

Capítulo 4

ACIDIFICACIÓN DE LOS MARES MEXICANOS

Coordinador

J. Martín Hernández-Ayón¹

Colaboradores

**Cecilia Chapa-Balcorta³, Norma Oliva-Mendez¹, Ramón Sosa-Ávalos⁴,
T. Leticia Espinosa-Carreón⁴, Margarita Caso⁹, Ma. Carmen Ávila-Lopez¹,
Carlos Orión Norzagaray-López¹, Rodrigo Beas², J. Rubén Lara-Lara⁶,
Amilcar Cupul-Magaña⁷, Alma Paola Rodríguez-Troncoso⁷, Ana Franco Nobela²,
Gabriela Cervantes-Díaz² y Andrés López-Pérez⁸**

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

²Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

³Universidad del Mar, Puerto Ángel, Oaxaca, México.

⁴Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, *Campus* El Naranjo, Universidad de Colima, Manzanillo, Colima, México.

⁵Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa, Instituto Politécnico Nacional, Guasave, Sinaloa, México.

⁶Departamento de Oceanografía Biológica, CICESE, Ensenada, Baja California, México.

⁷Universidad de Guadalajara, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

⁸Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México.

⁹Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Ciudad de México, México.

INTRODUCCIÓN

El problema de la acidificación del océano forma parte de la agenda científica nacional del país y atiende los compromisos nacionales e internacionales de México como parte de la Estrategia Nacional de Cambio Climático y los compromisos contraídos por 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 (disminución del pH; ver Caja 1), la productividad marina, el incremento de zonas del mínimo de oxígeno, efectos en la distribución de recursos biológicos y que, a su vez, afectarán el intercambio de CO₂ entre la atmósfera y el océano.

El océano actúa regulando el clima de la Tierra mediante un continuo intercambio de calor y gases de efecto invernadero con la atmósfera. Debido al incremento de los aportes de CO₂ atmosférico por el aumento de emisiones antropogénicas a partir de la

revolución industrial (IPCC, 2007), el ciclo del carbono se ha visto desbalanceado a escala global, adquiriendo el océano un papel importante como regulador en las variaciones del CO₂ antropogénico. El impacto del CO₂ antropogénico en el cambio climático global depende, entre otras cosas, de la capacidad del océano y los ecosistemas costeros para absorber y secuestrar el CO₂. La captura del CO₂ atmosférico por parte de los océanos, se encuentra mediada principalmente por la bomba biológica y la circulación oceánica (bomba física o de solubilidad) (Broecker y Peng, 1992). Estos mecanismos hacen que el intercambio de CO₂ con la atmósfera a lo largo del océano y los ecosistemas costeros, no sea de manera uniforme, por lo que existe gran variabilidad espacial y temporal. Por tanto, la variabilidad intrínseca de los sistemas litorales requiere de una amplia base de datos que permita establecer cuáles son los principales factores que modelan el ciclo en estas zonas, con la finalidad de entender el comportamiento del sistema de CO₂ y sus efectos en el océano global y sus ecosistemas costeros.



LA ACIDIFICACIÓN DEL OCEANO

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 (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 entra en contacto con el agua de mar, reacciona para formar ácido carbónico (CO₂ + H₂O ↔ H₂CO₃) y, cuando el CO₂ antropogénico es absorbido por el agua de mar, el pH disminuye y a este proceso se le conoce como *acidificación de los océanos* (Caldeira y Wickett, 2003

Caja 1. Acidificación del Océano

El CO₂ atmosférico reacciona con el agua para formar ácido carbónico cuando se disuelve en el océano (CO₂ + H₂O ↔ H₂CO₃) y cuando el CO₂ antropogénico es absorbido por el agua de mar, el pH disminuye y este proceso es conocido como *acidificación de los océanos* (Caldeira y Wickett, 2003). Se ha reportado que la absorción continua de CO₂ antropogénico por las aguas superficiales de los océanos, las han vuelto paulatinamente corrosivas para estructuras de exoesqueletos de carbonato de calcio de organismos marinos. El término *corrosivo*, se refiere a la disminución del pH en el océano, lo cual puede disolver estructuras carbonatadas, proceso que ocurre ampliamente a grandes profundidades en los océanos, principalmente debido a la presión y bajo pH; esas condiciones disminuyen el estado de saturación del agua de mar con respecto a alguna forma mineral del carbonato de calcio (aragonita, calcita, calcita magnesiana), indicador relacionado con la facilidad para que se precipiten estos minerales (Broecker y Peng, 1992; Smith, 2013).

El ácido carbónico consume iones de carbonato (CO₃²⁻), ya sea por reacción directa (H₂CO₃ + CO₃²⁻ ↔ 2HCO₃⁻) o a través de la liberación de protones. La saturación de carbonato de calcio, como Omega calcita (Ω_{calc}) y Omega aragonita (Ω_{arag}), es función de la concentración de CO₃²⁻, calcio (Ca²⁺) y la temperatura mediante el producto de solubilidad, el cual es dependiente de la presión, K_{ps}* (Ω = [Ca²⁺] [CO₃²⁻] / K_{ps}*) (Mucci, 1983). Dado que el calcio es 28 veces más abundante que el carbonato en el agua de mar, los estados de saturación de aragonita y calcita responden directamente a los cambios de la disponibilidad del ión CO₃²⁻, de modo que, si el océano absorbe más CO₂, al disminuir el pH, el Ω_{arag} y Ω_{calc} también disminuirán (ver Caja 2). También, los valores de Ω = 1, indican que los minerales de carbonato están saturados; por un

lado, cuando el Ω > 1, favorece las condiciones para que ocurra el proceso de precipitación o la preservación de minerales de carbonato. Mientras que cuando el Ω < 1, 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 CO₂ antropogénico; 2) el incremento de CO₂ en zonas costeras producto de procesos naturales de respiración y 3) el aporte de agua subsuperficial con alto contenido de CO₂ debido a los procesos de surgencias costeras.

Caja 2. Acidificación del Océano



El Estado de Saturación

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

$$\Omega_{\text{calcita}} = [\text{Ca}^{+2}] [\text{CO}_3^{-2}] / K_{ps \text{ cal}}$$

$\Omega \gg 1$ Organismos pueden construir "mas fácilmente" su concha

$\Omega > 1$ Organismos pueden construir concha

$\Omega < 1$ Las conchas "se disuelven"

Concha de Ostiones adultos
—Formado de Calcita—Difícil disolverse



Concha de larvas de Ostión
—Formado de Aragonita—Fácil de disolverse



Figura C2.1. 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.

Crédito de las imágenes de ostión: L. Degremont, IFREMER y Huitre creuse.

Partiendo del inicio de la era industrial hasta el presente, el pH de las aguas superficiales del océano ha disminuido 0.1 unidades, 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 año 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 los hábitats de importantes pesquerías y de diversas comunidades en las próximas décadas (Feely *et al.*, 2004; Orr *et al.*, 2005). En el 2007 se reportó, por vez primera, la presencia de aguas corrosivas en la plataforma continental desde Canadá, hasta Baja California, México (ver Caja 3). En dicho estudio, se observó la presencia de aguas corrosivas sobre la plataforma continental entre 40-120 m durante eventos de surgencia.

Caja 3. Primera Evidencia de la presencia de *aguas corrosivas* sobre la plataforma continental desde Canadá hasta Baja California México



North American Carbon Program

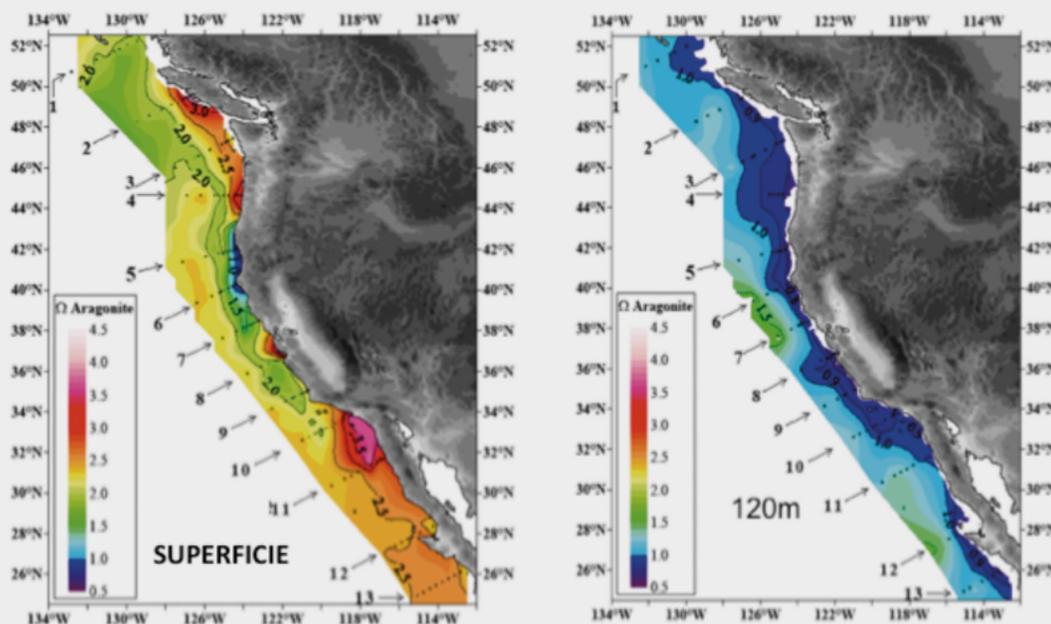


Figura C3.1. Distribución espacial de la profundidad (m) del agua corrosiva con valor de $\text{pH}=7.6$ a lo largo de la plataforma continental de las costas de Norte América. Observar los valores bajos a menor profundidad cerca de las costas. El término “corrosivo” para referirse a los efectos de las condiciones de 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 (Feely *et al.*, 2008).

ACIDIFICACIÓN DEL OCEANO EN LAS COSTAS DE BAJA CALIFORNIA

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 Norte Oriental, producto del transporte por surgencias. Los valores de pH bajos 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 que dichos valores fueron la primera evidencia de la presencia de aguas corrosivas no solo en Canadá y EUA, sino también en costas mexicanas (ver Caja 3). En el caso particular de Baja California, el agua subsaturada se observó entre 50 y 70 m durante un crucero oceanográfico realizado en

junio del 2007 durante eventos de surgencia (Figura 1). Este resultado no fue una buena noticia, dado que esta condición se pronosticaba que ocurriría hasta dentro de 50 años (Feely *et al.*, 2008). Sin embargo, es importante mencionar que se desconoce el impacto que estas aguas pudieran causar en organismos que forman estructuras carbonatadas en las costas de Baja California. El origen de aguas corrosivas, se explica debido al efecto de la absorción del CO_2 de origen antropogénico y/o, aunado al incremento de CO_2 en el agua que ocurre durante los procesos naturales de respiración de la materia orgánica. Se ha reportado que la absorción continua de CO_2 antropogénico por las aguas superficiales de los océanos, las han vuelto paulatinamente corrosivas para estructuras de exoesqueletos de carbonato de calcio de organismos marinos.

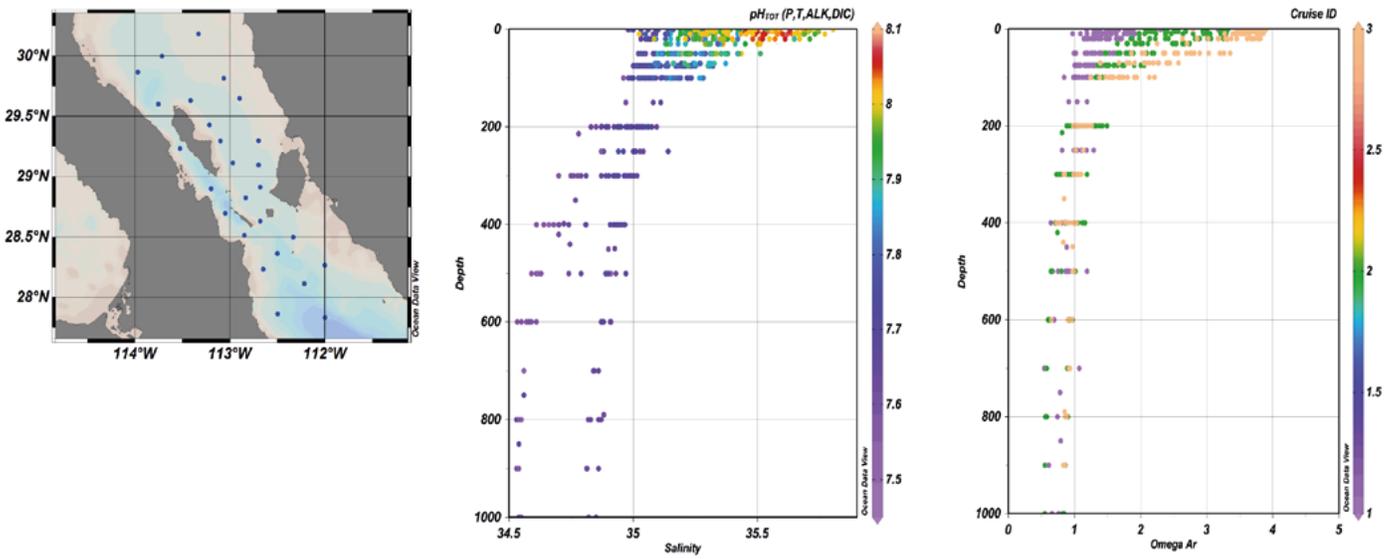


Figura 1. Distribución vertical del Omega Aragonita a lo largo de las costas de Baja California. Se puede observar que el agua corrosiva varió entre ~50 a 70 m sobre la plataforma continental.

GOLFO DE CALIFORNIA: REGIÓN DE LOS UMBRALES

Las áreas que se comportan como fuentes de CO₂ están asociadas a zonas de surgencias o zonas de alta mezcla. Este último es el caso de la Región de las Grandes Islas (RGI) en el Golfo de California (GC), por lo cual dicha zona ha sido considerada como una fuente potencial de CO₂ hacia la atmósfera (Zirino *et al.*, 1997; Hidalgo-González *et al.*, 1997). Sin embargo, los estudios referentes al sistema del CO₂ en el GC son escasos. En la RGI existe no solo un transporte de carbono, sino que también de nutrientes y metales del fondo hacia la superficie (Gaxiola-Castro *et al.*, 1978; Torres-Delgado *et al.*, 2013; Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001). Este aporte de nutrientes es constante y es modulado quincenalmente por las mareas (Hidalgo-González *et al.*, 1997), pero adicionalmente existe un efecto combinado de las corrientes de marea y la batimetría, principalmente entre los estrechos de las islas y los umbrales lo cual produce zonas frías visibles claramente en imágenes de satélite (Santamaria-del Angel *et al.*, 1994).

Un estudio de las fracciones de masa en tres estaciones en verano de la RGI concluyó que en un 80% la distribución CID podría ser explicado

mediante mezcla vertical y por tanto que los procesos físicos en la RGI tienen un papel muy importante en el control y distribución de las concentraciones de las variables físicas y químicas (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001; Hernández-Ayón *et al.*, 2013). En un estudio detallado realizado en el 2002, 2003 y 2004 de las variables químicas del carbono se encontró que el Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) es la principal fuente de CID (carbono inorgánico disuelto) a la capa superficial (Figura 2). Se encontró que en invierno la ASsSt al traspasar la región de los umbrales y mezclarse con el AGC (agua del Golfo de California) en el Canal de Ballenas y modifica sus características físico-químicas a profundidades superiores a los 400 m resultando en una disminución de pH ~7.7 y Ω_{arag} con valores cercanos a 1, pero hacia la época más cálida el volumen del agua del Golfo de California se incrementa y va limitando el transporte de agua subsuperficial rica en CO₂ del ASsSt y nutrientes hacia la superficie hacia el verano. Se registraron valores de pH fluctuando de 7.75 a 7.95, pCO₂ (presión parcial de CO₂) de 600 a 900 μatm y CID ~2160 a 2225 μmol kg⁻¹. En general, las aguas superficiales de la RGI se encontraron saturadas con CO₂, indicando que la región de los Umbrales se comportó como una fuente de CO₂ hacia la atmósfera principalmente en condiciones de invierno.

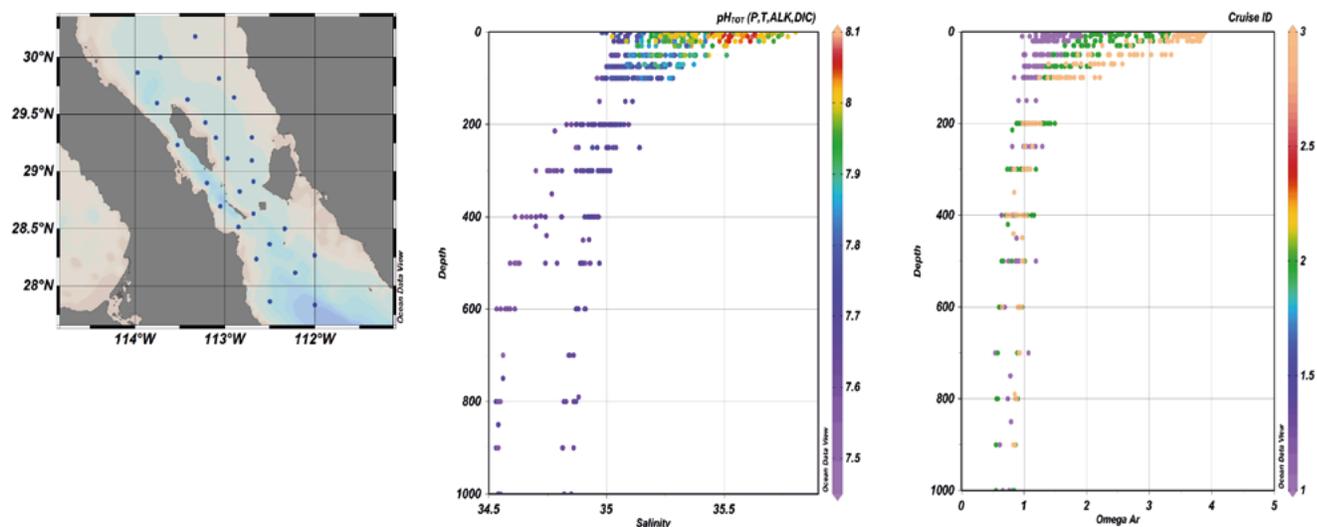


Figura 2. Perfiles verticales de salinidad con pH (Escala protones totales) y de Omega Aragonita en la región de los Umbrales del Golfo de California.

Panel izquierdo se muestra las estaciones donde se realizaron los muestreos durante los cruceros en marzo 2002, mayo del 2003 y septiembre del 2004. El panel de la derecha muestra el perfil de omega aragonita separado en los diferentes muestreos (Morado = Marzo, Verde = Mayo y Naranja= Septiembre). En el perfil del panel intermedio se presentan los perfiles de salinidad con pH. Los datos con salinidades menores a 35 unidades denotan la presencia de la masa de Agua SubSuperficial Subtropical (ASsSt) la cual tiene un pH menor a 7.8 y que domino su presencia en el muestreo de marzo. Hacia el verano los primeros 300 m se hacen mas salinos por la formación de la masa de Agua Superficial del Golfo de California (salinidades > 35). La variación estacional va de invierno a verano respectivamente. En el perfil del omega aragonita se puede observar que el agua corrosiva estuvo presente en marzo en la superficie. Superficialmente se observo una variación estacional con valores de omega aragonita mayores hacia el verano (El pH igualmente incrementa en el verano).

PACÍFICO TROPICAL DE LAS COSTAS DE MÉXICO: PRESENCIA DE AGUA SOMERA SUBSATURADA EN OMEGA ARAGONITA Y BAJO OXÍGENO

La combinación de factores como la disminución en la oxigenación del agua, en conjunto con la acidificación del océano, ha suscitado mayor preocupación en el futuro de los recursos pesqueros.

En las costas mexicanas del Pacífico tropical se encuentra una de las zonas de mínimo de oxígeno (ZMO) más amplias en el mundo (Karstensen *et al.*, 2008; Stramma *et al.*, 2008; Keeling *et al.*, 2010; Stramma *et al.* 2012). Estas condiciones hipóxicas en la columna de agua se presentan por intensos procesos producción de materia orgánica en la zona fótica, misma que es remineralizada durante su descenso en la columna de agua, principalmente por la respiración óxica de grupos de bacterias heterótrofas (Ulloa *et al.*, 2012). En estas zonas, las condiciones hipóxicas se mantienen debido a una pobre ventilación, resultado de la fuerte estratificación (Karstensen *et al.*, 2008). Además, la concentración de oxígeno disuelto es factor importante para muchos procesos biogeoquímicos que ocurren

en la columna de agua, por ejemplo, concentraciones bajas de oxígeno promueven la especiación de ciertos elementos, controlando su disponibilidad para otros procesos, o bien, concentraciones bajas son un factor importante para algunas especies de macroorganismos (Stramma *et al.*, 2008; Vaquer-Sunyer y Duarte 2008; Keeling *et al.*, 2010; Stramma *et al.*, 2010). Los umbrales en la concentración del oxígeno para definir niveles de hipoxia son aún debatidos, sin embargo, cuando las concentraciones son subóxicas ($O_2 < 10 \mu\text{mol kg}^{-1}$) se consideran relevantes para algunos grupos de organismos (Paulmier *et al.*, 2008; Stramma *et al.*, 2008; Keeling *et al.*, 2010). Además, la intensa respiración de la materia orgánica en estas zonas también controla los ciclos de otros elementos (Fe, P, N, C); con respecto al ciclo del carbono, esta zona ha sido considerada como la zona máxima de carbono, con valores altos de carbono inorgánico disuelto y bajos de pH (Paulmier *et al.*, 2008).

En las costas mexicanas del Pacífico tropical, los primeros 150 m de la columna de agua convergen tres condiciones particulares (Prince y Goodyear 2006; Cepeda-Morales *et al.*, 2009; Franco *et al.*, 2014): 1) la ZMO localizada por debajo de una termoclina

somera, con una profundidad entre 70 a 110 m, y con variabilidad relacionada a procesos físicos ocurriendo a diferentes escalas espaciales (*i.e.*, surgencias costeras, advección, remolinos de mesoescala), 2) el máximo de carbono, y 3) el límite superior del agua subsuperficial subtropical, una masa de agua fría, rica en nutrientes y con alto contenido de carbono, la cual cubre todo el Pacífico Oriental, aproximadamente entre los 100 a 400 m de profundidad; esta misma agua es acarreada a la superficie durante las surgencias costeras. Con los datos de agosto del 2010 de Franco *et al.* (2014), se encontró que la isolínea del $\Omega_{\text{arag}} = 1$ siguió al contorno de 20 $\mu\text{mol/kg}$ tal como se muestra en el transecto 1 pero

cambia hacia el transecto 5 (Figura 3). Se encontró también que la profundidad de subsaturación de aragonita estaba estrechamente ligada a la base de la oxiclina con un incremento en los valores entre carbono inorgánico disuelto y alcalinidad total (CID/AT) y en los valores de la utilización aparente de oxígeno. Lo anterior sugiere que el incremento de CID podría deberse al proceso de remineralización de materia orgánica en la oxiclina el cual contribuye con el mantenimiento de las zonas de mínimo de oxígeno, y favorece que el horizonte de subsaturación de $\Omega_{\text{arag}} = 1$ se mantenga somero (Figura 3).

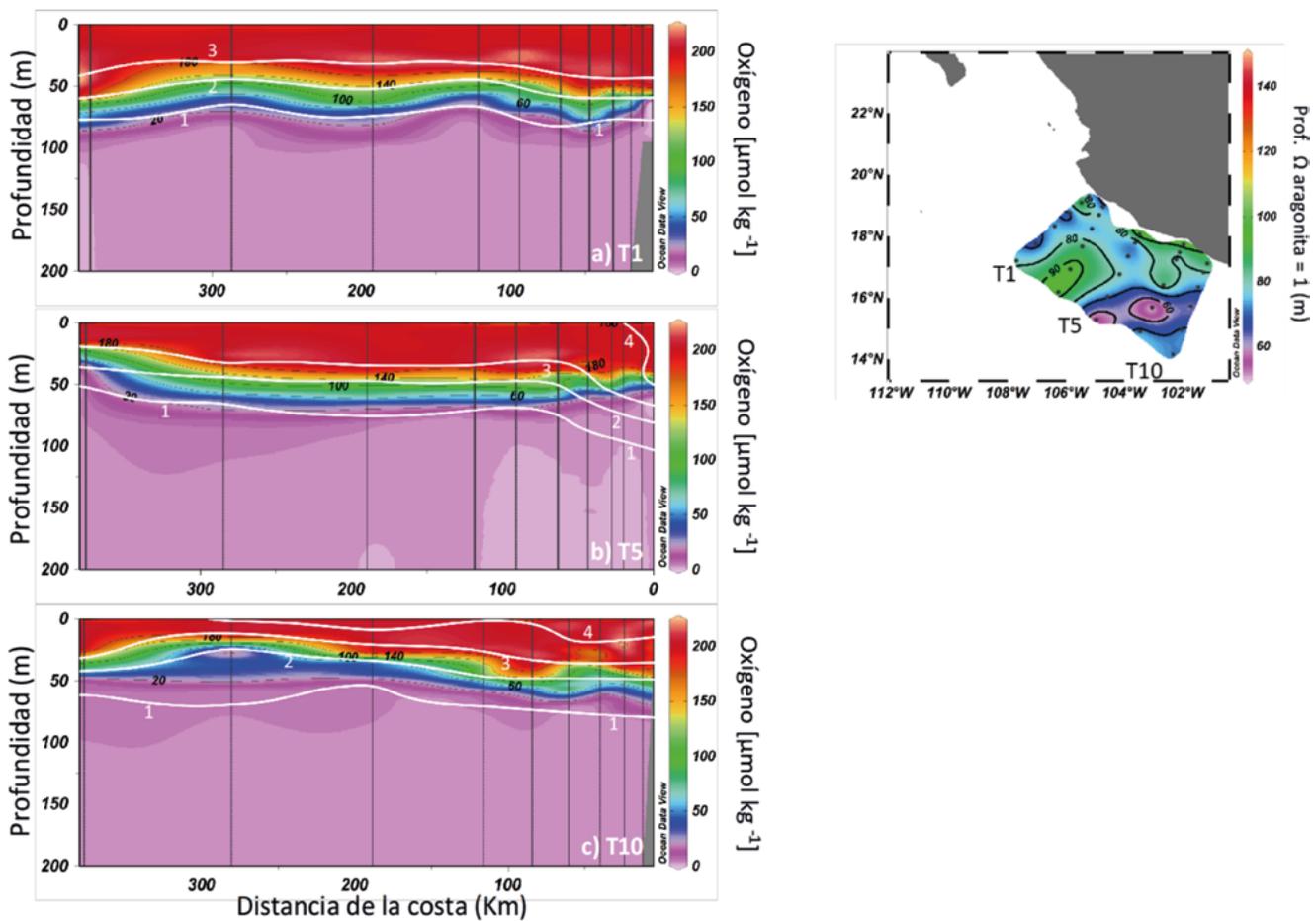


Figura 3. Distribución vertical del Omega Aragonita en transectos perpendiculares al sur de Cabo Corrientes (paneles a, b y c). En el mapa superior izquierdo, se muestra la profundidad del horizonte de saturación del omega aragonita (cuando omega es igual a 1). Se puede observar que el agua corrosiva varió entre ~50 a 80 m sobre la plataforma continental.



Estas condiciones oceanográficas influyen en los ecosistemas desarrollándose en la plataforma y en la zona costera, moldeando las condiciones bajo las cuales se desarrollan los ecosistemas pelágicos y benthicos (Prince y Goodyear 2006; Vaquer-Sunyer y Duarte 2008; Stramma *et al.*, 2010).

Las implicaciones biológicas de la ZMO a nivel de taxa es altamente variable, debido a que cada grupo ha desarrollado algún aspecto de su comportamiento y/o fisiología para soportar condiciones hipóxicas (Prince y Goodyear 2006; Vaquer-Sunyer y Duarte 2008). Algunos de estos grupos de macroorganismos son de importancia pesquera. Vaquer-Sunyer y Duarte (2008) reportaron una amplia variabilidad en la respuesta fisiológica entre taxa de organismos bentónicos (*i.e.* condición letal como función de concentración de O₂ y tiempo de exposición), siendo los grupos de crustáceos y peces los más sensibles, mientras que los moluscos son los más tolerantes. O bien, por ejemplo, el National Marine Fisheries Service de los Estados Unidos de América (EUA), ha reportado serios problemas en la pesquería del ostión en las costas de Washington y Oregon (<http://www.ecy.wa.gov/water/marine/oa/panel.html>). Se ha reportado que, por un lado, 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 especies. Esto, por tanto, tendría un impacto perjudicial tanto en la pesca como el turismo. Además, muchos de los organismos calcificadores que son parte del 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, se ha detectado que las zonas de baja concentración de oxígeno, pueden causar una compresión de los hábitats planctónicos (incluidos los de los huevos y larvas de peces) en la columna de agua sobre y bajo la capa del mínimo de oxígeno, observándose pérdidas de fauna debido a la hipoxia (Farber-Lorda *et al.*, 2010) y también debido a la restricción de la distribución vertical de los grupos del plancton, manteniéndolos en condiciones donde se puede presentar una disminución en la diversidad de especies y de la relación presa-depredador, lo que contribuye a la disminución de comunidades de

zooplancton y deja que el fitoplancton no consumido 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 en los ecosistemas. Estas condiciones oceanográficas también modifican el comportamiento de peces pelágicos mayores, definiendo el uso del hábitat en la columna de agua. Los peces pelágicos (*i.e.* marlín, pez vez, atún) son particularmente sensibles a las condiciones de hipoxia, debido a su elevada tasa metabólica (Brill, 1996). Para el caso de los peces vela y marlines, Prince y Goodyear (2006) reportaron que pasan más tiempo en zonas someras que en profundidad, lo cual sugiere que la temperatura y la concentración de oxígeno son factores que definen su distribución vertical. En el Pacífico Oriental Tropical, estas especies prefieren la capa de mezcla (encima de la termoclina), donde se presenta una mayor productividad primaria, promovida por la mayor disponibilidad de nutrientes y luz, y condiciones oxigenadas.

Los ambientes con poco oxígeno representan también retos fisiológicos para los organismos marinos. Se predice que las zonas mínimas de oxígeno aumentarán su volumen y área debido al cambio climático, como resultado del calentamiento de los océanos y al aumento de la estratificación (Bopp *et al.*, 2002; Matear y Hirst, 2003; Stramma *et al.*, 2008). El término *hipoxia* implica niveles de oxígeno bajos, en los cuales los organismos de la macrofauna se verán afectados. Los organismos responden de manera diferente a las concentraciones bajas de O₂ y sobre este tema existe una amplia gama de definiciones de umbrales de hipoxia en la literatura, desde valores menores a 8 µM (Paulmier y Ruiz-Pino, 2009) hasta 65 µM (Grantham *et al.*, 2004). En aguas de la plataforma continental dentro del Sistema de la Corriente de California (Figura 4), se han observado, desde el año 2000, condiciones que varían desde hipoxia (< 65 µM) hasta anoxia (0 µM), con un incremento aparente en la frecuencia y en la intensidad del déficit de oxígeno (Chan *et al.*, 2008; Hales *et al.*, 2006). La advección de masas de agua son un importante mecanismo que rige las condiciones costeras al sur de Punta Eugenia Baja California Sur y que contrastan con las condiciones al sur de la península (Figura 4).

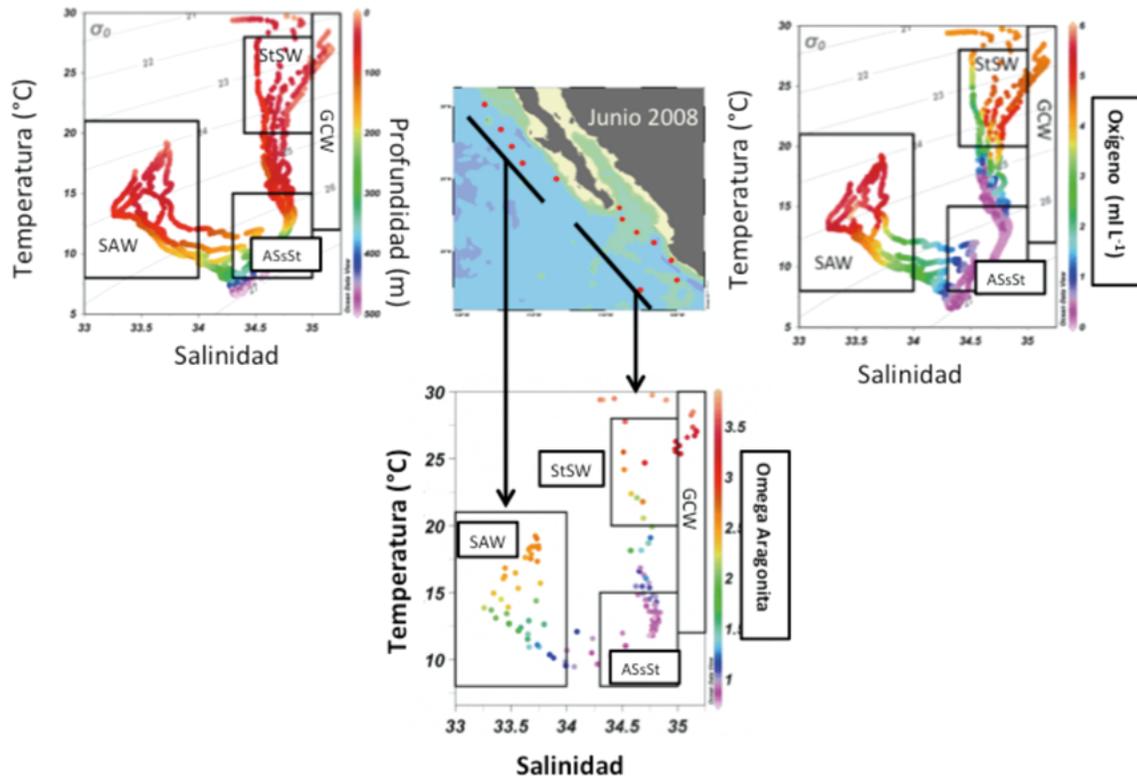


Figura 4. Los diagramas T-S ilustran las diferencias entre la distribución de masas de agua de las costas de Baja California y las de la región Subtropical. Además, muestran el contenido de aragonita (panel al centro), oxígeno (panel derecho) y la relación con la profundidad (panel izquierdo).

StSW: Agua superficial subtropical; GCW: Agua del Golfo; ESsW: Agua ecuatorial subsuperficial y SAW: Agua subártica. Notar valores de $<1 \text{ ml l}^{-1}$ (entre azul y morado) de ESsW se encuentran en aguas menores de 100 m en la región subtropical, pero en Baja se localizan hasta 200 m.

Fuente: Hernández-Ayón (2011).

Hay evidencia de que la ZMO del Pacífico tropical ha mantenido sus condiciones subóxicas en las últimas décadas y se ha ampliado su distribución en la columna de agua (Stramma *et al.*, 2008). Lo anterior concuerda con modelos climáticos que pronostican un decremento en la concentración del oxígeno disuelto en zona tropical, así como a una expansión de las ZMO debido a una mayor estratificación promovida por el calentamiento global, reduciendo el aporte de O_2 hacia el interior del océano (Keeling *et al.*, 2010). Por lo anterior, deben considerarse el efecto que tendría estos pronósticos de la ZMO a la par con cambio global y la acidificación (Portner y Farrell, 2008). El efecto del cambio climático ocasionado por las actividades antropogénicas, causará grandes cambios en la química del mar (disminución del pH), efectos en la productividad marina, el incremento de zonas del mínimo de oxígeno, efectos en la distribución de recursos biológicos, todo lo cual afectará el intercambio de CO_2 entre la atmósfera y el océano. Estas son parte de las preguntas fundamentales que es necesario responder.

REGION DE TEHUANTEPEC

Resulta un reto generar mediciones de las variables del sistema de CO_2 en el Golfo de Tehuantepec, ubicado en el Pacífico tropical mexicano. En el Golfo de Tehuantepec (GoT), los vientos intermitentes del norte, llamados *nortes* o *Tehuanos* (velocidades $> 10 \text{ m s}^{-1}$) resultan de los gradientes de presión entre el Golfo de México y el GoT de noviembre a marzo. Debido a la presencia de vientos del norte intensos, se han realizado pocos estudios oceanográficos in situ en esta región. Por lo tanto, el conocimiento actual sobre biogeoquímica del carbono en el GoT es escaso y no es sorprendente que hasta ahora no haya mucha información disponible sobre las condiciones de la química del carbono en las que viven los organismos calcificadores. Este capítulo proporciona la primera información cuantitativa sobre el sistema de CO_2 en el Golfo de Tehuantepec.

Normalmente, bajo la influencia de los tehuanos, la temperatura puede bajar hasta $8 \text{ }^\circ\text{C}$ en el centro

del GoT, formando una franja de agua fría de más de 400 km perpendicular a la costa y de más de 200 km de ancho (Figura 5). Una vez que finaliza la temporada de Tehuano, durante mayo-junio, el GoT se vuelve altamente estratificado, mostrando una fuerte pycnoclina, estructuras de mesoescala y olas atrapadas en la costa relacionadas con inestabilidades baroclínicas. Chapa-Balcorta *et al.* (2015) cuantificaron la concentración de carbono inorgánico disuelto (CID)

y pH (abril de 2013) en condiciones de post-Tehuano. La intensa estratificación vertical contribuyó a los procesos biogeoquímicos en aguas superficiales (<70 m). Sin embargo, en condiciones post-Tehuano, las concentraciones altas de pCO_2 ($\sim 1000 \mu atm$) y CID ($2200 \mu mol kg^{-1}$), así como los bajos valores de Ω_{Ar} de ~ 1.1 y el pH (~ 7.5) permanecen en las aguas superficiales durante unos días después de que los vientos Tehuanos se han debilitado.

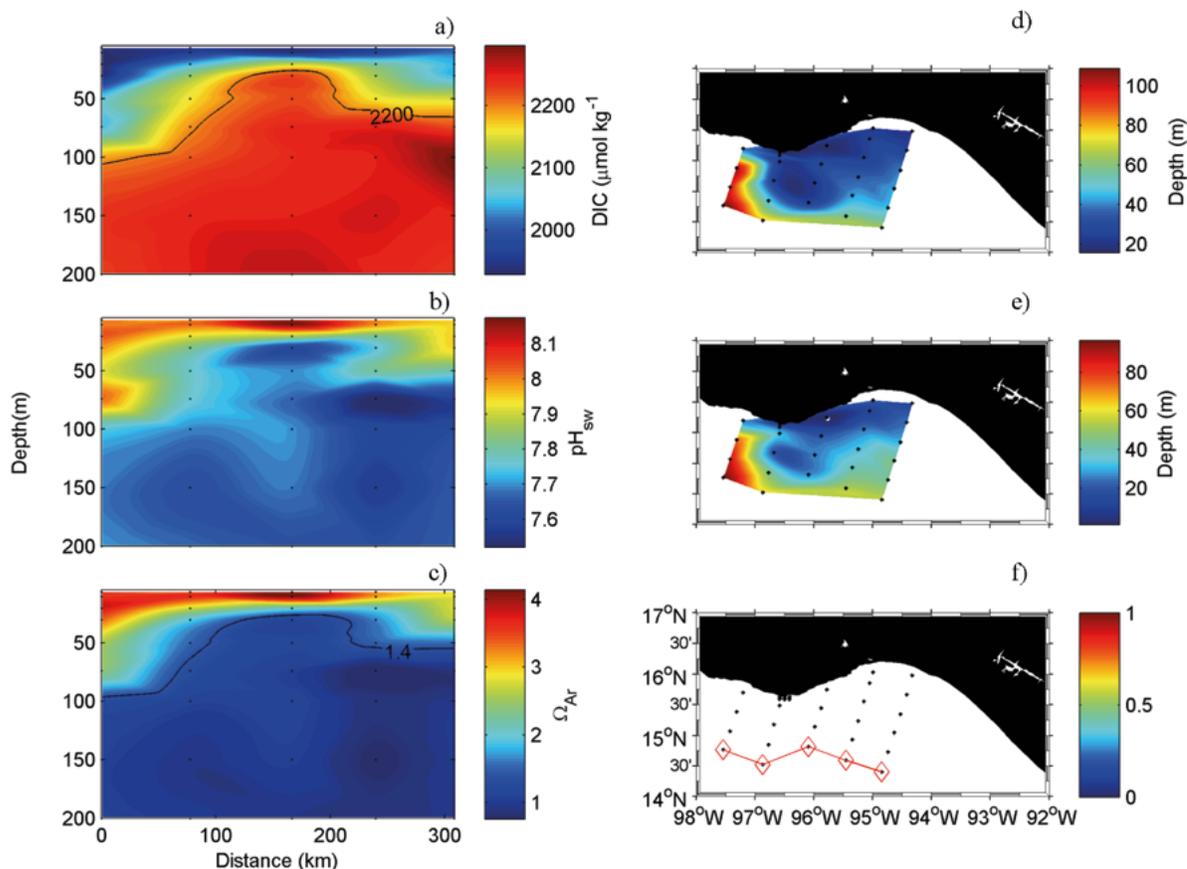


Figura 5. Distribución espacial de la química del carbono inorgánico en la región de Tehuantepec. Variación zonal de a) concentración de DIC, b) pH, y c) del omega aragonita en las estaciones más externas (f).

El eje x describe la distancia de oeste a este. d) Profundidad de la línea de contorno CID de $2200 \mu mol kg^{-1}$ y e) de la isolínea del omega aragonita ≤ 1.4 , y f) La ubicación de las estaciones mostradas en 9a a 9c.

Fuente: tomado de Chapa-Balcorta *et al.* (2015).

Desde el punto de vista ecológico, la presencia de arrecifes de coral en la región plantea varias preguntas: ¿cómo sobreviven los corales en tales condiciones? ¿Han desarrollado los organismos que viven en el GoT estrategias adaptativas para soportar estas condiciones? Si efectivamente se han adaptado, esta región podría servir como una ventana hacia el futuro bajo un escenario de acidificación oceánica, ya que muchos de los valores de pH reportados aquí son más bajos que los predichos en las regiones tropicales para el año

2100 (pH = 7.7). Para comprender estos procesos, se necesitan más estudios, que se centren en la variabilidad del sistema de carbonato en el GoT a diferentes escalas espaciales y temporales, así como estudios sobre la exposición de diversos organismos nativos del GoT a estas condiciones, con el fin de profundizar nuestra comprensión de cómo el pH y Ω_{Ar} influyen en las especies de construcción de arrecifes de coral y otros organismos calcificantes que habitan en los ecosistemas costeros del Golfo de Tehuantepec.

GOLFO DE MÉXICO: REGION DEL MAR PROFUNDO

El tema de la falta de información en las aguas del Golfo de México, ha sido tratado en distintos foros nacionales e internacionales, en programas como el Programa Mexicano del Carbono (PMC) (<http://pmcarbono.org/base/index.php>)” e internacionales como el North American Carbon Program (NACP) y CarboNA. Dichos programas señalaban la necesidad de estudiar la dinámica del carbono en el Golfo de México (GoM). El PMC por su parte, en su plan científico del 2008 (http://pmcarbono.org/pmc/documentos/plan_cientifico.php), señalaba al GoM como una de las zonas prioritarias a realizar estudios del carbono, esto a raíz de los grandes vacíos de información. Fue hasta el 2010 cuando el Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), delinearon una estrategia nacional y multi-institucional con dos objetivos principales: (1) establecer una línea de base de las características oceanográficas, geoquímicas y biológicas de las aguas territoriales mexicanas del Golfo de México, y (2) evaluar si existían evidencias de hidrocarburos provenientes del derrame de petróleo del pozo profundo asociado al trágico accidente de la plataforma Deepwater-Horizon ocurrido entre abril a julio del 2010 frente a las costas de Luisiana, USA (<https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos11-1/sesiones%20especiales/SE12%2031-1.pdf>).

En esta gran iniciativa, se incluyó el tema del sistema del CO₂ como parte del paquete variables a estudiar en el Golfo de México y se generó por primera vez información de las variables del carbono mediante tres cruceros denominados XIXIMI's. La información generada en los cruceros forma parte de la línea base de estudios en el Golfo de México.

Ante la ausencia de datos en el GoM de las variables del carbono, resultó de mucha utilidad usar los datos generados en el 1997 en el transecto de la línea A22 del programa Word Ocean Circulation Experiments (WOCE) con fines de comparación (Figura 6). Del transecto A22 se usaron los datos de la hidrografía y de las mediciones de CID como indicadores de las características físicas y químicas del agua representativa del *agua fuente* de entrada al GoM y permitió también compararlas con los datos del crucero XIXIMI realizado en Noviembre de 2010.

En el GoM los estudios publicados sobre la circulación de la zona, sugieren que el flujo neto hacia el interior del Caribe deriva de dos fuentes principales: la primera correspondiente a un 45% de agua que proviene del Atlántico sur con ~14 Sv y la segunda con agua superficial que entran al Caribe y que alimentan a la corriente de Florida del Atlántico Norte con un volumen aproximado de 17 Sv (Schmitz y Richardson, 1991). Por tanto, esta información sugiere que la química del agua que llega al interior del GoM proviene de masas de agua diferentes en su composición.

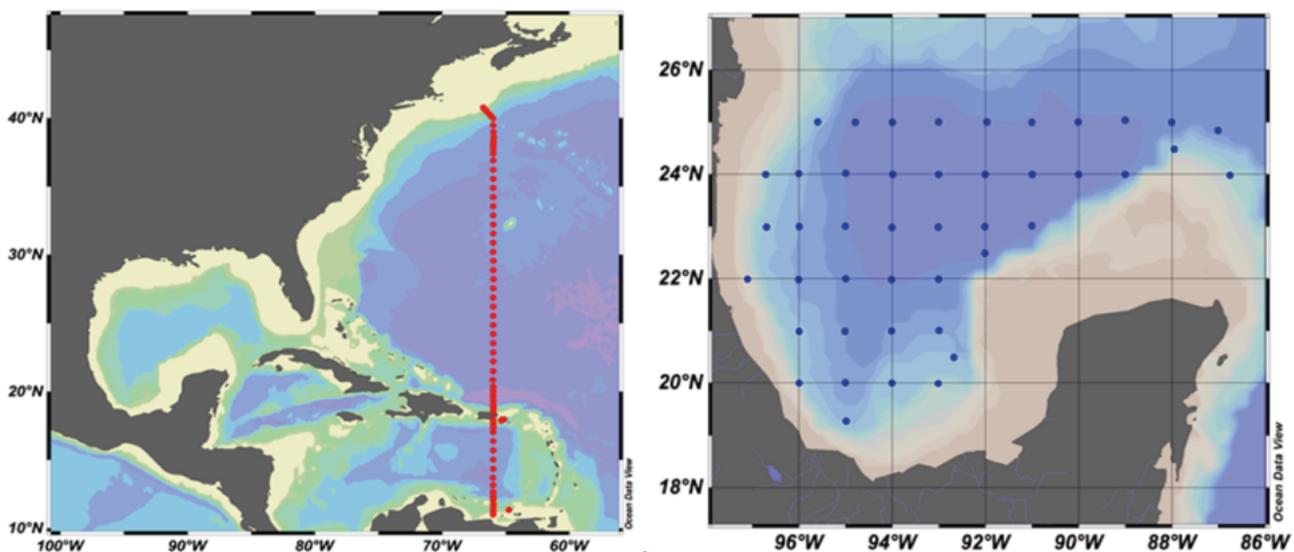


Figura 6. En el panel derecho el transecto de la línea A22 del programa WOCE realizado en 1997.

De estas estaciones se utilizó los datos generados de temperatura, salinidad y CID con fines de comparación. En el mapa del lado derecho se muestran las estaciones del programa XIXIMI-I.

De la comparación entre los perfiles de salinidad y temperatura de los datos del GoM y de WOCE, se encontró una similitud entre los perfiles generados entre las latitudes 10 a $\sim 20^{\circ}\text{N}$ (Figura 7). En la figura comparativa del perfil de salinidad (Figura 7), se resaltan cuatro aspectos principales observados de la estructura vertical señalados a lo largo del perfil: en la parte superficial marcado como (1), se observa la disminución de salinidad superficial de ~ 36.5 a ~ 35.2 ; en la región marcada como (2) señala la zona de máxima disminución de salinidad localizada entre 400 y 800 m en menos de 35 unidades y con una temperatura similar a la observada en aguas costeras del Caribe de entre 10

y 15°N ; en (3) se observan salinidades similares entre los 2000 y 3000 m; y en (4) se puede observar valores de salinidad ligeramente más altas en ~ 0.1 unidades, pero se sobreponen sobre los perfiles generados a los $\sim 20^{\circ}\text{N}$. Esto sugiere que la estructura de la columna vertical de temperatura y salinidad en el GoM, coincide con lo señalado por los autores en relación al origen de las fuentes de agua superficial y profundo del Caribe-Atlántico Sur y Atlántico Norte, respectivamente; pero, además, que estas no cambian de manera visible durante su trayecto. Con esto en consideración, se hizo el mismo ejercicio con los datos de CID como se muestra a continuación.

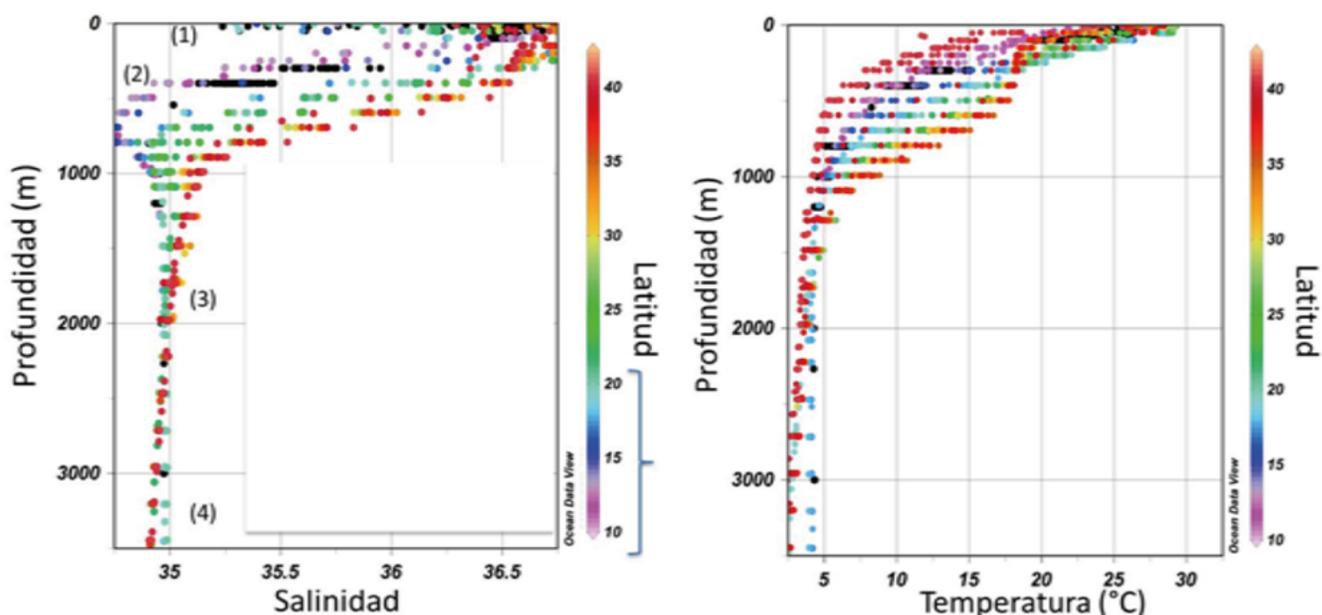


Figura 7. Perfiles comparativos de salinidad y temperatura.

Los datos en círculos negros corresponden a los datos del XIXIMI's y en color a los del WOCE (Los colores en datos del WOCE corresponden a diferentes latitudes). El corchete derecho en azul en el gráfico de salinidad enmarca las latitudes de 10 a 20°N del agua que se encontró como fuente y que fue la misma en el interior del GoM.

El resultado de la comparación entre el CID entre ambos muestreos fue similar al encontrado con salinidad y temperatura (Figura 8). Sin embargo, fueron más claras las diferencias en la estructura del perfil desde la superficie hasta los 3000 m. Por lo tanto, de esta comparación se resaltan varios aspectos:

1. Las concentraciones de los perfiles de CID de XIXIMI *versus* WOCE no fueron muy diferentes a pesar de la diferencia del tiempo de muestreo. En general, las mediciones del

XIXIMI se sobreponen a los perfiles de las mismas latitudes ya antes descritas del WOCE. Sin embargo, se observan ligeras diferencias con algunos valores ligeramente con mayores concentraciones de CID en las aguas intermedias entre 400 y 800 m y de manera opuesta con concentraciones ligeramente más bajas en las aguas profundas. Las causas en el primer caso pueden ser atribuidos a procesos de respiración y en el segundo a un resultado de advección.

2. La disminución en las aguas superficiales y aumento en aguas subsuperficiales en concentraciones de $2200 \mu\text{mol kg}^{-1}$ entre 400 y 800 m hasta $2050 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en la superficie. Esta estructura sigue también los cambios de salinidad debido a la presencia de diferentes masas de agua observados en el perfil de salinidad (Figura 8). Es importante señalar que las concentraciones por debajo de los 1000 m se mantuvieron en $\sim 2190 \mu\text{mol kg}^{-1}$.
3. La estructura del perfil de CID del XIXIMI en los primeros 1000 m mostró una estructura similar al perfil de los datos costeros de

latitudes menores a los 15°N , mientras que por debajo de los 1000m el perfil muestra similitud con las estaciones entre las estaciones mayores a los $\sim 14^\circ\text{N}$.

En la Figura 8 (panel izquierdo) se presentan los cálculos del omega aragonita para los mismos datos de CID-TA. En el perfil se muestran valores de $\Omega_{\text{arag}} > 1$ en los primeros 500 m, sin embargo es de notar que valores a de Ω_{arag} cercanos a 1 se mantienen de los 500 a los 2000 m. Hacia los 3000 m se logra observar valores de subsaturación ($\Omega_{\text{arag}} < 1$).

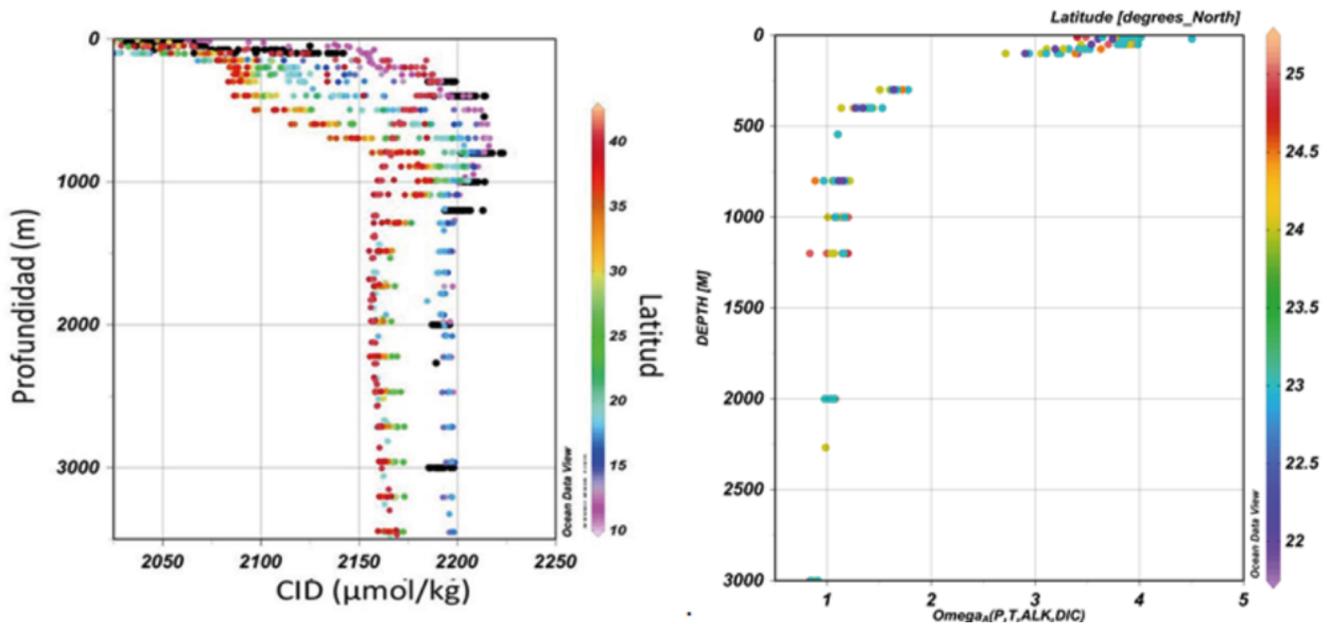


Figura 8. En el panel izquierdo se presentan los perfiles comparativos de CID.

Los datos en círculos negros corresponden a los datos del XIXIMI-I y en color los del WOCE (Los colores corresponden a diferentes latitudes). En el panel derecho se presenta el perfil de Omega Aragonita calculado utilizando los datos medidos de carbono inorgánico disuelto y alcalinidad total.

La comparación con las concentraciones de CID con datos medidos en 1994 por el programa WOCE en una sección aledaña al golfo de México en aguas de la cuenca del Caribe. En este análisis, al comparar los datos de 1994 de las estaciones localizadas entre 10 a 14°N generados en el programa WOCE con el crucero XIXIMI-I siguen la forma del perfil de una manera similar por debajo de los ~ 300 m lo que sugiere que las aguas intermedias y profundas que

llenan el GoM provienen en gran medida por aguas del Caribe. Sin embargo, falta analizar los cruceros de XIXIMI's de diferentes épocas del año para verificar esta hipótesis. Como se mencionó, en el GoM se realizaron mediciones solo en la región profunda, pero se desconoce las dinámicas del carbono en toda la zona costera; se desconoce el efecto de ríos aledaños, así como la dinámica sobre la plataforma continental la cual se compone de material kárstico.



SITIOS CON ACTIVIDAD ACUÍCOLA

Para algunas taxa de organismos marinos sus primeras etapas de vida son especialmente sensibles a la acidificación. Por ejemplo, larvas del ostión *Crassostrea gigas* que fueron sometidas a valores de la presión parcial del CO_2 (pCO_2) de $1000 \mu\text{atm}$ ($\text{pH} = 7.8$) presentaron malformaciones en su desarrollo. Estas malformaciones se consideran dentro de los criterios típicos para identificar desarrollo anormal de la larva veliger (His *et al.*, 1997). Cuando las larvas se sometieron a $2000 \mu\text{atm}$ de pCO_2 ($\text{pH} = 7.4$), más del 70% de los organismos mostraron que sus valvas estaban parcial o completamente abiertas (Kurihara *et al.*, 2007). Esto indica que el efecto de la acidificación afecta en las diferentes etapas de vida de los organismos calcificadores, lo cual también sugiere que la acidificación afecta a distintos mecanismos, es decir, en algunas taxas se observan modificaciones en la tasa de calcificación de sus estructuras protectoras compuestas de CaCO_3 (*i.e.* aragonita en conchas). En el medio marino, durante eventos de surgencia, se ha reportado la presencia de aguas subsaturadas con respecto a Ω_{arag} , la cual afecta a organismos de importancia comercial, como ostiones y abulones. Bajo estas condiciones se han reportado efectos negativos en su metabolismo, reproducción, desarrollo e inmunidad (Fabry *et al.*, 2008; Holman *et al.*, 2004; Burgents *et al.*, 2005). El impacto que se genera por la presencia y duración de agua subsaturada con respecto a Ω_{arag} durante un evento de surgencia, repercute no sólo de forma ambiental sino también económica.

En sitios donde se realiza acuicultura y que se localizan en zonas donde se presentan surgencias, es muy recomendable realizar monitoreo de las variables del carbono para evaluar la presencia y duración del agua subsaturada con respecto a Ω_{arag} tanto en zonas costeras, en zonas del intermareal y en las aguas fuentes que son bombeadas para su uso en cultivos de organismos marinos calcificadores (moluscos). De acuerdo con Feely *et al.* (2008), en las costas de Baja California durante eventos de surgencia, agua subsaturada es transportada a la plataforma continental. En un estudio realizado en una zona ostrícola de las costas de California, encontraron que durante eventos de surgencias hubo poco o nulo desarrollo en larvas de ostión de entre 120 a $150 \mu\text{m}$ cuando el $\Omega_{\text{arag}} = 1$

(Barton *et al.*, 2012). Esto sugiere, que el efecto de agua subsaturada con respecto a Ω_{arag} en algunas etapas larvales, no necesariamente tiene que estar por debajo o igual al valor de saturación para ser considerada como adversa para organismos marinos que calcifican. A la fecha, son contados los estudios referentes a la presencia de aguas subsaturadas en la zona costera o en zonas del intermareal en costas de México y, su importancia radica en que en estos sitios es donde habitan organismos bentónicos que calcifican y que, además, son de importancia comercial (ver Caja 4).

En las costas de Washington se realiza acuicultura enfocada principalmente en la producción de larvas de ostión. Las empresas dedicadas a dicha actividad, han realizado acciones para afrontar los efectos de la acidificación, mediante mediciones continuas de la presión parcial del CO_2 (pCO_2) y del carbono inorgánico disuelto del agua que utilizan en la fijación. Para estos monitoreos, los acuicultores utilizan boyas oceanográficas instaladas en las aguas aledañas y/o usan sistemas automáticos de medición. Dentro de las estaciones de producción, los sistemas se instalaron para medir directamente en el agua fuente bombeada y monitorear las diferentes etapas de la producción. En las costas de Baja California, en una empresa productora de semillas de ostión (Figura 9), últimamente se puso en marcha un monitoreo utilizando instrumentos SeaFet y SeapHOx, los cuales miden pH, temperatura, salinidad y oxígeno, tanto en la entrada de agua que proviene de la bahía, como en las áreas donde se realiza la fijación de las larvas de ostión. De ambos instrumentos se generan series de tiempo de las variables mencionadas, las cuales permiten conocer, en tiempo real, las condiciones químicas del agua que se emplea en la empresa. De esta forma, por ejemplo, el acuicultor decide utilizar o no, el agua de mar para la fijación de las larvas (o tratar el agua antes de usarla aumentando el pH mediante la adición de carbonato). Estas son medidas de adaptación a la *acidificación* de los océanos y es una nueva forma de trabajo en la acuicultura de moluscos, lo cierto es que además de ayudar en actividades económicas de la industria del ostión, también permite generar información importante acerca de los cambios que están ocurriendo en los océanos (Washington State Blue Ribbon Panel on Ocean Acidification, 2012).

Instalación de instrumentación para estudiar cambios y respuestas

Monitoreos en “MaxMar Mariscos” usando SeapHOx



Figura 9. Sistema de monitoreo.

En estaciones de producción es recomendable realizar mediciones directamente en el agua fuente bombeada y monitorear las diferentes etapas de la producción. En las costas de Baja California, en una empresa productora de semillas de ostión, recientemente se puso en marcha un monitoreo utilizando instrumentos SeaFet y SeapHOx, los cuales miden pH, temperatura, salinidad y oxígeno, tanto en la entrada de agua que proviene de la bahía, como en las áreas donde se realiza la fijación de las larvas de ostión.

Acidificación en corales del Pacífico mexicano

México cuenta con formaciones arrecifales en el Atlántico y el Pacífico (Cortes, 2003). Estas últimas han sido recientemente reconocidas como *proxy* por la comunidad científica, pues pueden brindar una oportunidad para modelar cómo se desarrollarán los arrecifes de coral en un mundo con altos niveles de CO₂ (Manzello *et al.*, 2008), ya que estos sistemas se desarrollan en condiciones de acidificación y saturación de aragonita semejantes a los escenarios que el IPCC ha predicho que ocurran a mediano y largo plazo (IPCC, 2007). Adicionalmente, ciertas regiones costeras del Pacífico tropical presentan condiciones de acidificación de forma natural debido a procesos de surgencias (*i.e.* bajo pH y Ω_{arag} en superficie).

Las comunidades coralinas habitando en sitios influenciados por surgencias están adaptadas a tales condiciones *subóptimas*, pero a expensas de una baja cementación, reducida calcificación y alta bioerosión (Manzello *et al.*, 2008). La presencia de poblaciones de coral desarrollándose bajo esas condiciones indica que poseen una alta plasticidad fenotípica, por lo que pueden ser consideradas como poblaciones modelo y el estudio de sus procesos fisiológicos aumentaría nuestra comprensión de cómo responderían otras poblaciones ante condiciones de acidificación futuras. Por ejemplo, la región costera de Oaxaca constituye un laboratorio natural para evaluar los posibles efectos de la acidificación, debido a que estacionalmente, de octubre a abril, la zona presenta eventos de surgencia intensos como resultado de los fuertes vientos del norte



(Tehuano). Los eventos de surgencia se caracterizan por el acarreo de agua subsuperficial hacia la superficie del mar por periodos de tiempo irregulares que oscilan típicamente entre los 10 y 15 días; el agua transportada por la surgencia se caracteriza por su baja temperatura, alto nivel de nutrientes y aguas acidificadas (Feely *et al.*, 2008, Chapa-Balcorta *et al.*, 2015), por lo que representa un área potencial de estudio en donde es viable evaluar el posible impacto del estrés por acidificación.

No obstante, la importancia que los arrecifes del Pacífico sur mexicano tienen para proveer información respecto al futuro de los arrecifes de coral en México y en el resto del mundo (Manzello *et al.*, 2008), existe información limitada sobre las condiciones reales de acidificación en que se desarrollan estos sistemas en el occidente del país y, sobre todo, si estas condiciones ya están generando efectos y de qué tipo, sobre especies particulares o sus poblaciones. Actualmente hay varias iniciativas interinstitucionales de monitoreo en zonas arrecifales, por ejemplo, en la región de Cabo Corrientes en islas Marietas a cargo de la Universidad de Guadalajara y en colaboración con la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y el centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), se cuenta con un proyecto con mediciones mensuales en sitios de arrecifes; también en la región costera de la Bahía de Manzanillo, Colima (UCol) se lleva a cabo un proyecto de investigación enfocado a entender las interacciones océano continente con diferentes ecosistemas. En el Caso de Oaxaca, actualmente se realiza un proyecto denominado “Estudio de la acidificación del océano y su efecto en las comunidades de arrecifes del Pacífico Sur mexicano”, donde participan cuatro instituciones nacionales como la UABC, CICESE, Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS) y la Universidad del Mar (UMAR) en el cual, se revisa el papel de los procesos costeros y el aporte de ríos en la variabilidad del sistema de carbonatos. Adicionalmente, en las costas de Oaxaca se lleva a cabo el proyecto denominado “Programa de monitoreo permanente de la acidificación del océano y su efecto en la calcificación de los corales formadores de arrecifes en México”, en el cual participan la UMAR, Universidad Autónoma de México (UAM), Universidad de Veracruz (UV), UABC, CICESE,

UABCS y la Universidad de Guadalajara (UDG). En dicho proyecto se caracterizará la variabilidad espacial del carbono inorgánico disuelto (CID) y el pH en las Bahías de Huatulco, Oaxaca y en Bahía de Veracruz, en el Golfo de México. En la Caja 4, marcados en azul, se indican los sitios en los cuales se realizan estudios sobre la acidificación en zonas de arrecifes. La información generada de estos estudios permitirá avanzar en el conocimiento de las condiciones de la química del agua en la que viven actualmente estas comunidades y permitirán, también, avanzar en el conocimiento de la interesante interacción con el agua adyacente de las zonas del mínimo de oxígeno y máximo de carbono.

SIGUIENTES PASOS

En México existen otras regiones donde también es necesario generar información, como las costas de Cabo Corrientes, que incluye los estados de Nayarit y Jalisco y, más al sur, en Colima, Guerrero y Oaxaca, por tratarse de sitios en los que las aguas costeras naturalmente presentan un pH bajo entre los 50 y 100 m de profundidad, por encontrarse dentro de la zona de mínimo oxígeno. Actualmente se están realizando avances en la generación de información sobre la química del carbono en dichas regiones, así como también en otras zonas como el Golfo de México.

Respecto a los esfuerzos realizados por organismos mexicanos, los estudios del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la Universidad Autónoma de Baja California, junto con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), muestran que en Baja California, existe una estrecha relación entre la acidificación del océano y la disminución de la producción de larvas del ostión japonés y que las zonas costeras con industria de mariscos reportan resultados negativos, por lo que implementaron cruceros oceanográficos y sitios de monitoreo. Por su parte, la Facultad de Ciencias Marinas en la UABC estudia las condiciones de la química del agua de regiones como la isla Natividad, en donde se produce de manera natural la industria del abulón y que en los últimos años ha tenido grandes problemas. En la Caja 4 también se indican los sitios en los cuales se realizan estudios sobre la acidificación en zonas de actividad acuícola.

Caja 4. Sitios de monitoreo costero en áreas de arrecifes y en sitios con actividad acuícola

La Figura C4.1 muestra los sitios de monitoreo costero en las costas de México.



Figura C4.1. En los sitios marcados en azul la comunidad científica de expertos en arrecifes realiza mediciones continuas y discretas de variables del carbono para estudiar el tema de la acidificación. Por otro lado, en rojo se indican los sitios donde se estudia las condiciones del medio ambiente de la química del carbono en sitios donde se practica la acuicultura: (1) Bahía Todos Santos y (2) Isla Natividad. En los sitios marcados se han instalado instrumentos conocidos como SEAFET y SeapHOx los cuales miden variables como pH, temperatura, salinidad y oxígeno.

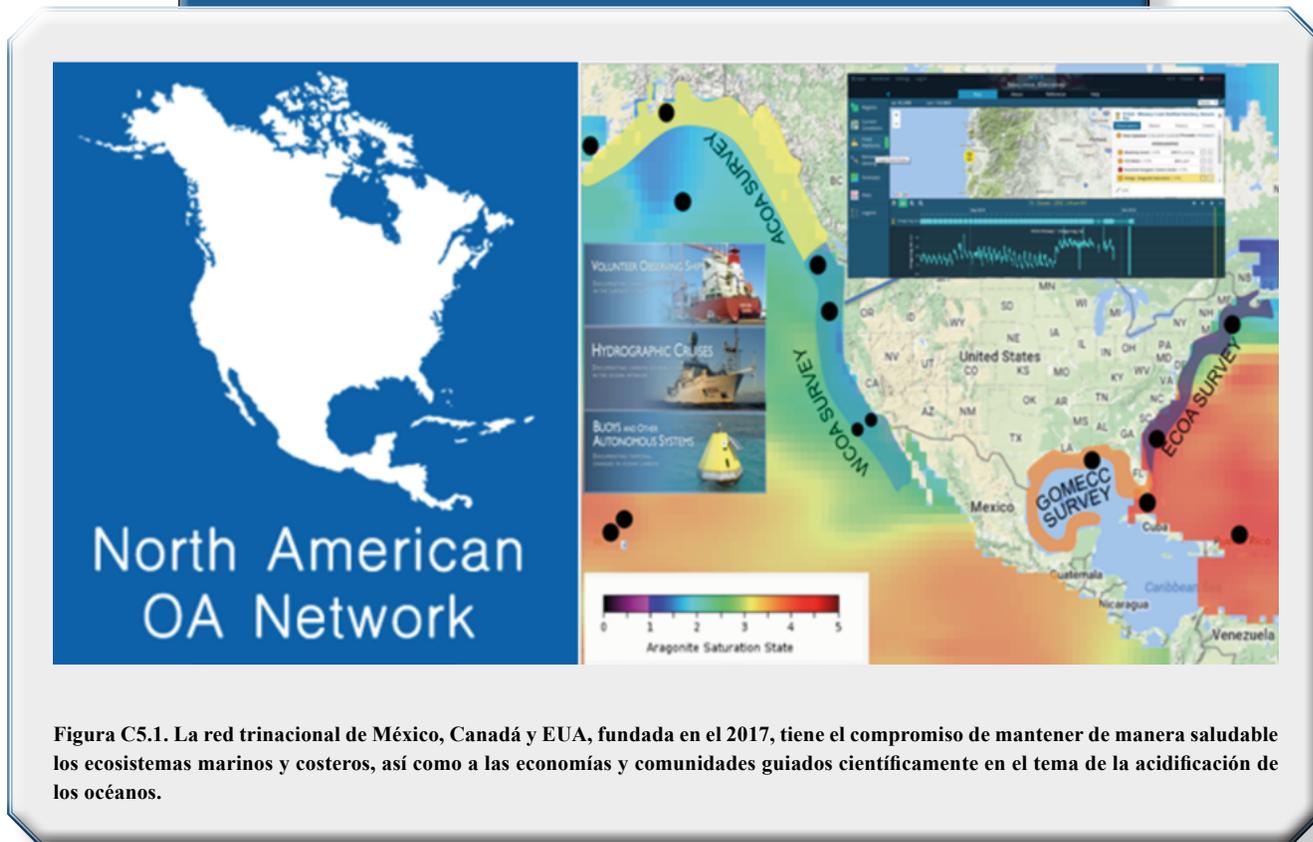
Por otra parte, la acidificación del océano forma parte de la agenda científica nacional del grupo de investigadores que conforman el Programa Mexicano de Carbono (PMC), como respuesta a los compromisos gubernamentales que se establecieron con programas internacionales similares (North American Carbon Program, CarboNA y el Global Carbon Program). Los avances del PMC en materia de ambientes marinos se encuentran en sus publicaciones, mismas que se encuentran disponibles para el público en general en www.pmc carbono.org.

Además, México participa en programas internacionales con un enfoque especial hacia el tema de la acidificación del océano, como lo es con el Global

Ocean Acidification Network (GOA-ON: <http://www.goa-on.org/>) y en Latinoamericana de Acidificación del Océano (LAOCA: <https://laoca.cl/es/>). El año pasado el GOA-ON promovió la creación del North American OA Network (Ver Caja 5) que incluye a México, Canadá y EUA (GOA-ON North America Hub: http://goa-on.org/regional_hubs/north_america/about/introduction.php). En dicha red trinacional, se impulsan y promueven las buenas prácticas de medición de las variables del carbono y de la recopilación eficiente de datos que sean comparables y representativos, geográficamente, para evaluar la acidificación de los océanos y sus efectos. Se busca, además, que con esta información se validen modelos de pronósticos.



Caja 5. Red Internacional sobre acidificación del océano denominada “North American OA Network”



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El reto de las instituciones científicas mexicanas es participar junto con pescadores, productores y tomadores de decisiones, en el desarrollo de planes de monitoreo y de investigación, que lleven a propuestas de mitigación y adaptación al cambio climático y la acidificación del océano. Se requiere de información científicamente validada en los ambientes marinos y costeros de nuestro país, para poder contribuir sobre los posibles efectos de la acidificación en mares y costas.

La comunidad científica en México tiene importantes fortalezas para incidir en el esclarecimiento de la acidificación de los océanos y su impacto en la biodiversidad y la productividad, entre las que destacan:

Interés y experiencia en la manipulación del sistema de CO₂, de acuerdo con estándares internacionales.

Personal capacitado y con reconocimiento internacional en la medición de variables del sistema del carbono (pH, alcalinidad y carbono inorgánico disuelto) con altos niveles de precisión.

Un sólido grupo de investigadores especialistas en ecología marina, oceanografía química y, fisiología y ecología de corales.

Es importante destacar que en las costas de México existe una gran variedad de ecosistemas marinos, los cuales son un reflejo de amplia variabilidad espacial en sus condiciones oceanográficas, las cuales finalmente moldean las condiciones bajo las cuales se desarrollan estos ecosistemas pelágicos y benthicos. Algunos de estos ecosistemas deben ser considerados como piezas clave debido a que pueden utilizarse como *laboratorios naturales* para realizar estudios de acidificación del océano, lo que puede facilitar la comprensión del sistema, conocer sus efectos y plantear medidas de mitigación. Sin embargo, aun cuando las fortalezas son muchas, también es necesario retomar aquellos aspectos que limitan el desarrollo de las investigaciones y cuya subsanación requiere de atención inmediata, por ejemplo:

- Hay pocos laboratorios para la medición del sistema de carbonato, que permitan realizar intercalibraciones de forma adecuada.
- Se carece de una red de monitoreo del océano costero que permita determinar la variabilidad natural del sistema de carbonatos en diferentes zonas de México.
- Se requiere de compromisos institucionales serios y robustos (académicos y financieros) para la operación de redes de monitoreo a largo plazo.

Lo anterior plantea retos importantes, por lo que es necesario institucionalizar los esfuerzos con relación a la dinámica de los ciclos biogeoquímicos en los mares y costas de México, así como contar con una robusta Ley de Mares y Costas, que considere la opinión del panel científico. 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. Paralelamente se deben llevar a cabo experimentos de campo y estudios socio-ambientales en los márgenes continentales; ésto incluye zonas de acuicultura o de pesquerías costeras, así como nuevos asentamientos relacionados con el turismo y la industria energética. Así mismo es urgente desarrollar estudios de exposición para conocer los efectos de la acidificación sobre especies nativas y/o endémicas de importancia ecológica y/o comercial.

Es importante liderar una iniciativa para realizar estudios en las zonas costeras y bahías más representativas de los diferentes ambientes y climas de México. Esto con el objetivo de 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 de desarrollo de actividades acuiculturales-pesqueras, turísticas, portuarias e industriales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la NOAA, al GOA-ON, al North American Carbon Program, al programa IMECOCAL y al Programa Mexicana de Carbono por ayudar en

esta iniciativa de estudios en México. Especialmente, se agradece al Dr. Richard Feely por ser un promotor visionario e incansable impulsor de iniciativas sobre el tema de la acidificación en Norte America. Se agradece el apoyo de la Dra. K. Barbeau y su equipo, por invitarnos a ser parte del crucero DCM-2008. Se agradece especialmente al apoyo del proyecto “Establecimiento de línea de base en aguas profundas del Golfo de México en respuesta al derrame petrolero asociado a la plataforma Deepwater Horizon” coordinado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y financiado por la Comisión Nacional para el Uso y Conservación de la Biodiversidad (CONABIO).

LITERATURA CITADA

- Barton, A., B. Hales, G. G. Waldbusser, C. Langdon and R. A. Feely. 2012. The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: implications for near-term ocean acidification effects. *Limnology and Oceanography* 57:698-710.
- Bopp, L., C. Le Quéré, M. Heimann, A. C. Manning and P. Monfray. 2002. Climate-induced oceanic oxygen fluxes: Implications for the contemporary carbon Budget. *Global Biogeochem. Cycles* doi: 10.1029/2001GB001445.
- Brill, R.W. 1996. Selective Advantages conferred by the high-performance physiology of tunas, billfishes, and dolphin fish. *Comp. Biochem. Physiol.* 113:3-15.
- Broecker, W. S. and T. H. Peng. 1992. Interhemispheric transport of carbon dioxide by ocean circulation. *Nature* 356:587-589.
- Burgents, J. E., K. G. Burnett and L. E. Burnett. 2005 Effects of hypoxia and hypercapnic hypoxia on the localization and the elimination of *Vibrio campbelli* in *Litopenaeus vannamei*, the Pacific white shrimp *Biol. Bull.* 208:159-68.
- Caldeira, K. and M. E. Wickett. 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*. 425:365
- Canadell, J. G., C. Le 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 of the United States of America* 104:18866-18870.
- Cepeda-Morales, J., E. Beier, G. Gaxiola-Castro, M. F. Lavín and V. M. Godínez. 2009. Effect of the oxygen minimum zone on the second chlorophyll maximum in the Eastern Tropical Pacific off Mexico. *Ciencias Marinas* 35:389-403.
- Chan, F., J. A. Barth, J. Lubchenco, A. Kirincich, H. Weeks, W. T. Peterson and B. A. Menge. 2008. Emergence of anoxia in the California current large marine ecosystem. *Science* 319:920-920.



- Chapa-Balcorta, C., J. M. Hernández-Ayon, R. Durazo, E. Beier, S. R. Alin and A. López-Pérez. 2015. Influence of post-Tehuano oceanographic processes in the dynamics of the CO₂ system in the Gulf of Tehuantepec, Mexico, *J. Geophys. Res. Ocean*, 120: 7752–7770
- Cortes, J. 2003. Coral reefs of the Americas: an Introduction to Latin American coral reefs.. *In*: Cortes, J. (ed.). *Latin American Coral Reefs*. Elsevier, Amsterdam. pp:1-17
- Delgadillo-Hinojosa F., J. V. Macías-Zamora, J. A. Segovia-Zavala y S. Torres-Valdés. 2001. Cadmiun enrichment in the Gulf of California. *Marine Chemistry* 75:109-122
- Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely and J. A. Kleypas. 2009. Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*. 1:1, 169-192
- Ekau, W., H. Auel, H. O. Portner and D. Gilbert. 2009. Impacts of hypoxia on the structure and processes in the pelagic community (zooplankton, macro-invertebrates and fish). *Biogeosciences Discus*. 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, J. M. Hernández-Ayon, D. Ianson and B. Hales. 2008. Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the continental shelf. *Science* 320:1490-1492.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, K. Lee, W. Berelson, J. Kleypas, V. J. Fabry and F. J. Millero. 2004. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*, 305:362-366.
- Franco, A. C., J. M. Hernández-Ayon, E. Beier, E. Garçon, H. Maske, A. Paulmier, J. Farber-Lorda, R. Castro and R. Sosa-Avalos. 2014. Air-sea CO₂ fluxes above the stratified oxygen minimum zone in the coastal region off Mexico, *J. Geophys. Res. Oceans* doi:10.1002/2013JC009337.
- Gaxiola-Castro, G., S. Alvarez-Borrego y R. A. Shwartzlose. 1978. Sistema del bióxido de carbono en el Golfo de California. *Cienc. Mar.* 5:25-40.
- Grantham, B. A., F. Chan, K. J. Nielsen, D. S. Fox, J. A. Barth, A. Huyer, J. Lubchenco and B. A. Menge. 2004. Upwelling-driven nearshore hypoxia signals ecosystem and oceanographic changes in the northeast Pacific. *Nature* 429:749-754.
- 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.
- Hales, B., L. Karp-Boss, A. Perlin and P. A. Wheeler. 2006. Oxygen production and carbon sequestration in an upwelling coastal margin, *Global Biogeochem. Cycles* doi:10.1029/2005GB002517.
- Hernández-Ayón, J. M. 2011. CO₂ system studies in Mexican coastal waters: Baja California and the connections with subtropical water. Mid-Term Strategy theme: Air-sea gas fluxes at Eastern boundary. *SOLAS News Letter* Number 13:26-27.
- Hernández-Ayón, J. M., C. Chapa-Balcorta, F. Delgadillo-Hinojosa, V. F. Camacho-Ibar, M. A. Huerta-Díaz, Santamaria-del Angel, S. Galindo-Bect and J. A. Segovia-Zavala. 2013. Dynamics of Dissolved Inorganic Carbon in the Midriff Islands of the Gulf of California: Influence of Water Masses. No. Especial del Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 39:183-201.
- Hidalgo-González, R., S. Álvarez-Borrego y A. Zirino. 1997. Mezcla en la región de las grandes islas del Golfo de California: Efecto de la pCO₂ superficial. *Cienc. Mar.* 23:317-327
- His, E., M. N. L. Seaman and R. Beiras. 1997. A simplification of the bivalve embryogenesis and larval development bioassay method for water quality assessment. *Water Res.* 31:351–355.
- Holman, J. D, K. G. Burnett and L. E. Burnett. 2004. Effects of hypercapnic hypoxia on the clearance of *Vibrio campbelli* in the Atlantic blue crab, *Callinectes sapidus* rathbun *Biol. Bull.* 206:188–96.
- IPCC. 2007. *Climate Change: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Karstensen, J., L. Stramma and M. Visbeck. 2008. Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans. *Progress in Oceanography* 77:331-350.
- Keeling, R. F., A. Kortzinger and N. Gruber. 2010. Ocean deoxygenation in a warming world. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2:463–493
- Kurihara H, S. Kato and A. Ishimatsu. 2007. Effects of increased seawater pCO₂ on early development of the oyster *Crassostrea gigas*. *Aquat Biol* 1:91–98.
- Manzello, D. P., J. A. Kleypas, D. A. Budd, C. M. Eakin, P. W. Glynn and C. Langdon. 2008. Poorly cemented coral reefs of the eastern tropical Pacific: Possible insights into reef development in a high-CO₂ world. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:10450-10455.
- Matear, R. J. and A. C. Hirst. 2003. Long-term changes in dissolved oxygen concentrations in the ocean caused by protracted global warming, *Global Biogeochemical Cycles* doi:10.1029/2002GB001997.
- Mucci, A. 1983. The solubility of calcite and aragonite in seawater at various salinities, temperatures, and one atmosphere total pressure, *American Journal of Science* 283:780-799.
- Orr, J. C., V. J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S. C. Doney, R. A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, R. M. Key, K. Lindsay, E. Maier-Reimer, R. Matear, P. Monfray, A. Mouchet, R. G. Najjar, G. K. Plattner, K. B. Rodgers, C. L. Sabine, J. L. Sarmiento, R. Schlitzer, R. D. Slater, I. J. Totterdell, M. F. Weirig, Y. Yamanaka and A. Yool. 2005. Anthropogenic

- ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437:681-686.
- Paulmier, A. and D. Ruiz-Pino. 2009. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Progress In Oceanography* 80:113-128.
- Paulmier, A., D. Ruiz-Pino and V. Garçon. 2008. The oxygen minimum zone (OMZ) off Chile as intense source of CO₂ and N₂O. *Continental Shelf Research* 28:2746-2756
- Portner, H. O. and A. P. Farrell. 2008. Physiology and Climate Change. *Science* 322:690-92.
- Prince, E. D. and C. P. Goodyear. 2006. Hypoxia-based habitat compression of tropical pelagic fishes. *Fish. Oceanogr.* 15:451-464.
- Santamaria-del Angel, E., S. Alvarez-Borrego and F. E. Muller-Karger. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*. 99:7411-7421.
- Schmitz, W. J. and P. L. Richardson. 1991: On the sources of the Florida Current. *Deep-Sea Research*, 38 (Suppl.):379-409.
- Siebel, B. A. 2011. Critical oxygen levels and metabolic suppression in oceanic oxygen minimum zones. *The Journal of Experimental Biology* 214:326-336
- Smith, S. V. 2013. Parsing the oceanic calcium carbonate cycle: a net atmospheric carbon dioxide source, or a sink? L&O e-Books. Association for the Sciences of Limnology and Oceanography. Texas. 42 p. doi: 10.4319/svsmith.2013.978-0-9845591-2-1.
- Steinacher, M., F. Joos, T. L. Frolicher, G. K. Plattner and S. C. Doney. 2009. Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosciences* 6:515-533
- Stramma, L., G. C. Johnson, J. Sprintall and V. Mohrholz. 2008. Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science* 320:655-657
- Stramma, L., S. Schmidtko, L. A. Levin and G. C. Johnson. 2010. Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts. *Deep-Sea Research I* 57:587-595.
- Torres-Delgado, E. V., F. Delgadillo-Hinojosa, V. F. Camacho-Ibar, M. A. Huerta-Díaz, J. A. Segovia-Zavala, J. M. Hernández-Ayón and S. Galindo-Bect. 2013. Enriquecimiento invernal de nutrientes inorgánicos (NO₃, PO₄, Si(OH)₄) en la capa superficial del Canal de Ballenas-Salsipuedes en el Golfo de California. No. Especial del Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 39:151-164.
- Ulloa, O., D. E. Canfield, E. F. DeLong, R. M. Letelier and F. J. Stewart. 2012. Microbial oceanography of anoxic marine zones. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109:15996-16003
- Vaquier-Sunyer, R. and C. M. Duarte. 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105:15452-15457.
- Washington State Blue Ribbon Panel on Ocean Acidification. 2012. *Ocean Acidification: From Knowledge to Action*, Washington State's Strategic Response. Adelman, H. and L. Whiteley-Binder (eds). Washington Department of Ecology, Olympia, Washington. Publication no. 12-01-015.
- Wolf-Gladrow, D. A., U. Riebesell, S. Burkhardt and J. Bijma. 1999. Direct effects of CO₂ concentration on growth and isotopic composition of marine plankton. *Tellus Series B Chemical and Physical Meteorology* 51:461-476.
- Zirino, A., J. M. Hernández-Ayón, R. A. Fuhrman, S. Alvarez-Borrego, G. Gaxiola-Castro, R. Lara-Lara and R. L., Bernstein. 1997. Estimaciones Superficiales de PCO₂ en el Golfo de California a Partir de Mediciones Continuas de pH e Imágenes de Satélite. *Cienc. Mar.* 23:1-22.

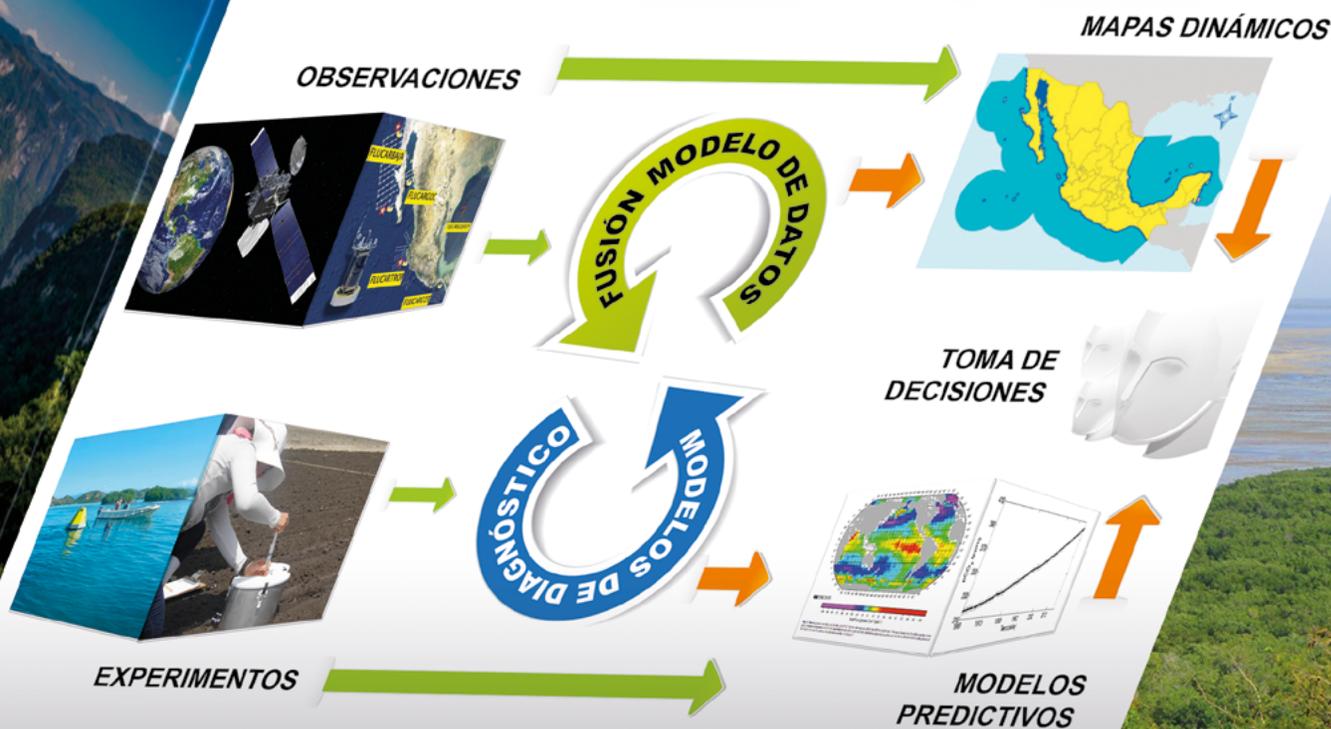
Estado del Ciclo del Carbono en México

Agenda Azul y Verde

PRIMER REPORTE

Editores

Fernando Paz Pellat
J. Martín Hernández Ayón
Ramón Sosa Ávalos
Alma S. Velázquez Rodríguez



FORMA DE CITAR

Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez. (Editores). 2019. Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: 978-607-96490-7-4. 716 p.

ISBN: 978-607-96490-7-4



Programa Mexicano del Carbono A.C.
Calle Chiconautla No. 8 Interior A
Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56230
Texcoco, Estado de México, México

www.pmcarbono.org

Esta obra fue elaborada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).

Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio.