominado Agenda 21 en el que de manera particular en el capítulo 17 se detallan líneas de acción prioritarias para la protección de los océanos, todo tipo de mares, incluyendo mares cerrados y semi-cerrados y áreas costeras, así como su protección, uso racional y desarrollo de sus recursos vivos, clasificadas en 7 programas, a saber:

1. Manejo costero integrado y desarrollo sustentable de las zonas costeras y zonas marinas;
2. Protección del medio marino;
3. Uso/aprovechamiento sustentable y conservación de los recursos marinos vivos en alta mar;
4. Uso/aprovechamiento sustentable y conservación de los recursos marinos bajo jurisdicción nacional;

5. Tomar en consideración las incertidumbres en el manejo del ambiente marino con respecto al cambio climático mundial;
6. Fortalecimiento de la cooperación internacional y de la cooperación y coordinación regionales;
7. Desarrollo sustentable en las islas pequeñas.

A la fecha, prácticamente todas las líneas de acción propuestas en el Capítulo 17 de agenda 21 continúan vigentes y representan un desafío para los países el poder llevarlas a la práctica mediante esquemas de políticas nacionales eficaces y eficientes que hagan factible su implementación efectiva.

En leyes y estrategias relacionadas con ZMC

En materia de manejo costero integrado y desarrollo sustentable de las zonas costeras y zonas marinas. Del análisis de diversas leyes y estrategias que se han desarrollado en el país se desprende la necesidad de que la legislación establezca:

- a) Una Política Nacional de Sustentabilidad de Mares y Costas de México (CIMARES, 2012).
- b) Un marco programático y administrativo que se base en un enfoque integrado, sustentable y de largo plazo para el manejo de la zona costera (Azuz, 2002). Para ello se requiere que la ley prevea:
 - El establecimiento de una Estrategia Nacional de Sustentabilidad de Mares y Costas que promueva una planeación de largo plazo basada en objetivos y resultados, así como programas intersectoriales federales, estatales y municipales orientados a objetivos comunes previstos en la estrategia nacional que cuenten con ordenamientos territoriales basados en escenarios de uso y destino.
 - Crear el Servicio Nacional de Mares y Costas mediante el desarrollo institucional de un esquema de gestión intersectorial e intersecretarial a nivel federal, estatal y municipal en materia de desarrollo marino-costero. Se trata de un esquema que promueva la concurrencia mediante acciones coordinadas en el sector público (CONANP, 2014; CIMARES, 2012).

- Los espacios, mecanismos, instrumentos y procedimientos que promuevan la participación ciudadana efectiva en la implementación de políticas y particularmente la formación de alianzas estratégicas (Azuz, 2002) donde participen de manera organizada y de manera activa los sectores social y privado, las organizaciones civiles y los organismos de cooperación internacionales.
 - Establecer foros apropiados y mecanismos para la resolución alternativa de conflictos relacionados con la conservación, uso y aprovechamiento de la ZMC.
 - Asignación de recursos públicos de manera suficiente, oportuna y continua (*e.g.* programa especial con fondos asignados por sector) para la implementación efectiva de acciones previstas en la Estrategia Nacional de Sustentabilidad de Mares y Costas, así como las estrategias y programas sectoriales.
 - El desarrollo de un Sistema Nacional de Información sobre Mares y Costas.
 - El desarrollo de un Sistema Nacional de Control y Vigilancia de Mares y Costas, que incluya mecanismos e instrumentos de vigilancia, monitoreo, seguimiento y evaluación del impacto de la política y desempeño del Servicio Nacional de Mares y Costas.
- El establecimiento de Áreas Naturales Protegidas.
 - La conservación de especies prioritarias.
- b) La Protección del medio marino mediante instrumentos de:
- Prevención y control de la contaminación marino-costera. En particular aquella proveniente de contaminación por hidrocarburos, especies invasoras y aguas de lastre (CONABIO, 2010).
 - Prevención y mitigación efectiva de impactos ambientales y socio-culturales generados por actividades humanas (infraestructura de comunicación terrestre y marina; desarrollo urbano y turístico).
- c) El uso y aprovechamiento sustentable de recursos naturales existentes en ZMC. Para ello se requiere:
- Adecuar la legislación en materia de pesca uso y aprovechamiento de recursos naturales (*e.g.* Ley General de Pesca y Acuicultura; Ley General de Turismo, de tal forma que incorporen criterios de sustentabilidad).
 - Adecuar las normas oficiales mexicanas de tal forma que respondan a criterios de sustentabilidad y competitividad.
 - Contar con Ordenamientos Territoriales Marinos que cuenten con bitácoras que permitan dar seguimiento a indicadores relevantes de sustentabilidad económica, social y ambiental.

En materia de conservación de la biodiversidad y aprovechamiento sustentable de recursos naturales.

Del análisis de diversas estrategias que se han desarrollado en el país, así como de la legislación en materia ambiental se desprende la necesidad de que la legislación establezca mecanismos e instrumentos de política que favorezcan:

- a) La conservación de ecosistemas prioritarios como: manglares y humedales (CONANP, 2014); playas y dunas; lagunas y estuarios; pastos marinos; algas marinas; arrecifes; ecosistemas pelágicos; mar profundo y ecosistemas insulares (TNC y WWF, 2008). Para ello se requiere que la legislación establezca instrumentos efectivos para:
- El establecimiento de sistemas y corredores eco regionales en sitios y regiones marinas y terrestres de conservación prioritarios (TNC y WWF, 2008).
- d) La adaptación al cambio climático (CONANP, 2015).
- e) Instrumentos, mecanismos y procedimientos de participación social efectiva en la toma de decisiones y acciones que se requieran para hacer un manejo, uso y aprovechamiento sustentable de las ZMC y recursos marino costeros.
- f) La investigación y la generación de información científica y de nuevas tecnologías que permitan hacer la conservación y uso sustentable de las ZMC, así como de bienes y servicios ambientales comprendidos en ellas.
- g) El desarrollo de bases de información que contribuyan a consolidar un Sistema Nacional de

Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN) de conformidad con lo previsto en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

En materia de cambio climático. Del análisis de la Ley General de Cambio Climático y diversas leyes relacionadas, así como de la Estrategia Nacional de Cambio Climático (SEMARNAT, 2013) y el Programa Especial de Cambio Climático (Presidencia de la República, 2014) se concluye que es necesario actualizar las leyes y normatividad aplicable para hacer desarrollar e implementar de manera efectiva las siguientes estrategias:

- Estrategia de Adaptación al Cambio Climático en materia de Pesca y Acuicultura.
- Estrategia de Adaptación al Cambio Climático en materia de Infraestructura en ZMC. Esta estrategia deberá comprender infraestructura de comunicaciones, hidráulica, energética, urbana y turística.
- Estrategia de Adaptación al Cambio Climático en Regiones Prioritarias para la Conservación de la Biodiversidad (CONANP, 2015).

En materia de uso y aprovechamiento de bienes del dominio público. Se requiere homologar criterios existentes en la legislación aplicable a la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT) a fin de armonizarlos y hacerlos consistentes con el concepto de desarrollo integral y sustentable previsto en el artículo 25 de la Constitución Política Mexicana. Se deben prever lineamientos y criterios obligatorios para hacer una buena administración y manejo de los bienes del dominio público, ya que de la buena administración de dichos bienes depende el futuro económico y ambiental de nuestro país (Ramos, 2011). Entre los aspectos relevantes que deben ser considerados figuran:

- a) Desarrollo de un concepto integral de la ZOFEMAT como parte de la ZMC (Ramos, 2011). Lo anterior implica tener una visión integral de ZMC que refleje la realidad biológica y geográfica de los ambientes costeros (naturales y construidos).
- b) Enfoque ecosistémico de las ZMC que considere el valor de la conservación de bienes y servicios

ambientales fundamentales para el desarrollo presente y futuro del país. En consecuencia, deben preverse limitaciones y modalidades a las concesiones y permisos sobre la ZOFEMAT que consideren la conservación de la biodiversidad y su uso sustentable.

- c) Medidas apropiadas de localización y construcción de infraestructura para comunicaciones (carreteras, portuaria-marinas y cruceros, etc.); asentamientos humanos; desarrollo turístico y generación de energía; agua y saneamiento. Para ello se deberán generar normas oficiales mexicanas que establezcan especificaciones para su instalación en la ZOFEMAT y áreas de influencia (e.g. Proyecto de Norma Oficial Mexicana Plantas Desalinizadoras-Requisitos para la instalación, toma de agua, uso del agua tratada y vertido de salmueras) o en su caso normas voluntarias (e.g. Proyecto de NMX Requisitos, especificaciones y criterios de desempeño sustentable, en el diseño, selección del sitio, construcción y operación que se realicen en los desarrollos inmobiliarios turísticos que se ubiquen en el Golfo de California).
- d) Una definición clara de derechos de los usuarios de la ZFMT a fin de garantizar certidumbre jurídica (Ramos, 2011).
- e) Congruencia entre las reglas de apropiación (tiempo, lugar, tecnología y/o cantidad de recurso) y las acciones locales, así como reglas de aportación de trabajo, materiales y/o dinero (Ramos, 2011).
- f) Establecimiento de mecanismos de participación ciudadana para otorgar o no una concesión de ZOFEMAT (Ramos, 2011).
- g) Establecimiento de mecanismos alternativos de resolución de conflictos, con el fin de que se atiendan problemas que requieren de una resolución rápida o especializada (Ramos, 2011).
- h) Establecimiento de sanciones graduadas en casos de incumplimiento.

Iniciativa de Ley General para la Gestión Integral y Sustentable de Mares y Costas

Por último, cabe destacar la reciente iniciativa presentada en abril de 2015 por el Senado de la República. Esta iniciativa de ley ofrece, de ser

aprobada, la oportunidad de contar con una ley marco que establezca las bases de coordinación para el manejo integral y sustentable de la zona costera y que tenga como objetivos, entre otros: la garantía de los derechos de los habitantes, visitantes, inversionistas, en las zonas costeras; el aprovechamiento sustentable y estratégico de las costas; la defensa de sus recursos naturales; la protección del ambiente y ecosistemas costeros; la prevención y atención de desastres y de riesgos y la coordinación de las diferentes instancias gubernamentales (Carmona, 2013).

Esta iniciativa también ofrece la posibilidad de que se reconozca la zona costera como una unidad de gestión, determinada a partir de criterios como el de capacidad de carga y resiliencia, así como de que se establezcan nuevos instrumentos de política para la gestión integrada y sustentable de mares y costas.

CONCLUSIONES

A fin de fortalecer y promover el desarrollo de una legislación más moderna que obedezca al mandato constitucional previsto en el artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos es necesario considerar lo siguiente:

- La identificación de los vacíos e insuficiencias del marco legal vigente, los cuales obedecen principalmente a que las diferentes leyes han ido cambiando a través del tiempo atendiendo a diferentes criterios y enfoques.
- El análisis de los diferentes lineamientos de acción que han sido reconocidos a nivel internacional y nacional como enfoques viables de regulación para el manejo integrado y sustentable de mares y costas. En particular, los lineamientos establecidos en el Capítulo 17 de la Agenda 21, aprobado en Río de Janeiro en 1992; los criterios de la Política Nacional de Mares y Costas de México, en sinergia con otras estrategias nacionales; y, por último, las disposiciones de la iniciativa de Ley General para la Gestión Integral y Sustentable de Mares y Costas.

Del análisis de las leyes, estrategias y programas aquí analizados es posible identificar los siguientes elementos que son fundamentales para el desarrollo de la legislación de mares y costas:

- Debe establecer nuevos principios y criterios económicos, sociales, ambientales y culturales de política que aseguren un manejo integral y sustentable de la zona-marino costera y los elementos que comprende.
- Debe establecer un esquema gestión intersectorial e intersecretarial que asegure la concurrencia y coordinación entre las diferentes dependencias y órganos descentralizados y desconcentrados que tienen competencia en la administración de las zonas marino-costeras del país.
- Debe establecer una estrategia que asegure una gestión de mediano y largo plazo, así como criterios y lineamientos generales para la formulación de los instrumentos de planeación en la materia, como son: programas especiales, regionales y sectoriales, de tal forma que se garantice que estos estarán alineados a los objetivos generales de la estrategia nacional. Igualmente deben establecerse las bases para el establecimiento de metas y resultados por sector, de tal forma que se garanticen avances con base a una gestión por resultados.
- Deben establecerse los instrumentos de la política (ordenamientos territoriales, concesiones, autorizaciones y permisos, normas oficiales mexicanas y normas voluntarias e instrumentos económicos) y lineamientos para su formulación, implementación, monitoreo y evaluación adecuadas a la situación actual y en concordancia inter e intrasectorial.
- Deben establecerse sanciones por incumplimiento con montos que desincentiven a los posibles infractores.
- Deben preverse mecanismos alternativos de resolución de controversias a fin de hacer más expedita y eficaz la resolución de conflictos por uso y aprovechamiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre.

De considerarse estos elementos en la formulación de la nueva legislación en materia de mares y costas es plausible afirmar que se podrá aspirar a un desarrollo integral y sustentable en los términos que establece nuestra constitución política nacional.

LITERATURA CITADA

- Azuz, A. I. y E. Rivera A. 2002. Resultados del seminario/taller: la Sustentabilidad Costera. México, D. F.
- BANCO MUNDIAL. 2015. The logframe handbook. A logical framework approach to project cycle management. The World Bank. Washington, D. C., USA.
- Brañes, R. 2004. La fundación del derecho ambiental en América Latina. México, D. F. 198 p. Disponible en: <http://www.pnuma.org/gobernanza/cd/Biblioteca/Derecho%20ambiental/19%20La%20fundaci%F3n%20del%20derecho%20ambiental%20en%20Am%20E9rica%20Latina.pdf>.
- Brañes, B. R. 2001. Informe sobre el desarrollo del derecho ambiental latinoamericano. Su aplicación después de diez años de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). México, D. F. 114 p.
- Carmona, L. M. C. 2013. ¿Por qué requerimos de una ley general para el desarrollo sustentable de las costas mexicanas? Revista Derecho Ambiental y Ecología. CEJA. Año 9, Número 54. México.
- CIMARES. 2012. Política nacional de mares y costas de México. México, D. F.
- CONABIO. 2010. Estrategia nacional sobre especies invasoras en México. México, D. F.
- CONANP. 2014. Estrategia hacia 2040. México, D. F.
- CONANP. 2015. Estrategia de cambio climático desde las áreas naturales protegidas. Una convocatoria para la resiliencia de México 2015-2020. México, D. F.
- PNUD. 1992. Declaración de Río sobre el medio ambiente y el desarrollo. Río de Janeiro, Brasil.
- Presidencia de la República. 2014. Programa especial de cambio climático 2014-2018. México, D. F.
- Ramos, C. Q. 2011. La ZOFEMATAC: una ficción legal. Revista de Derecho Ambiental y Ecología. CEJA. 3(44).
- SEMARNAT. 2013. Estrategia nacional de cambio climático. (ENCC). México, D. F.
- SEMARNAT. 2011. Evaluación de instrumentos normativos del sector ambiental. México, D. F.
- TNC y WWF. 2008. Evaluación ecorregional del arrecife mesoamericano. Plan de Conservación Marina. México, D. F.
- UNAM. 2015. Reporte mexicano de cambio climático. Grupo II Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación. México, D. F.

PMC
Programa Mexicano del Carbono