

BASE DE DATOS SOBRE CARBONO INORGÁNICO DISUELTO Y FLUJOS DE CARBONO OCÉANO-ATMÓSFERA EN ECOSISTEMAS MARINOS DE MÉXICO

DATABASE ON DISSOLVED INORGANIC CARBON AND OCEAN-ATMOSPHERE CARBON FLUXES IN MARINE ECOSYSTEMS OF MEXICO

Cecilia Chapa-Balcorta^{1†}, Ramón Sosa-Ávalos², José Martín Hernández-Ayón³ y T. Leticia Espinosa-Carreón⁴

¹Universidad del Mar. Ciudad Universitaria SN. Puerto Ángel, Oaxaca.

²Universidad de Colima, Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas. Carretera Manzanillo-Barra de Navidad, Km. 20. Campus El Naranjo. C.P. 28860. Manzanillo, Colima, México.

³Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Carretera Ensenada-Tijuana No. 3917, Fraccionamiento Playitas. C.P. 22860. Ensenada, Baja California, México.

⁴Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa. Blvd. Juan de Dios Bátiz Paredes No. 250, San Joaquín. C.P. 81101. Guasave, Sinaloa, México.

[†]Autor para correspondencia: cecychb@angel.umar.mx

RESUMEN

El océano absorbe aproximadamente el 30% del CO₂ liberado hacia la atmósfera por actividades antropogénicas, esto lo convierte en el más importante reservorio de carbono antropogénico en el mundo. El presente trabajo tiene como objetivos generar una base de datos nacional sobre el carbono inorgánico disuelto (CID) y los flujos océano-atmósfera de CO₂ (FCO₂) en mares mexicanos, e integrar dicha información para contar con una visión holística del estado del conocimiento del CID en México. La base de datos se integró a partir de reportes científicos y bases de datos de acceso público. Se compiló una base bibliográfica y una de datos de CID y de FCO₂ en los mares mexicanos. Se encontraron 40 estudios realizados en las diferentes regiones de la zona económica exclusiva entre 1978 y 2017. Los datos se clasificaron por regiones geográficas. La cantidad de estudios en los que se ha evaluado CID y/o FCO₂ se han incrementado durante los últimos años, alcanzando su máximo en 2017 (8 trabajos). Cabe destacar que el 30% de los estudios son contribuciones a la serie de Síntesis del Conocimiento del Carbono en México, realizada por el Programa Mexicano del Carbono. Sin embargo, la mayoría de las regiones presentan sólo datos puntuales, de una a dos campañas oceanográficas por sitio, lo cual indica que aún se requiere realizar estudios sistemáticos que generen series de largo plazo para poder entender los procesos que controlan las concentraciones y los flujos de carbono inorgánico en los mares mexicanos.

Palabras clave: carbono inorgánico disuelto; monitoreo; reservorio; flujos de CO₂ océano-atmósfera, bases de datos.

ABSTRACT

The ocean absorbs approximately 30% of CO₂ anthropogenic emissions, making it the most important anthropogenic carbon reservoir in the world. The objective of this study was to generate a national database about dissolved inorganic carbon (DIC) and air-sea CO₂ (FCO₂) fluxes in Mexican waters to be able to provide a holistic vision of the state of knowledge about inorganic carbon in Mexico. The database was integrated from research articles, scientific reports, theses and open access databases. A total of 40 studies were carried out from 1978 to 2017. Data was classified by geographic regions. The amount of studies per year where DIC and/or air-sea CO₂ fluxes has increased in the last years, reaching a maximum in 2017 (8 studies). 30% of the studies are book chapters published by the Mexican Carbon Program. However, most of the reported regions have discrete data of 1 or 2 oceanographic cruises. Therefore, more systematic studies are needed to generate long term time series to be able to identify the main drivers of DIC variability in México.

Key words: dissolved inorganic carbon; monitoring; reservoirs; air-sea CO₂ fluxes; databases.

INTRODUCCIÓN

El océano desempeña un papel importante en el movimiento del carbono entre los distintos reservorios: hidrósfera, atmósfera, litósfera y biósfera (Figura 1). Actualmente, la actividad humana ha promovido que el CO₂ y otras formas químicas del carbono (CH₄, clorofluorocarbonos), se incorporen a la atmósfera en cantidades que alteran los almacenes y los intercambios de carbono entre los reservorios. Esto ha promovido la disminución del pH en el mar y el desarrollo de un efecto de invernadero, que a su vez, ha provocado un cambio climático. Al mismo tiempo, estos fenómenos inciden directamente en la resiliencia y estructura de los ecosistemas, así como en la supervivencia del hombre, ya que afectan la disponibilidad de alimento, la salud pública y el desarrollo social (Gattuso *et al.*, 2015). Por consiguiente, conocer el ciclo del carbono y las variables relacionadas con el cambio climático, son prioridades de la investigación científica a escala mundial.

Los flujos de carbono (Figura 1, flechas) son de diversos tipos: flujos océano-atmósfera, continente-océano y sedimento-columna de agua, además de los que se presentan entre los diversos compartimentos biológicos (Emerson y Hedges, 2009). En el caso de los flujos continente-océano, el CO₂ atmosférico se disuelve en el agua de lluvia y forma ácido carbónico (H₂CO₃) que reacciona con los minerales de las rocas (*i.e.*

intemperismo); al reaccionar, las rocas carbonatadas liberan iones bicarbonato (HCO₃⁻) y carbonato (CO₃⁼), los cuales pueden ser transportados hacia el océano en forma disuelta a través de los ríos y escorrentías. Por otra parte, el intercambio océano-atmósfera ocurre cuando el CO₂ atmosférico se disuelve o se libera como resultado de la tendencia hacia el equilibrio de las presiones parciales de este gas en el agua y el aire. Cuando la presión parcial es mayor en el agua, el flujo es del océano hacia la atmósfera y, viceversa.

El intercambio océano-atmósfera es, actualmente, el flujo que ha experimentado mayores alteraciones a nivel global, debido al incremento de CO₂ antropogénico en la atmósfera (Figura 1), ya que el océano actualmente absorbe el 30% de las emisiones de CO₂ generado por las actividades humanas (Le Quéré *et al.*, 2015). Aunado a ello, la concentración de carbono inorgánico disuelto (CID) en el mar es modulada por procesos dinámicos como corrientes, surgencias, remolinos y procesos biogeoquímicos, como son respiración, fotosíntesis, formación y disolución de exoesqueletos (u otras estructuras biogénicas) de CaCO₃. Todos estos factores interactúan y su importancia relativa está en función de las condiciones de cada región. Es indispensable determinar cuánto carbono se encuentra en reservorios, cuánto se emite a la atmósfera (fuentes) y cuánto es absorbido por las regiones del mar que actúan como sumideros (Figura 1).

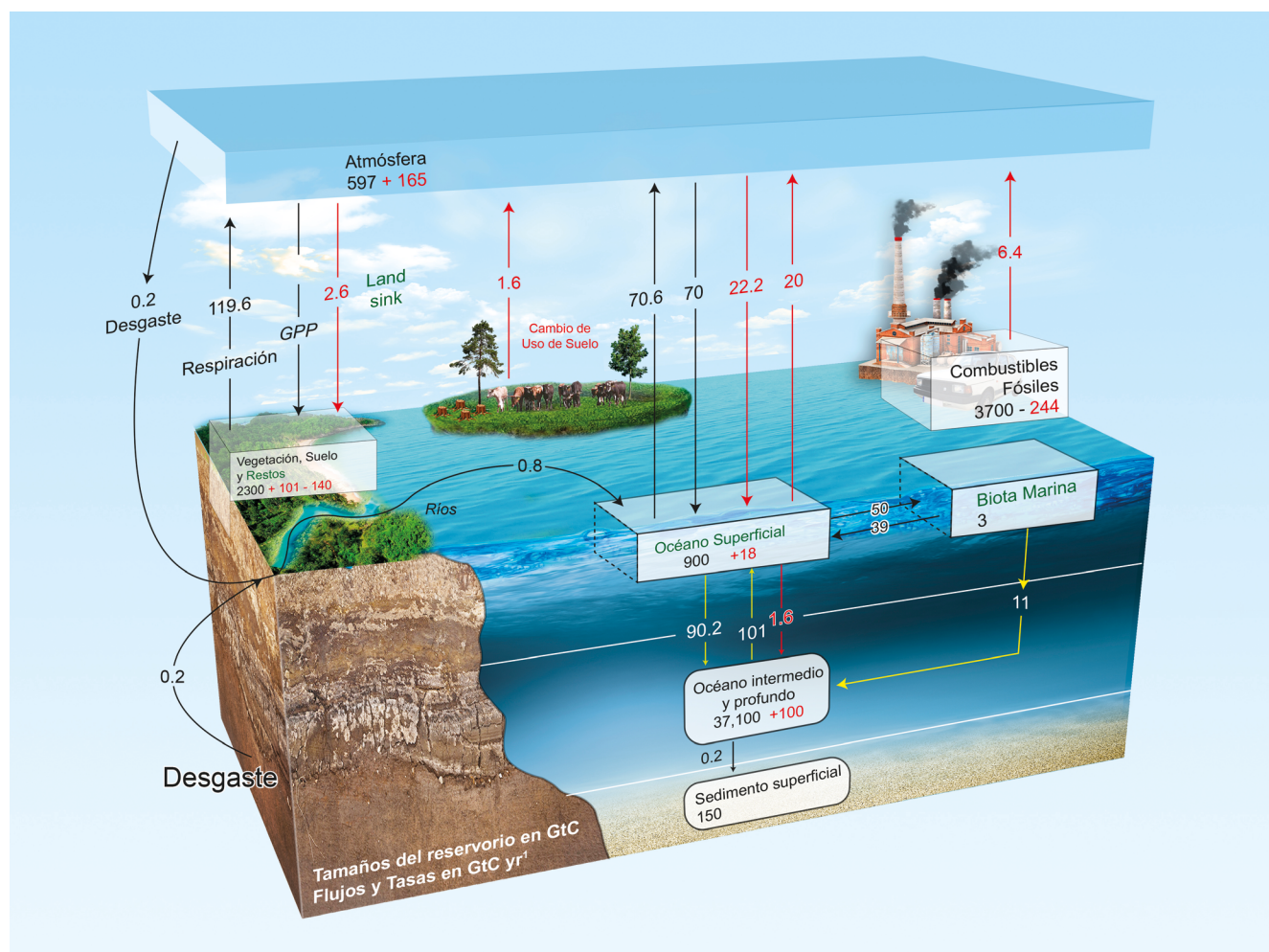
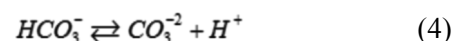
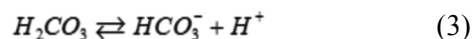
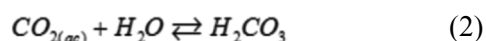
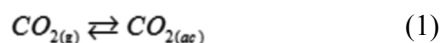


Figura 1. Ciclo global del carbono en donde se muestra el tamaño de los reservorios en gigatoneladas (Gt C) y los flujos en gigatoneladas por año (1 Gt = 10¹⁵ g).

Las flechas negras indican los flujos durante la época preindustrial, las flechas rojas muestran el promedio de los flujos antropogénicos para la década de los 1990. Los mismos colores corresponden para el tamaño de los reservorios pre y post época industrial, respectivamente (Modificado de Sabine *et al.*, 2004 e IPCC, 2007, por el Programa Mexicano del Carbono).

El equilibrio químico del carbono en el océano

La mayor porción de carbono en el agua de mar ocurre de manera inorgánica dentro del sistema del CO₂ (Ec. 1-4), también llamado sistema de carbonatos. Este sistema es muy importante en el océano, ya que regula el pH del agua de mar, controla los flujos de CO₂ entre la biósfera, litósfera, atmósfera y océano, además de ser la fuente de carbono en la productividad primaria (Millero, 2006):



En el agua de mar, las variables que describen el sistema del CO₂ son el pH, el CID (la suma de las especies carbonatadas descritas en las ecuaciones 1 a 4), la alcalinidad total (AT; μmol kg⁻¹) y la presión parcial del CO₂ (pCO₂; μatm). Utilizando dos de estas cuatro variables, junto con las constantes termodinámicas de disociación del ácido carbónico de las ecuaciones 1 - 4, salinidad y temperatura, es posible describir el sistema del CO₂, y calcular el flujo océano-atmósfera de CO₂ (FCO₂), valor que permite identificar si las zonas de interés son fuentes o sumideros de CO₂.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la revisión de los datos de CID y FCO_2 se inició con la búsqueda bibliográfica, a partir de bases de datos, artículos científicos, tesis, libros, informes técnicos y memorias de congresos. Asimismo, se evaluaron los métodos de medición utilizados. En este sentido y con el objetivo de mantener un buen control de calidad de la información, se incluyeron solamente estudios en los cuales se presentan datos con una precisión $\pm 3 \mu\text{moles kg}^{-1}$ en la cuantificación del CID y que, además, hayan hecho explícito que la calidad de los datos se mantuvo mediante calibración con material de referencia certificado, o en su defecto, que se calcularan a partir de un par de variables del sistema de carbonatos, con un estricto control de calidad. Posteriormente, la información disponible se dividió por regiones geográficas que comparten características oceanográficas similares.

RESULTADOS

Las mediciones de CID y FCO_2 en los mares de México son en general muy escasas y esporádicas. Aun cuando se han publicado algunos trabajos sobre la magnitud de los reservorios de carbono en lagunas costeras y aguas interiores de Baja California (Ribas-Ribas *et al.*, 2011) y Colima (Sánchez-Nava, 2015; Sosa-Ávalos *et al.*, 2015), en su mayoría son datos puntuales obtenidos durante una o hasta tres campañas oceanográficas. Así mismo, la magnitud de los reservorios de carbono en aguas de la plataforma continental y oceánicas en los mares frente a México, se desconoce. Sin embargo, cabe destacar que la cantidad de trabajos que reportan CID y/o FCO_2 se incrementó en la última década. El 2017 fue el año en que se publicaron más estudios relacionados con el carbono, de éstos el 35% corresponde a capítulos de libro publicados en las síntesis nacionales del Programa Mexicano del Carbono (PMC) como se observa en la figura 2.

ESTUDIOS IDENTIFICADOS A 2017

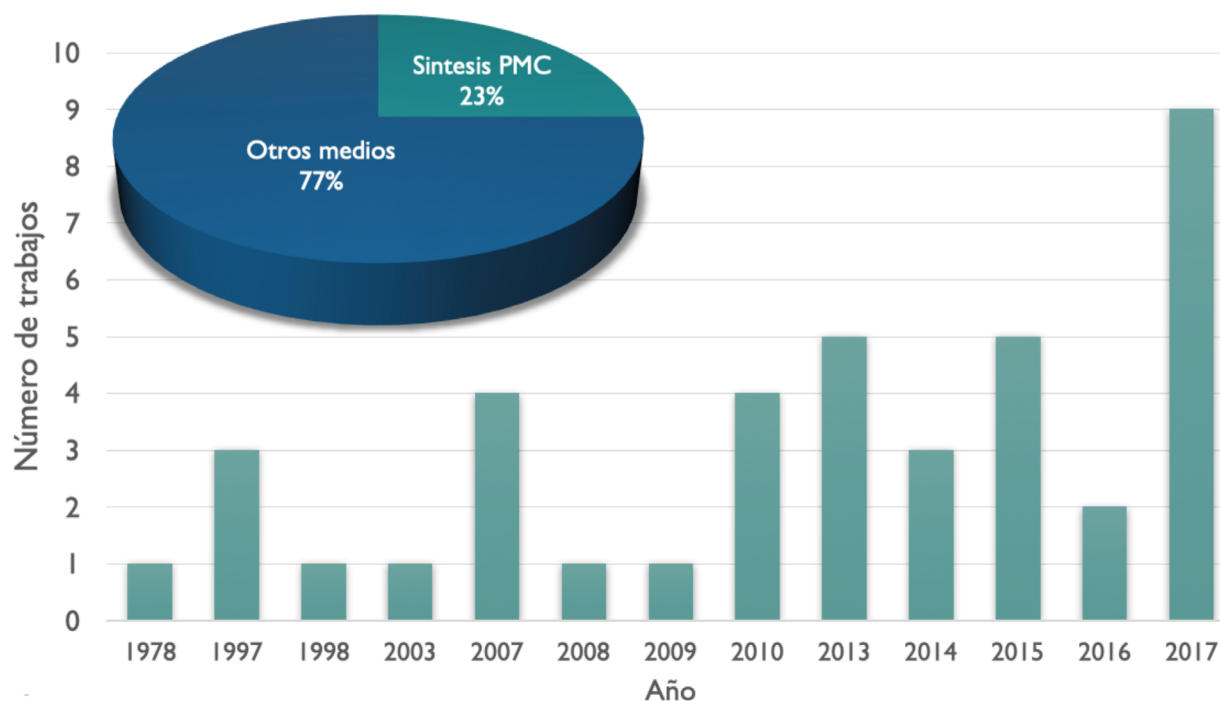


Figura 2. Estudios identificados que incluyen datos de CID y/o FCO_2 .

La gráfica de pastel resalta el porcentaje de estudios publicados en la serie de Síntesis del Estado del Conocimiento del Carbono, publicada por el Programa Mexicano del Carbono.

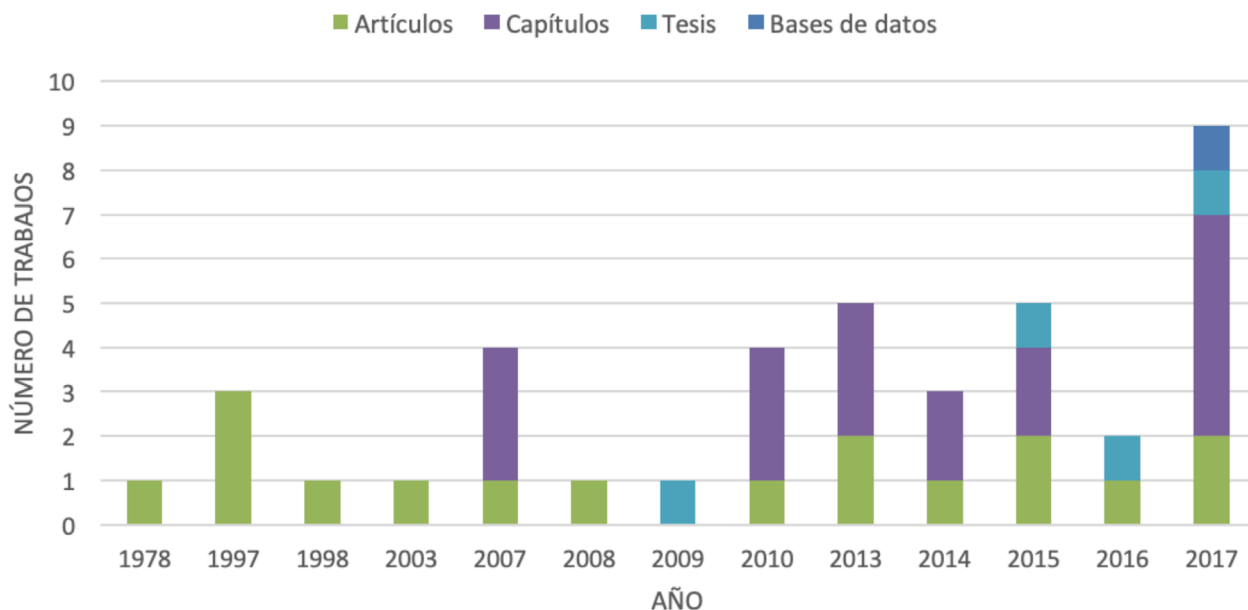


Figura 3. Estudios reportados por tipo de documento.

Estudios por regiones oceanográficas

Existen diferencias en el número de estudios por región (Figura 4). Mientras que en el Golfo de California el número de trabajos asciende a 15, en el Golfo de México no existen aún estudios publicados. Esto probablemente se deba a la importancia económica y/o ecológica del sitio de estudio, así como a la disponibilidad de recursos o a la ubicación geográfica de los investigadores que abordan temas

relacionados con el carbono. Hasta ahora, las regiones más estudiadas del Pacífico mexicano son el Sistema de la Corriente de California y el Golfo de California (Figura 4). En contraste, al momento de la generación de este documento, no se cuenta con información publicada sobre CID y FCO₂ en el Golfo de México. Para el caso del Mar Caribe mexicano, sólo se cuenta con un estudio publicado sobre FCO₂ (Wanninkhof *et al.*, 2007).

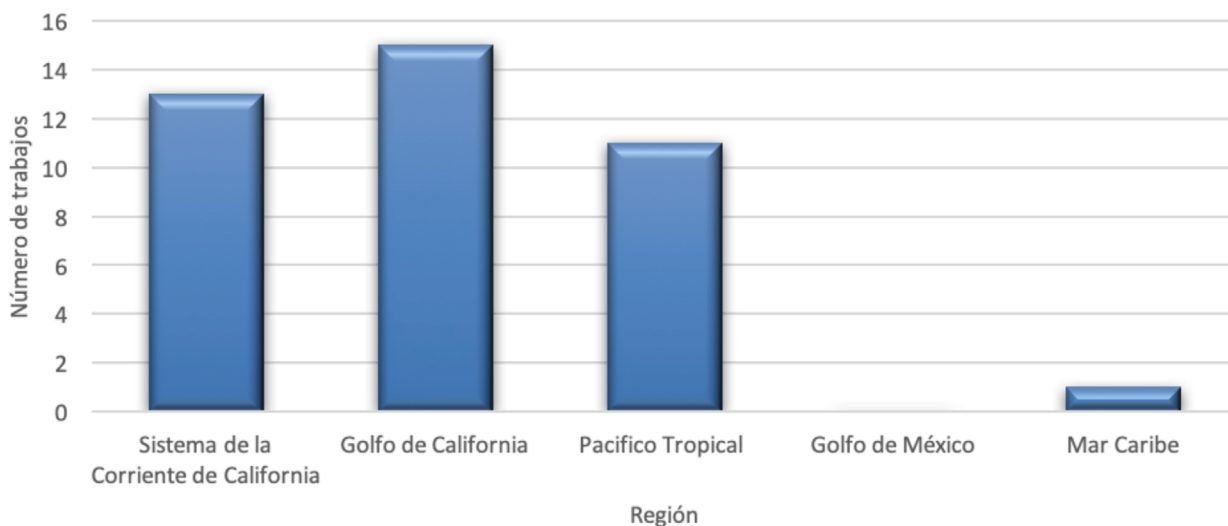


Figura 4. Estudios reportados por región geográfica de México.

Las diferentes regiones en las que se dividió el Pacífico mexicano obedecen a que, en cada una, ocurren diferentes procesos oceanográficos que modifican los valores de CID y FCO_2 (Figura 5). Las regiones de México que se han reportado como fuentes de CO_2 están generalmente asociadas a zonas de surgencias o zonas

con una mezcla vertical alta, mientras que las zonas que actúan como sumideros están asociadas o descritas como de productividad orgánica primaria (Figura 5). Así mismo, en las regiones menos dinámicas, la mayor cantidad del CO_2 en la columna de agua se mantiene en la capa subsuperficial.

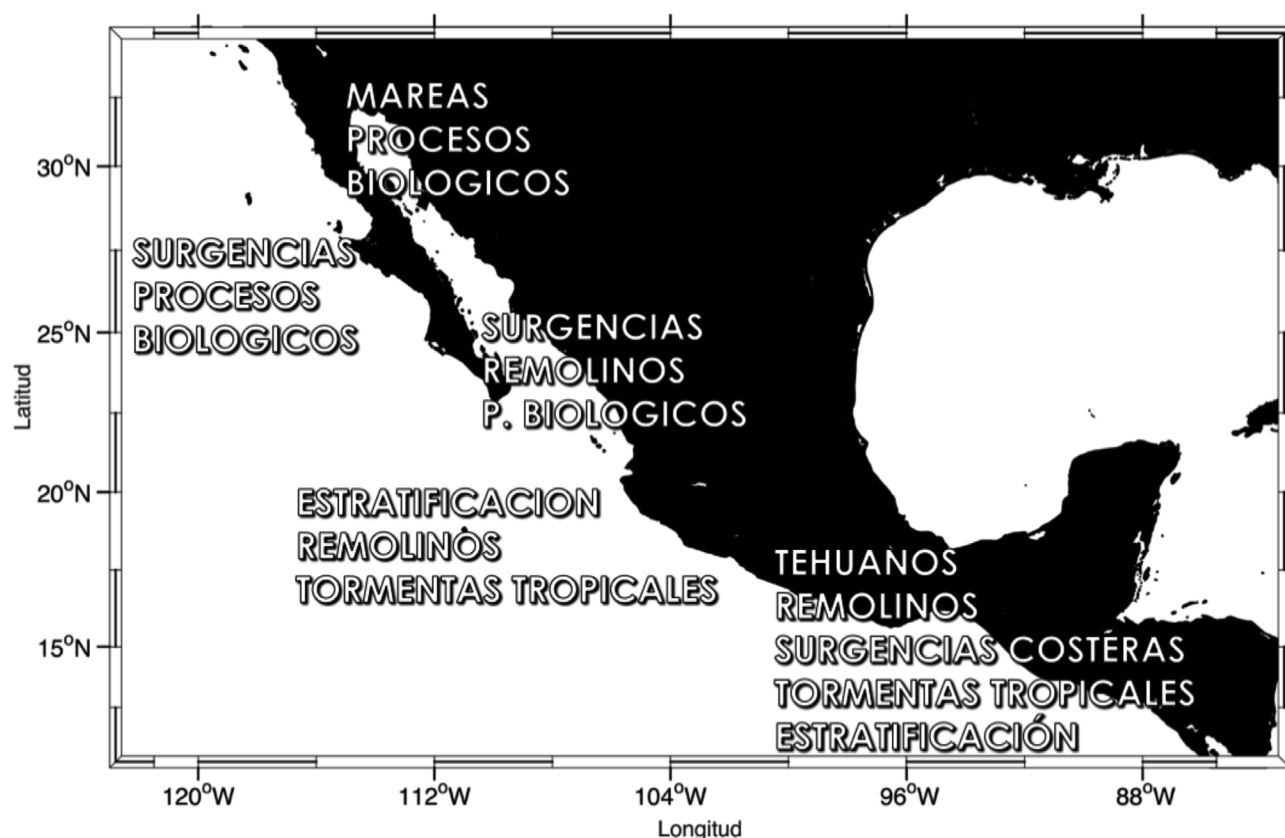


Figura 5. Procesos dinámicos dominantes en las distintas regiones oceanográficas del Pacífico mexicano.

Específicamente, la variabilidad temporal de CID y flujos de CO_2 en el sistema de la Corriente de California dependen, en gran medida, de las condiciones hidrográficas derivadas de la estacionalidad de las masas de agua que controlan los flujos de carbono superficiales, tal como la presencia del Agua del Subártico (ASA) y aguas subsuperficiales controladas por la Contracorriente de California (CCC), así como eventos de surgencia durante primavera y verano, y eventos ENSO (Oliva-Méndez *et al.*, 2013). Por otra parte, en el Golfo de California, el Agua del Golfo de California (AGC) de salinidad y temperatura altas (> 35.1 y $12-19^\circ\text{C}$) en superficie, confluye con el Agua Subs superficial Subtropical (ASsSt, $T = 9$ a 18°C y $S = 34.6-35.1$; Portela *et al.*, 2016, y $\text{CID} > 2200 \mu\text{mol}$

kg^{-1}). En la zona de las islas grandes (Tiburón y Ángel de la Guarda), al mezclarse el AGC con el ASsSt, por efecto de las corrientes asociadas a las mareas, el AGC se enriquece con CID (Gaxiola-Castro *et al.* 1978; Hidalgo-González *et al.*, 1997; Hernández-Ayón *et al.*, 2007b; Hernández-Ayón *et al.*, 2007c; Hernández-Ayón *et al.*, 2013).

En el Pacífico Tropical Mexicano (PTM) se conjuntan varias condiciones oceanográficas con características particulares: (1) la Zona del Mínimo de Oxígeno (ZMO), (2) la alberca de agua cálida (Fiedler y Talley 2006) y (3) valores altos de CID (valores mayores de $2270 \mu\text{mol kg}^{-1}$; Chapa-Balcorta *et al.*, 2015a). El PTM es una zona de transición tropical-subtropical con una dinámica muy compleja, misma

que abarca un área entre los 12 y 23 °N. A escala estacional, la circulación en la parte norte del PTM está dominada por la confluencia de la extensión tropical de la rama de la Corriente de California, CC (Godínez *et al.*, 2010) y la Corriente Costera Mexicana (Lavín *et al.*, 2006). En esta región el conocimiento sobre las fluctuaciones en la concentración del CID es escaso. Durante el verano, el PTM se estratifica por efecto de la temperatura (Fiedler *et al.*, 2013); dicha estratificación desaparece temporalmente por efecto de tormentas tropicales y huracanes, generando pulsos temporales y localizados de valores altos de CID en las regiones más ciclogénicas del Golfo de Tehuantepec (GT), así como en las zonas de trayectoria de dichos meteoros (Chapa-Balcorta *et al.*, 2016); si bien estos eventos episódicos son de corta duración (*i.e.*, en el orden de días), pueden generar cambios importantes en los valores de CID en superficie; por ejemplo, en junio de 2010 se observaron variaciones en el CID con valores de 1816 hasta 2093 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (Chapa-Balcorta *et al.*, 2015a). En el Golfo de Tehuantepec, en la parte sur del PTM, a las condiciones características del PTM se suma el efecto de los vientos Tehuanos, que son vientos de chorro intermitentes que ocurren de noviembre a abril, que cruzan el Istmo de Tehuantepec con velocidades mayores a 10 m s^{-1} , en eventos de uno a cuatro días de duración. Al entrar al GT, los vientos producen una mezcla intensa y abordamiento del agua subsuperficial, así como remolinos ciclónicos de mesoescala. Estos procesos afectan la concentración de CID y generan enriquecimiento en el agua superficial, además de remolinos anticiclónicos que hunden el agua rica en CID.

Cobertura espacio-temporal de la base de datos

A pesar de que existen 40 trabajos publicados sobre el CID y/o FCO_2 , estos se derivan de una base de datos limitada espacial y temporalmente. La figura 6 muestra la localización de las estaciones en las que

se tienen mediciones de CID a la fecha. Con excepción de aquellas estaciones cuyos datos aun no han sido publicados en algún medio escrito, la base de datos más completa y consistente corresponde a la región de la Corriente de California, en donde, a través del programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), se han generado datos durante aproximadamente 11 años. En el Golfo de California se generó una serie de tiempo mensual de septiembre de 2012 a agosto del 2012 ubicada en el arrecife Cabo Pulmo en una columna de agua de 20 m de profundidad (Norzagaray-López *et al.*, 2017) y campañas puntuales en la región de los umbrales de las grandes islas (Hidalgo-González *et al.* 1997; Hernández-Ayón *et al.*, 2013). También se cuenta con tres boyas oceanográficas ancladas en Baja California, Sinaloa y Colima (Figura 6).

En el PTM, a partir de actividades de investigación en colaboración con la Secretaría de Marina, se cuenta con datos de una campaña y tres estudios de muestreos costeros en la región central del PTM (Franco-Novela *et al.*, 2014; Sámano-Rodríguez y Sosa-Ávalos, 2014; Sosa-Ávalos *et al.*, 2015). Finalmente, para el Golfo de Tehuantepec se tienen datos de un muestreo en cada temporada representativa: no Tehuanos, junio de 2010; Tehuanos y post-Tehuanos, abril y noviembre de 2013 (Chapa-Balcorta *et al.*, 2015a; Chapa-Balcorta, 2016; Chapa-Balcorta *et al.*, 2017a; Chapa-Balcorta *et al.*, 2017b). También se cuenta con datos del transecto P18 del programa WOCE (Woce Hydrographic Programme, 2002) que atraviesan latitudinalmente el PTM. Lo anterior resulta en una cobertura espacial de aproximadamente el 50%. A pesar de que se cuenta con información en el PTM, a la fecha los estudios publicados son muy limitados en cobertura espacial y temporal, con excepción de los datos generados en la boya de Manzanillo, lo cual indica que aún quedan muchas incógnitas sobre la dinámica del CID y FCO_2 en estas regiones.

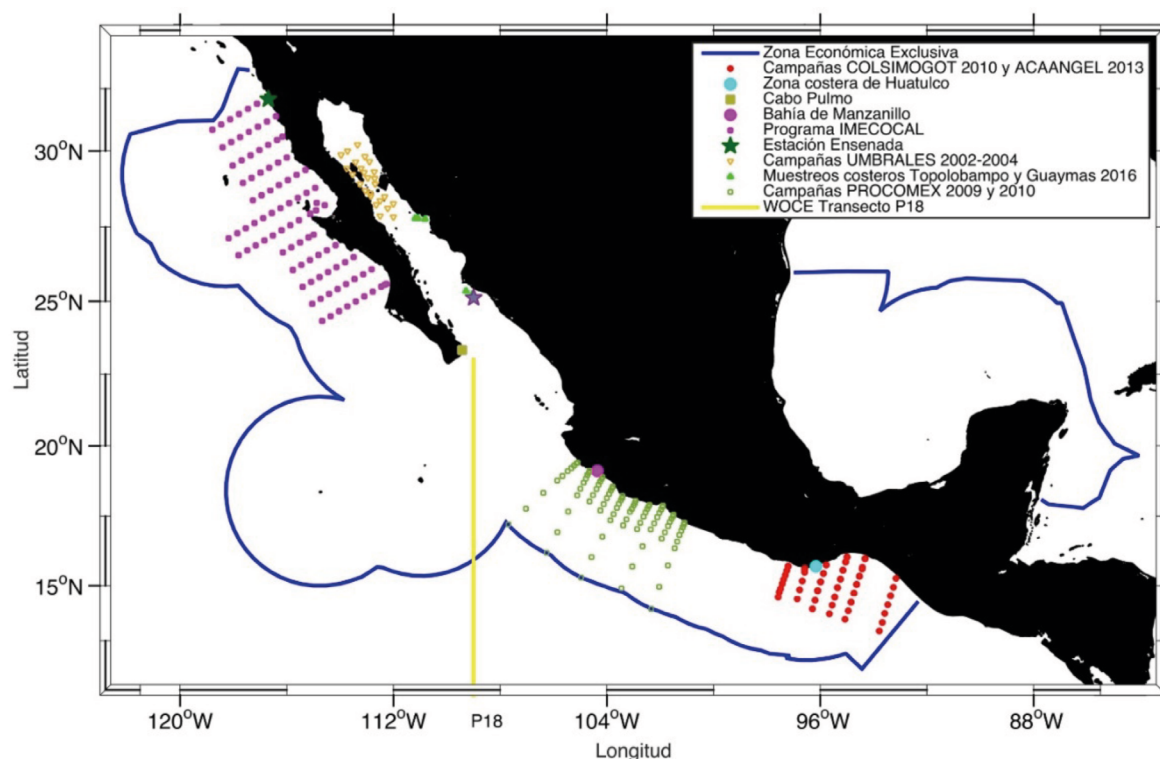


Figura 6. Cobertura espacial de estaciones de muestreo en donde se han reportado valores de CID y/o FCO₂ en mares de México, durante campañas de muestreo en los últimos 20 años.

Valores de CID y FCO₂

Los valores de CID varían ampliamente entre las diferentes regiones (Cuadro 1). Los mínimos y máximos se ubican en el Golfo de Tehuantepec. En esta región, los valores máximos ocurrieron durante el verano de 2010 (Chapa-Balcorta, 2016). Sin embargo, debido a que durante la temporada de vientos Tehuanos el muestreo es complicado, ya que los vientos intensos

limitan la navegación, solo es posible medir las variables de sistema del CO₂ días después de un evento Tehuano. En consecuencia, los cambios inmediatos no se han podido evaluar y es posible que los máximos sean más altos que los medidos. Sin embargo, considerando que el ASSSt es rica en CID (Gaxiola-Castro *et al.*, 1978; Franco-Novela *et al.*, 2014; Chapa-Balcorta *et al.*, 2015a), el enriquecimiento inicial podría ser aún mayor a lo reportado.

Cuadro 1. Intervalos de valores registrados de carbono inorgánico disuelto en mares mexicanos. Entre paréntesis se muestra la profundidad de muestreo.

Región	CID ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)		Referencias
	Mínimo	Máximo	
Region de la Corriente de California	2040 (0.5 m)	2240 (100 m)	Linacre <i>et al.</i> (2010)
Golfo de California	> 2150 (0.5 m)	2250 (100 m)	Gaxiola-Castro <i>et al.</i> (1978) Flores-Trejo <i>et al.</i> (2017); Norzagaray-López <i>et al.</i> (2017)
	2008 ± 48 (0.5 m)	2300 (100 m)	
Pacífico Tropical	< 1800 (0.5 m)	2400 (>30 m)	Chapa-Balcorta (2016); Franco-Novela (2009); Sosa-Ávalos <i>et al.</i> (2015)

Los flujos de carbono registrados varían ampliamente entre regiones. Los valores mínimos (*i.e.*, importantes sumideros de CO₂) se presentan en el Golfo de Tehuantepec durante temporada de

vientos Tehuanos, mientras que los valores máximos (*i.e.*, intensa fuente de CO₂) se reportan en la misma región durante la temporada de tormentas tropicales y huracanes (Cuadro 2; Chapa-Balcorta *et al.*, 2015b).

Cuadro 2. Intervalos de valores reportados de FCO₂ en mares mexicanos.

Región	FCO ₂ (mmol C m ⁻² d ⁻¹)		Referencia
	Mínimo	Máximo	
Región de la Corriente de California	-6.9	40	Muñoz-Anderson <i>et al.</i> (2015); Coronado-Álvarez <i>et al.</i> (2017)
Golfo de California	11.9	28.2	Bakker <i>et al.</i> (2016)
Pacífico Tropical	-23	72	Chapa-Balcorta <i>et al.</i> (2015b); Chapa-Balcorta (2016)
Golfo de México	-3.23	9.1	Robbins <i>et al.</i> (2014)
Mar Caribe	-0.27	-0.01	Wanninkhof <i>et al.</i> (2007)

DISCUSIÓN

La mayor parte de los estudios sobre CID y FCO₂ en los mares mexicanos corresponden a las regiones del Océano Pacífico, particularmente al noroeste (Coronado-Álvarez *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 (Flores-Trejo *et al.*, 2017; Gaxiola-Castro *et al.*, 1978; Hidalgo-González *et al.*, 1997; Hernández-Ayón *et al.*, 2007a y c; 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, 2014; Sánchez-Nava, 2015; Sosa-Ávalos *et al.*, 2013) y, en el Golfo de Tehuantepec (Chapa-Balcorta *et al.*, 2015a, Chapa-Balcorta 2016). Sin embargo, aun existen huecos de información y, en la mayoría de los casos, la información disponible es puntual. Se requiere generar más información, principalmente en la zona costera de los golfos de California y Tehuantepec, en donde sólo se presentan estudios puntuales y, en los casos que cuentan con series de tiempo, éstas aún no se han publicado. Esta necesidad quedó evidenciada con las series de tiempo relativamente largas (siete años) y de alta frecuencia de muestreo, como la que reportan Coronado-Álvarez *et al.* (2017) de datos obtenidos

con una boya oceanográfica anclada en una zona de surgencias del noroeste de Baja California. Durante la surgencia, la desgasificación del CO₂ en el océano (flujo de CO₂ del océano hacia la atmósfera) es rápida; ocurre durante las primeras horas después de que el agua alcanza la superficie en una zona de surgencia (Turi *et al.*, 2014) y, si se monitorea en ese momento, los resultados indicarán que la zona actúa como fuente de CO₂. Sin embargo, las aguas ascendentes están sobresaturadas con respecto al CO₂ atmosférico, con una pCO_{2w} alta, pero pueden volverse rápidamente insaturadas si ocurre un florecimiento fitoplanctónico (Simpson y Zirino 1980). El agua de surgencia también es rica en nutrientes y produce un incremento de la producción de fitoplancton. Durante las primeras horas de la surgencia, la desgasificación y el consumo de carbono por el fitoplancton combinan sus efectos para reducir la pCO_{2w}. Cuando la surgencia se relaja, la pCO_{2w} es baja y, posiblemente, la fotosíntesis es alta y continúa por cuatro o cinco días (Fassbender *et al.*, 2011) disminuyendo la pCO_{2w}, con un alto potencial de, incluso, revertir el flujo de CO₂, con valores negativos de FCO₂. Si se monitorea durante el relajamiento de surgencia, los valores de FCO₂ son negativos y la zona actúa como sumidero. Por lo tanto, los muestreos puntuales no son suficientes para tener una idea clara de los procesos que ocurren en la zona costera, susceptibles de modificar el CID y FCO₂. En

un monitoreo suficientemente largo es posible calcular el valor neto del intercambio de gases.

Si bien se ha avanzado en el monitoreo de las variables del sistema de los carbonatos, aún se requiere información con cobertura mayor, tanto espacial como temporal, para poder tener una mejor idea de las condiciones en que se encuentran los mares mexicanos. Esta condición ocurre también a escala global (Figura 7), en donde se observa que la mayoría de los estudios

publicados con respecto al sistema de los carbonatos, se generaron en la última década. Sin embargo, comparado con los valores globales, en México se realizaron cuatro estudios en 2010, mientras que a escala internacional fueron más de 100. Queda claro que México necesita invertir recursos económicos para generar recursos humanos y proyectos de investigación que aporten información sobre el sistema del CO₂ en el mar.

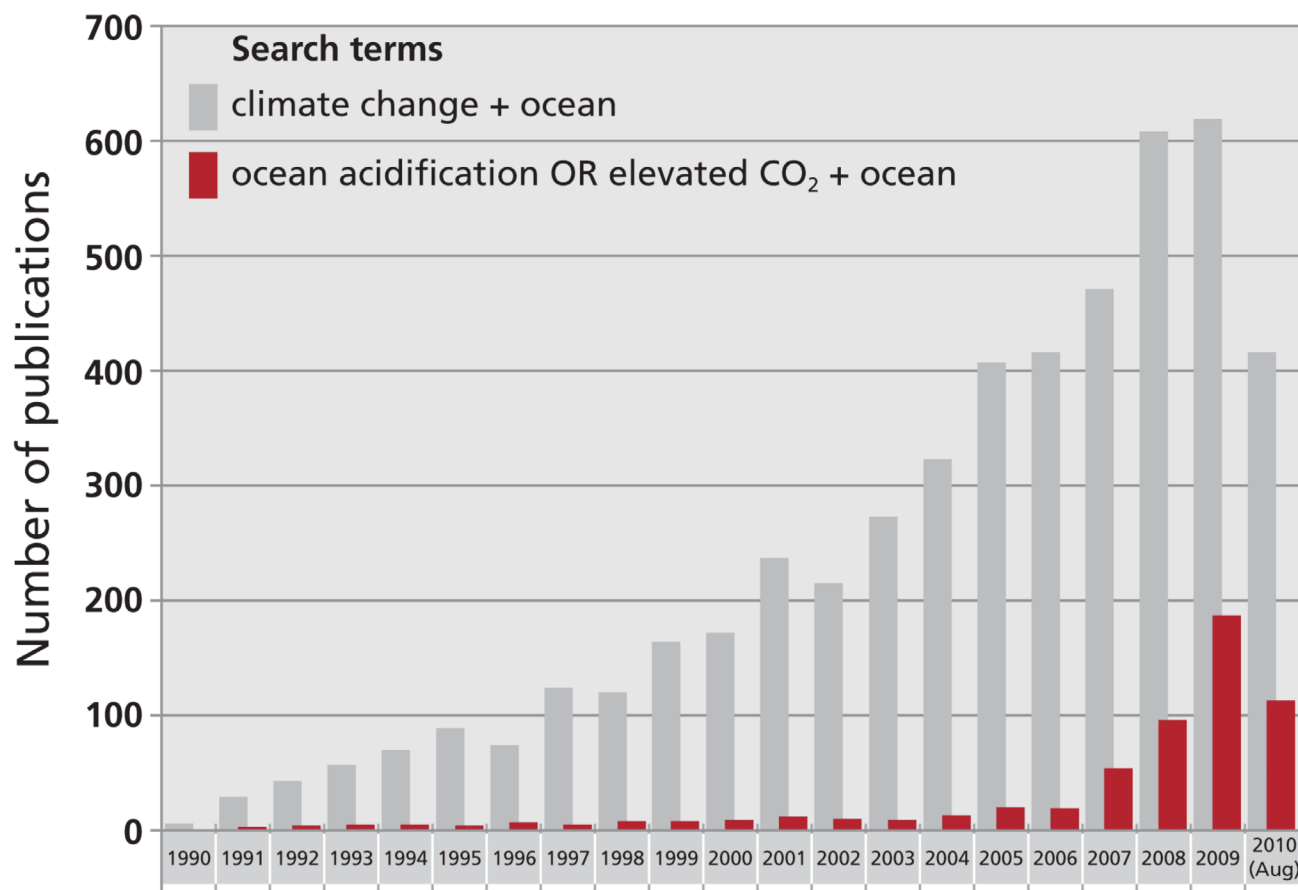


Figura 7. Cantidad de publicaciones arbitradas publicadas hasta 2010 sobre acidificación, en temas relevantes del sistema de carbonatos, a nivel mundial.

Modificado de http://www.igbp.net/images/18.1b8ae20512db692f2a680002742/1376383185145/NL76-cc-cousin-graph_hirez.gif.

Lo anterior, permitiría establecer una línea base de conocimientos sobre la cual evaluar los cambios relacionados con el calentamiento global y la acidificación del océano, así como generar bases de balances entre fuentes y sumideros de carbono. Además, se podrían caracterizar las fuentes y sumideros de carbono en el mar, lo cual forma parte de los compromisos de México ante el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) y hacer proyecciones

sobre las condiciones que enfrentarán los ecosistemas marinos en un futuro.

CONCLUSIONES

En los últimos años se ha incrementado el número de publicaciones sobre el CID y FCO₂ y se han diversificado los medios en los que se presenta la información relacionada con el sistema de carbonatos

en el mar; esta información se puede encontrar en artículos arbitrados, tesis y capítulos de libro. El Programa Mexicano del Carbono desempeña un papel importante en la difusión de resultados, ya que el 30% de los trabajos sobre CID y FCO₂ son capítulos de libro publicados por el PMC, sin embargo, es necesario incrementar los esfuerzos para generar una mayor cantidad de información. Actualmente, se cuenta con valores de *p*CO₂ superficial para una parte del océano Pacífico y Mar Caribe debido, principalmente, a la participación en barcos de oportunidad, los cuales reflejan solamente las condiciones de la superficie del océano. Con excepción de la región IMECOCAL y las boyas oceanográficas, los datos disponibles sobre las variables del sistema de carbonatos y los flujos de carbono en los mares mexicanos es escasa y puntual. Aunado a ello, existe una alta variabilidad temporal y espacial de CID y FCO₂. En consecuencia, existen muchos vacíos del conocimiento en torno al ciclo marino del carbono en mares mexicanos, lo cual limita la comprensión y cuantificación de su importancia. Debido a la alta variabilidad que puede llegar a tener el CID en el océano, es necesario incrementar la resolución espacial y temporal de los muestreos.

BASE DE DATOS

En seguimiento a la política del Programa Mexicano del Carbono de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones, así como en soporte de las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los revisores anónimos; sus comentarios enriquecieron la calidad y claridad del presente trabajo. CCB, JMHA forman parte del proyecto SEMARNAT-CONACYT No. 278637.

LITERATURA CITADA

Bakker, D. C. E., B. Pfeil, C. S. Landa, N. Metzl, K. M. O'Brien, A. Olsen, K. Smith, C. Cosca, S. Harasawa, S. D. Jones, S. Nakaoka, Y. Nojiri, U. Schuster, T. Steinhoff, C. Sweeney, T. Takahashi, B. Tilbrook, C. Wada, R. Wanninkhof, S. R. Alin, C. F. Balestrini, L. Barbero, N. R. Bates, A. A. Bianchi, F. Bonou, J. Boutin, Y. Bozec, E. F. Burger, W. -J. Cai, R. D. Castle, L.

Chen, M. Chierici, K. Currie, W. Evans, C. Featherstone, R. A. Feely, A. Fransson, C. Goyet, N. Greenwood, L. Gregor, S. Hankin, N. J. Hardman-Mountford, J. Harlay, J. Hauck, M. Hoppema, M. P. Humphreys, C. W. Hunt, B. Huss, J. S. P. Ibáñez, T. Johannessen, R. Keeling, V. Kitidis, A. Körtzinger, A. Kozyr, E. Krasakopoulou, A. Kuwata, P. Landschützer, S. K. Lauvset, N. Lefèvre, C. Lo Monaco, A. Manke, J. T. Mathis, L. Merlivat, F. J. Millero, P. M. S. Monteiro, D. R. Munro, A. Murata, T. Newberger, A. M. Omar, T. Ono, K. Paterson, D. Pearce, D. Pierrot, L. L. Robbins, S. Saito, J. Salisbury, R. Schlitzer, B. Schneider, R. Schweitzer, R. Sieger, I. Skjelvan, K. F. Sullivan, S. C. Sutherland, A. J. Sutton, K. Tadokoro, M. Telszewski, M. Tuma, S. M. A. C. van Heuven, D. Vandemark, B. Ward, A. J. Watson and S. Xu. 2016. A multi-decade record of high quality *f*CO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). 8:383-413. DOI:10.5194/essd8-383-2016.383-413.

Chapa-Balcorta, C. 2016. Dinámica del carbono inorgánico disuelto en el Golfo de Tehuantepec. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B. C.

Chapa-Balcorta, C., J. M. Hernández-Ayón, D. R. Beier Emilio, S. Alin and A. López-Pérez 2017a. Dissolved inorganic carbon, temperature and salinity measurement in the Gulf of Tehuantepec. PANGAEA. DOI:10.1594/PANGAEA.875604.

Chapa-Balcorta, C., J. M. Hernández-Ayón, R. A. López-Pérez, A. Siqueiros-Valencia, C. O. Norzagaray-López y R. A. Guerra-Mendoza. 2017b. Intercambio océano-atmósfera de CO₂ en un ecosistema coralino del Pacífico tropical mexicano. pp. 283-289. En: F. Paz y R. Torres (eds.) Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y la Universidad Autónoma de Baja California. Texcoco, Estado de México, México.

Chapa-Balcorta, C., J. M. Hernandez-Ayon, R. Durazo, E. Beier, S. R. Alin and A. López-Pérez. 2015a. Influence of post-Tehuano oceanographic processes in the dynamics of the CO₂ system in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. Journal of Geophysical Research: Oceans 120 12:7752-7770. DOI:10.1002/2015jc011249.7752-7770.

Chapa-Balcorta, C., M. Hernández-Ayón, R. Durazo-Arvizu y A. SiqueirosValencia 2015b. Flujos de carbono en el Golfo de Tehuantepec posterior a eventos Tehuanos. pp. 426-432. En: F. Paz, J. Wong y R. Torres (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. 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. 678 p.

- Coronado-Álvarez, L. L. A., S. Álvarez-Borrego, J. R. Lara-Lara, E. Solana-Arellano, J. M. Hernández-Ayón and A. Zirino. 2017. Temporal variations of water $p\text{CO}_2$ and the air–water CO_2 flux at a coastal location in the southern California Current System: diurnal to interannual scales. *Ciencias Marinas* 43:137-156.
- Coronado-Álvarez, L., R. Lara-lara, S. Alvarez-Borrego y C. Bazán-Guzmán. 2015. Coronado. Variabilidad de los flujos de CO_2 océano-atmósfera en las aguas costeras del norte de Baja California. pp. 435-443. En: 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. Texcoco, Estado de México, México.
- De la Cruz-Orozco, M. E., G. Gaxiola-Castro, J. García-Cordova, G. Friederich, F. Chavez, y J. Gómez-Valdés. 2007. Presión parcial del bióxido de carbono ($p\text{CO}_2$) frente a Baja California. pp. 165-180. En: B. Hernández de la Torre y G. Gaxiola Castro (eds.). Carbono en ecosistemas acuáticos de México. SEMARNAT, INE, CICESE, Ciudad de México, México.
- De La Cruz-Orozco, M. E., J. E. Valdez-Holguín, G. Gaxiola-Castro, M. Mariano-Matías y T. L. Espinosa-Carreón 2010. Flujos de CO_2 océano-atmósfera. pp. 197-208. En: G. Gaxiola-Castro y R. Durazo (eds.). Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- De la Cruz-Orozco, M. E., y G. Gaxiola-Castro. 2015. Sistemas de medición continua de $p\text{CO}_2$ en ambientes marinos mediante un analizador de Infrarrojo (LICOR). pp. 483-489. En: 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.
- Emerson, S. R. and J. Hedges, I. 2009. Chemical Oceanography and the Marine Carbon Cycle. Cambridge, Inglaterra. 453 p.
- Fassbender, A. J., C. L. Sabine, R. A. Feely, C. Langdon, and C. W. Mordy. 2011. Inorganic carbon dynamics during northern California coastal upwelling. *Continental Shelf Research* 31:1180-1192.
- Fiedler, P. C. and L. D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress In Oceanography* 69:143-180. DOI: 10.1016/j.pocean.2006.03.008.143-180.
- Fiedler, P. C., R. Mendelssohn, D. M. Palacios and S. J. Bograd. 2013. Pycnocline Variations in the Eastern Tropical and North Pacific, 1958–2008. *Journal of Climate* 26:583-599. DOI: 10.1175/jcli-d-11-00728.1.583-599.
- Flores-Trejo, L., T. L. Espinosa-Carreón, P. Morales-Urbina, I. Vázquez-Martínez, J. M. Hernández-Ayón y M. Norzagaray-Campos 2017. Variabilidad del carbono inorgánico disuelto frente a Navachiste, Sinaloa, en septiembre del 2016. pp. 189-194. En: F. Paz y R. Torres. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y la Universidad Autónoma de Baja California. Texcoco, Estado de México, México.
- Franco-Novela A. C., J. M. Hernández-Ayón, E. Beier, V. Garçon, H. Maske, A. Paulmier, J. Färber-Lorda, R. Castro and R. Sosa-Ávalos. 2014. Air-sea CO_2 fluxes above the stratified oxygen minimum zone in the coastal region off Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119:2923-2937. DOI: 10.1002/2013JC009337.
- Franco-Novela, A. 2009. Mediciones del sistema de carbono, oxígeno y nitratos en el Pacífico Mexicano en Condiciones de verano. Licenciatura en Oceanología, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B. C. 56 p.
- Gattuso, J. P., A. Magnan, R. Billé, W. W. L. Cheung, E. L. Howes, F. Joos, D. Allemand, L. Bopp, S. R. Cooley, C. M. Eakin, O. Hoegh-Guldberg, R. P. Kelly, H. O. Pörtner, A. D. Rogers, J. M. Baxter, D. Laffoley, D. Osborn, A. Rankovic, J. Rochette, U. R. Sumaila, S. Treyer, C. Turley. 2015. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO_2 emissions scenarios. *Science* 349(6243), aac4722. DOI: 10.1126/science.aac4722.
- Gaxiola-Castro, G., S. Alvarez-Borrego y R. A. Schwartzlose. 1978. Sistema del bióxido de carbono en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* 5:25-40.
- Godínez, V. M., E. Beier, M. F. Lavín and J. A. Kurczyn. 2010. Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *Journal of Geophysical Research* 115 C4. DOI: 10.1029/2009jc005705.
- Hernández-Ayón, J. M., A. Zirino, S. Marinone, R. Canino-Herrera y M. S. Galindo-Bect. 2003. Relación pH-densidad en el agua de mar. *Ciencias Marinas* 29:497-508.
- Hernández-Ayón, J. M., C. Chapa-Balcorta, F. Delgadillo-Hinojosa, V. F. Camacho-Ibar, M. Á. Huerta-Díaz, E. Santamaría-del-Angel, S. Galindo-Bect and J. A. Segovia-Zavala. 2013. Dynamics of dissolved inorganic carbon in the Midriff Islands region of the Gulf of California: Influence of water masses. *Ciencias Marinas* 39(2):183-201.
- Hernández-Ayón, J. M., F. Delgadillo-Hinojosa, T. Camiro-Vargas y M. López-Mariscal 2007c. Estudio de las variables del CO_2 en la región de las grandes islas del Golfo de California en condiciones de invierno. pp. 59-73. En: SEMARNAT. Carbono en ecosistemas acuáticos de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México.

- Hernández-Ayón, J. M., G. Gaxiola Castro, F. Chávez, T. Takahashi, D. Feely, C. Sabine, B. Hales y L. L. J. R. 2010. Variabilidad espacial y temporal del flujo de CO₂ océano-atmósfera. pp. 197-208. En: G. Gaxiola-Castro y R. Durazo (eds.). *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007*. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Hernández-Ayón, J. M., V. F. Camacho-Ibar, A. Mejía-Trejo y A. Cabello-Pasini. (eds). 2007b. Variabilidad del CO₂ Total durante eventos de surgencia en Bahía San Quintín Baja California, México. pp. 187-200. En: *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones Científicas y de Educación de Ensenada. México D. F.
- Hernández-Ayón, J., A. Zirino-Weiss, F. Delgadillo-Hinojosa y S. Galindo-Bect. 2007a. Carbono inorgánico disuelto en el Golfo de California en condiciones de verano. pp. 45-57. En: *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Mexico. México D. F.
- Hidalgo-González, R. M., S. Álvarez-Borrego, and A. Zirino. 1997. Mixing in the region of the midrift islands of the Gulf of California: Effect on surface pCO₂. *Ciencias Marinas* 23:317-327.
- IPCC. 2007. Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge.
- Lavín, M. F., E. Beier, J. Gómez-Valdés, V. M. Godínez and J. García. 2006. On the summer poleward coastal current off SW México. *Geophysical Research Letters* 33 2:L02601. DOI: 10.1029/2005gl024686.L02601.
- Le Quéré, C., R. Moriarty, R. Andrew, J. Canadell, S. Sitch, J. Korsbakken, P. Friedlingstein, G. Peters, R. Andres and T. Boden. 2015. Global Carbon Budget 2015. *Earth System Science Data* 7:349-396.
- Linacre, L., R. Durazo, J. M. Hernández-Ayón, F. Delgadillo-Hinojosa, G. Cervantes-Díaz, J. R. Lara-Lara, V. Camacho-Ibar, A. Siqueiros-Valencia and C. Bazán-Guzmán. 2010. Temporal variability of the physical and chemical water characteristics at a coastal monitoring observatory: Station ENSENADA. *Continental Shelf Research* 30:1730-1742. DOI: 10.1016/j.csr.2010.07.011.1730-1742.
- Millero, F. 2006. *Chemical Oceanography*. CRC Press. E.U.A., 496.
- Montes-Hugo, M. A., S. Álvarez-Borrego, 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* 24:483-490.
- Muñoz-Anderson, M. A., J. R. Lara-Lara, S. Alvarez-Borrego, C. Bazan-Guzman and M. de la Cruz-Orozco. 2015. Water-air carbon fluxes in the coastal upwelling zone off northern Baja California. *Ciencias Marinas* 41:157-168.
- Norzagaray-López, C. O., J. M. Hernández-Ayón, L. E. Calderon Aguilera, H. Reyes-Bonilla, C. Chapa-Balcorta and A. Ayala-Bocos. 2017. Aragonite saturation and pH variation in a fringing reef are strongly influenced by oceanic conditions. *Limnology and Oceanography*. DOI: 10.1002/lno.10571.62(6):2375-2388.
- Oliva-Méndez, N., M. Hernández-Ayón, V. Camacho-Ibar, F. Delgadillo-Hinojosa, V. Torres-Delgado, R. Lara-Lara y A. Siqueiros-Valencia. 2013. Presencia de aguas subsaturadas con respecto a aragonita en las costas de Baja California, México. pp. 428-436. En: F. Paz P., J. Wong G., M. Bazán y V. Saynes (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- Portela, E., E. Beier, E. D. Barton, R. Castro, V. Godínez, E. Palacios-Hernández, P. C. Fiedler, L. Sánchez-Velasco y A. Traviña. 2016. Water masses and circulation in the tropical Pacific off central Mexico and 1 surrounding areas. *Journal of physical oceanography*. *Journal of Physical Oceanography* 46:3069-3081.
- Reimer J. J., R. Vargas, S. V. Smith, R. Lara-Lara, G. Gaxiola-Castro, J. Martín Hernández-Ayón, A. Castro, M. Escoto-Rodríguez, J. Martínez-Osuna. 2013. Air-sea CO₂ fluxes in the near-shore and intertidal zones influenced by the California Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118: 4795-4810.
- Ribas-Ribas, M., J. M. Hernández-Ayón, V. F. Camacho-Ibar, A. Cabello-Pasini, A. Mejia-Trejo, R. Durazo, S. Galindo-Bect, A. J. Souza, J. M. Forja and A. Siqueiros-Valencia. 2011. Effects of upwelling, tides and biological processes on the inorganic carbon system of a coastal lagoon in Baja California. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* 95:367-376.
- Robbins, L. L., R. Wanninkhof, L. Barbero, X. Hu, S. Mitra, S. Yvon-Lewis, W-J. Cai, W. -J. Huang and T. Ryerson. 2014. Air-Sea Exchange. pp. 17-23. In: H. M. Benway and P. G. Coble (eds.). *Report of the U.S. Gulf of Mexico Carbon Cycle Synthesis Workshop, March 27-28, 2013*. Ocean Carbon and Biogeochemistry Program and North American Carbon Program.
- Rodríguez-Ibañez, C., S. Álvarez-Borrego, S. G. Marinone y J. R. Lara-Lara. 2013. El golfo de California es una fuente de bioxido de carbono hacia la atmósfera. *Ciencias Marinas* 39:137-150.
- Sabine, C. L., R. A. Feely, N. Gruber, R. M. Key, K. Lee, J. L. Bullister, R. Wanninkhof, Wong, K. J. D. Wallace, B. Tilbrook, F. J. Millero, T.-H. Peng, A. Kozyr, T. Ono y A. F. Rios. 2004. The Oceanic sink for antropogenic CO₂. *Science* 305:367-371.
- Sámamo-Rodríguez, C. A. y R. Sosa-Ávalos 2014. Variación temporal de pH y CID en las bahías de Manzanillo, Colima. pp. 451-456. En: F. Paz P., J. Wong G., M. Bazán y V. Saynes (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono*

- no y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- Sánchez-Nava, R. 2015. Flujos de CO₂ entra la atmósfera y las aguas costeras de las Bahías de Manzanillo y Santiago. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad de Colima. Manzanillo.
- Simpson, J. J., and A. Zirino. 1980. Biological control of pH in the Peruvian coastal upwelling area. *Deep-Sea Research* 27:733-743.
- Sosa-Ávalos, R., F. Chávez, G. Gaxiola-Castro y L. Silva-Iñiguez. 2015. Flujos de CO₂ entre la atmósfera y el océano en el Pacífico tropical mexicano. pp. 439-445. En: F. Paz, J. Wong y R. Torres (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. 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.
- Turi, G., Z. Lachkar, N. Gruber. 2014. Spatiotemporal variability and drivers of pCO₂ and air-sea CO₂ fluxes in the California Current System: an eddy-resolving modeling study. *Biogeosciences* 11:671-690.
- Wanninkhof, R., A. Olsen and J. Triñanes. 2007. Air-sea CO₂ fluxes in the Caribbean Sea from 2002-2004. *Journal of Marine Systems* 66:272-284.
- Woce Hydrographic Programme. 2002. Hydrochemistry measured on water bottle samples during DISCOVERER cruise 31DSC-GC94_3 on section P18N, PANGAEA.
- Zirino, A., M. Hernández-Ayon, R. A. A. Fuhrmanr, S. Álvarez-Borrego, G. Gaxiola-Castro, J. R. Lara-Lara y R. L. Bernstein. 1997. Estimaciones superficiales de pCO₂ en el Golfo de California a partir de mediciones continuas de pH e imágenes de satélite. *Ciencias Marinas* 23:1-22.