

Fernando Paz Pellat
Julio Wong González
Ruth Torres Alamilla
Editores



Serie: Síntesis Nacionales

Estado Actual
del Conocimiento
del Ciclo del Carbono
y sus Interacciones en México:
Síntesis a 2015

Programa Mexicano del Carbono

Programa Mexicano del Carbono

Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C.

Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco



Forma correcta de citar:

Paz, F., J. Wong y R. Torres (editores). 2015. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C y el Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Texcoco, Estado de México, México. ISBN en trámite. 678 p.

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.

Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015

Fernando Paz Pellat, Julio C. Wong González, Ruth Torres Alamilla

Editores

Programa Mexicano del Carbono.

Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C

Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Villahermosa, Tabasco

2015



CONTENIDO

CAPÍTULO 1: ECOSISTEMAS TERRESTRES 15

- | | | |
|------|---|-----|
| 1.1 | Perspectivas en la investigación de incendios forestales enfocadas a la captura y emisión de carbono | 17 |
| 1.2 | Factores de expansión de biomasa en tres especies arbóreas utilizadas en los sistemas agroforestales de café | 23 |
| 1.3 | Biocarbono como mejorador de vertisoles degradados del Bajío Michoacano | 29 |
| 1.4 | Emisiones de carbono por tala selectiva en el Ejido Caobas, municipio de Othón Blanco, Quintana Roo | 35 |
| 1.5 | Cambios de carbono orgánico del suelo en sistemas con especies arbóreas tropicales en la Huerta Jalisco | 40 |
| 1.6 | Estrategia de extrapolación para la estimación de biomasa forestal | 46 |
| 1.7 | Emisiones de gases de efecto invernadero –directos e indirectos- en diferentes sistemas agrícolas | 55 |
| 1.8 | Medición de emisiones de CO ₂ del suelo en bosque de pino-encino, y en maíz y nopal en el Suelo de Conservación del Distrito Federal | 62 |
| 1.9 | Cambios en el contenido de carbono de la biomasa aérea en el ANP del Nevado de Toluca | 69 |
| 1.10 | Comportamiento del carbono orgánico en suelos con diferentes usos en el del sitio Ramsar “Presa Manuel Ávila Camacho”, Puebla | 74 |
| 1.11 | Efecto de la pendiente y la elevación en la biomasa forestal, su aplicación para realizar estimaciones en el paisaje | 80 |
| 1.12 | Aporte de carbono orgánico al suelo por cuatro especies tropicales en la huerta Jalisco | 90 |
| 1.13 | Análisis de Ciclo de Vida para estimación de emisiones de gases de efecto invernadero por la producción de trigo en Sonora | 95 |
| 1.14 | Contenido de carbono en dos masas forestales con diferente historial de uso | 106 |

1.15	Toneladas de CO ₂ equivalente asociadas a las emisiones de gases de efecto invernadero del Valle del Yaqui, Sonora	112
1.16	Dinámica del carbono y actividades enzimáticas en bosque, maíz y nopal en el Suelo de Conservación del Distrito Federal	117
1.17	Captura de carbono en <i>Pinus cembroides</i> Zucc., medida a partir de anillos de crecimiento	125
1.18	Almacén de carbono en los suelos de la zona de influencia del meandro de La Piedad Michoacán	131
1.19	Efecto de la aplicación de vinazas tequileras en la emisión de gases efecto invernadero (GEI) como CO ₂ , N ₂ O and CH ₄ en un suelo agrícola	138
1.20	Next generation eddy flux stations: automated real-time onsite data processing and remote management of flux networks	150
1.21	Secuestro de carbono en suelos con déficit hídrico en la cuenca de la Paz, Baja California Sur, noroeste de México	154
1.22	Biomasa y Carbono aéreo en bosques tropicales secundarios de la Península de Yucatán	162
1.23	Efecto de la fertilización nitrogenada en la emisión de N ₂ O y el potencial de producción de maíz en el estado de Guanajuato	169
1.24	Almacenamiento de carbono en un sistema silvopastoril intensivo de <i>Leucaena leucocephala</i> y <i>Panicum maximum</i> , en Michoacán, México	179
1.25	Carbono retenido en la biomasa aérea, en una selva tropical de Yucatán, México	186
1.26	Carbono almacenado por <i>Pinus pringlei</i> Shaw en el Parque Estatal “Monte Alto”, Estado de México	194
1.27	Cambio de uso de la tierra y flujos de CO ₂ en el Monte Tláloc	200
1.28	Mapeo espacial de almacenes de carbono en el bosque templado del estado de Durango, México	204
1.29	Estimación de captura de carbono por la especie <i>Pinus hartwegii</i> en la vertiente nororiental del Parque Nacional Pico de Orizaba	210
1.30	Biomasa y almacenes de carbono en los bosques templados de Durango, México	217
1.31	Comparación entre datos MODIS y el modelo del ecosistema Forest-DNDC para la producción primaria bruta	223
1.32	The App SOC + a tool to estimate or/and calculate organic carbon in the soil profile	229
1.33	Soil & Environment un software para calcular el carbono orgánico del suelo y para escenarios de erosión y pérdida de carbono orgánico	236



1.34	Captura de Carbono en suelo, capa de fermentación y mantillo en Mazatlán Villa de Flores, Oaxaca: estudio de la materia orgánica por FTIR	244
1.35	Efecto de plaguicidas sobre la respiración de suelos cultivados con aguacate del Estado de Michoacán, México	251
1.36	Carbono del complejo suelo-mantillo bajo bosques de especies perennifolias y caducifolias en sistemas ribereños de montaña	256
1.37	Contenidos de carbono en suelos forestales de ribera de dos cuencas de la Reserva de la Biósfera los Volcanes	262
1.38	Evolución de CO ₂ y carbono de biomasa microbiana (CBM) de suelos ribereños en ecosistemas de montaña	269
1.39	Dinámica de carbono en un suelo con la adición de diferentes tipos de materia orgánica	277
1.40	Carbono orgánico del suelo e infiltración en la Reserva de la Biósfera Los Volcanes	283
1.41	La roza tumba y quema en el contexto de REDD+	292
1.42	Restauración del suelo y la captura de carbono como servicio ecosistémico de los pastizales áridos	300
1.43	Almacenamiento de carbono en Sistemas Ganaderos con Cercas Vivas de <i>Gliricidia sepium</i> en Tacotalpa, Tabasco, México	306
1.44	Almacenes de carbono en cafetales con distintos manejos en el Norte de Chiapas, México	311
1.45	Cuantificación del carbono orgánico del suelo en el Distrito de Riego 018, Colonias Yaquis, en el Sur de Sonora	320
1.46	Estimación de Productividad Primaria Bruta (PPB) en una selva baja caducifolia con modelos de eficiencia de uso de luz	326
1.47	Estudio preliminar de la fijación de carbono en la asociación <i>Leucaena leucocephala</i> + <i>Cynodon nlemfuensis</i> pastoreado con ovinos	335
1.48	Estimación de carbono almacenado en dos bosques de referencia del Monte Tláloc en Texcoco, Estado de México	341
1.49	Revisión y análisis de la información existente de datos de actividad en el Estado de México	347
1.50	Integración de una base de indicadores sociales, económicos y ambientales para la valoración de la oferta de servicios ecosistémicos en el Estado de México	354
1.51	Integración de una base geoespacial multi-temática para consulta y análisis de información satelital	364

1.52	Políticas públicas sobre prácticas de manejo de estiércol en México	374
1.53	Estimación de la fracción de la cubierta forestal con el uso de fotografía digital en bosques de referencia del Estado de México	383
1.54	Interpretación estructural y química de espacios meta-paramétricos asociados a la síntesis estructural-temporal de la habilitación de tepetates con plantas y enmiendas	390
1.55	Herramientas modernas que facilitan la identificación botánica	396
1.56	Cinética <i>In vitro</i> de bióxido de Carbono y metano en tres pastas de canola para su uso en rumiantes	402
1.57	Uso de tipos funcionales de plantas para la valoración de la diversidad vegetal	408
1.58	Hacia la modelación temporal de la descomposición de los cementantes orgánicos e inorgánicos en la formación de unidades estructurales y carbono orgánico asociado, en suelos a partir de tepetates	414
1.59	Contribución del sistema agroforestal cacao en el almacenamiento del carbono en el sureste de México	422
1.60	Modelos de Estados y Transiciones: Una herramienta para el Manejo Sustentable de Recursos Naturales asociados a Contenidos de Carbono	428

CAPÍTULO 2: ECOSISTEMAS ACUÁTICOS 438

2.1	Reforestación de áreas de manglar impactadas por dragados con <i>Conocarpus erectus</i> y <i>Rhizophora</i> mangle en la reserva de la Biosfera la Encrucijada de Chiapas, México	440
2.2	Aporte de CaCO ₃ por cocolitóforos y foraminíferos planctónicos en dos ambientes costeros contrastantes del Noroeste de México	443
2.3	Influencia de la intrusión anómala del Agua del Subártico en la producción primaria frente a Baja California	450
2.4	Concentración y distribución vertical del carbono particulado (total y orgánico) en los lagos de Montebello, Chiapas	457
2.5	Flujos de Carbono en manglares de escenario cárstico en Yucatán	464
2.6	Lagos tropicales profundos: ¿fuentes de CO ₂ a la atmósfera o sumideros de COP a los sedimentos?	473



2.7	CO ₂ antropogénico en el Golfo de México estimado a partir de la composición isotópica del carbono inorgánico disuelto	481
2.8	Variación de carbono orgánico disuelto en la cuenca del río Tula, Hidalgo	489
2.9	Lagunas costeras de la Península de Yucatán: fuente o sumidero de carbono, nitrógeno y fósforo	496
2.10	Flujos de carbono en el Golfo de Tehuantepec posterior a eventos Tehuanos	501
2.11	Variación en la capacidad fotosintética (V _c max y J _{max}) por la inundación y salinidad en árboles y herbáceas de humedales costeros	508
2.12	Flujos de CO ₂ entre la atmósfera y el océano en el Pacífico tropical mexicano	514
2.13	Variabilidad de alta frecuencia del fCO ₂ en la región sureña de la Corriente de California	521
2.14	Mediciones de alta frecuencia de pH, oxígeno y estado de saturación de aragonita en un arrecife: Cabo Pulmo (B.C.S.)	531
2.15	El papel de las selvas tropicales inundables en el almacén de carbono azul	537
2.16	Aplicación de una relación empírica para el estudio del sistema del CO ₂ en la región oceánica frente a Ensenada, B.C	547
2.17	Pesquerías costeras de Tabasco: problemáticas actuales y escenarios futuros ante el cambio climático	553
2.18	Almacén de Carbono en un sector (UJAT) de la vegetación riparia de la Laguna de las Ilusiones, Centro, Tabasco	560
2.19	Productividad marina en el Pacífico nororiental en el último milenio	565

CAPÍTULO 3: **DIMENSIÓN SOCIAL** **569**

3.1	Conformación de una Red Nacional de Laboratorios para el análisis de carbono en los suelos de México	571
3.2	El valor de las emisiones de carbono asociadas al sistema agrícola de roza, tumba y quema	578
3.3	Escenarios de captura de carbono en pastizales y rentabilidad económica mediante InVEST: caso Reserva de la Biosfera Janos, Chihuahua	587
3.4	La política de la calidad del aire y su relación con la reforma energética	595

3.5	The potential for REDD+ in Tropical Dry Forests	602
3.6	Estimación del consumo de leña y carbón vegetal en Xoxocotla, Veracruz	610
3.7	Evaluación del contenido de carbono orgánico en suelos del cultivo intensivo de nopal en la delegación Milpa Alta, D. F.	616
3.8	Valor funcional de <i>Arthrospira maxima</i> como ingrediente alimenticio	622
3.9	Usos del suelo y cambios de uso del suelo en los sistemas de producción de los municipios de Chiapas	631
3.10	Flujos de nutrientes y metabolismo neto del estero Algodones (eurihalino, subtropical) en el Golfo de California	639
3.11	Inventario de gases de efecto invernadero en el estado de Chiapas	646
3.12	Desarrollo de escenarios de mitigación para intervención con políticas públicas asociadas a REDD+ y RETUS en Chiapas	652

CAPÍTULO 4: BIOENERGÍA

657

4.1	Balance global de carbono y energía de la producción de aceites microbianos para biocombustibles avanzados a partir de glicerol residual de biodiésel	659
4.2	Cultivo de microalgas para la producción de biodiesel utilizando como medio de cultivo residuos agropecuarios	667
4.3	Colección de cultivos de microalgas oleaginosas, para la producción de biocombustibles	672

2.10 Flujos de carbono en el Golfo de Tehuantepec posterior a eventos Tehuanos

Chapa-Balcorta Cecilia^{1,2,3}; Hernández-Ayón Martín^{1,2}; Durazo-Arvizu Reginaldo¹ y Siqueiros-Valencia Arturo²

¹Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Apdo. Postal 453, Ensenada, Baja California, México.
Autor para correspondencia: jmartin@uabc.edu.mx

²Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Apdo. Postal 453, Ensenada, Baja California, México.

³Universidad del Mar, Ciudad Universitaria S/N, CP 70902, Puerto Ángel Oaxaca, México.

Resumen

El Golfo de Tehuantepec es una de las regiones más dinámicas del Pacífico Mexicano. En esta región el agua subsuperficial subtropical (ASsSt) está asociada a la zona del mínimo de oxígeno y a altas concentraciones de carbono inorgánico disuelto. En la mayor parte del Pacífico oriental tropical esta agua permanece bajo la superficie; sin embargo en regiones bajo la influencia de viento de chorro, como es el caso de Tehuantepec, dicha agua puede alcanzar la superficie e incrementar el flujo de CO₂ hacia la atmósfera. En contraste, el incremento de la productividad primaria puede promover una reversión de dicho flujo. En este estudio se analiza la importancia de la temporada de vientos Tehuanos sobre los flujos de CO₂ en el Golfo de Tehuantepec. Dichos flujos se calcularon a partir de mediciones del sistema de CO₂ en abril y noviembre de 2013. Los resultados indican que en noviembre existió un flujo entre -24 y +23 mmol m⁻² d⁻¹, con valores positivos en el 40% de las estaciones. En abril se observan flujos de -2.6 a +42 mmol m⁻² d⁻¹, con valores positivos en el 70% de las estaciones muestreadas. La suma de los flujos para cada temporada indica que el Golfo de Tehuantepec se comportó como un sumidero de CO₂ durante el muestreo de noviembre, mientras que en abril se comportó como fuente de CO₂ hacia la atmósfera. Dicha diferencia se atribuye a variaciones en la intensidad del viento, estratificación de la columna de agua, y abordamiento del ASsSt.

Palabras clave: Oaxaca, Pacífico Mexicano, intercambio océano-atmósfera.

Abstract

The Gulf of Tehuantepec is one of the most dynamic regions of the Mexican Pacific. In this region, the Subtropical Subsurface Water (StSsW) is linked to the oxygen minimum layer and high dissolved inorganic carbon concentrations. This water mass is under the thermocline at most of the eastern tropical Pacific; however, at regions influenced by wind such as Tehuantepec, this water may reach the surface and increase the CO₂ flux toward the atmosphere. In contrast, increases of primary production may reverse this flux. This study discusses the importance of the wind season on the air-sea CO₂ flux at the Gulf of Tehuantepec. Such fluxes were calculated from measurements of the CO₂ chemistry in April and November, 2013. Results indicate fluxes ranged from -24 to +23 mmol m⁻² d⁻¹ in November, with positive fluxes at 40% of the sampling sites. April registered fluxes from -2.6 to +34 mmol m⁻² d⁻¹, with positive fluxes at 70% of the sampling sites. The sum of fluxes for each season shows that the Gulf of Tehuantepec behaved as a CO₂ sink in November, while it acted as a CO₂ source on April. The difference is or could be attributed to the variability of wind speed, water column stratification and StSsW entrainment.

Key words: Oaxaca, Mexican Pacific, air-sea exchange.

Introducción

El Golfo de Tehuantepec es una región altamente dinámica, donde los vientos llamados “Tehuano” o “Tehuantepecanos” (velocidad 10 m s^{-1}) que ocurren de noviembre a marzo, producen fuertes cambios en la estructura de la columna de agua y en la circulación (Flores-Vidal *et al.*, 2014; Velázquez-Muñoz *et al.*, 2011) produciendo fuertes gradientes térmicos (hasta $8\text{ }^{\circ}\text{C}$) y remolinos de mesoescala, surgencias, entre otras estructuras. La intensa dinámica física se combina con la presencia del agua subsuperficial subtropical, que contiene el máximo de carbono inorgánico disuelto en el Pacífico Oriental (Franco *et al.*, 2014; Paulmier *et al.*, 2011); el cual al llegar a la superficie o al mezclarse con el agua superficial, podría promover un importante incremento en el flujo de CO_2 (FCO_2) hacia la atmósfera. En contraste, dicha agua también contiene altas concentraciones de nutrientes, derivadas de los procesos de remineralización de la materia orgánica, por lo que su ascenso fertiliza las aguas superficiales y promueve la productividad primaria (Müller-Karger y Fuentes-Yaco, 2000). Durante este proceso la asimilación de carbono inorgánico disuelto (CID) puede modular los flujos de CO_2 resultantes (Wang *et al.*, 2006). Por otro lado, son escasos los estudios relacionados con el intercambio océano atmósfera del CO_2 en México (De La Cruz-Orozco *et al.*, 2010; Franco *et al.*, 2014; Reimer *et al.*, 2013), por lo que su papel dentro del inventario nacional de carbono podría estar siendo subestimado. El presente trabajo tiene como objetivo contribuir al conocimiento y entendimiento de los flujos de carbono en el Golfo de Tehuantepec durante la temporada de viento así como proveer información base para su integración a inventarios nacionales y globales de carbono.

Materiales y métodos

Colecta y análisis de muestras

Se analizaron muestras de agua tomadas en 27 estaciones en el Golfo de Tehuantepec (Figura 1A) durante dos campañas de muestreo. La primera se llevó a cabo del 13 al 18 de abril de 2013, al final de la temporada de vientos, y posterior a cinco eventos Tehuanos (Figura 1B). La segunda se realizó del 20 de octubre al 19 de noviembre del mismo año. Ésta se realizó de manera intermitente al inicio de la temporada de vientos 2013-2014, durante la que ocurrieron tres eventos Tehuanos (Figura 1C). Los muestreos se llevaron a cabo a bordo de los buques de investigación oceanográfica “Altair” (abril) y “Río Suchiate” (noviembre), de la Secretaría de Marina.

Las muestras fueron colectadas en botellas Niskin de 5 l y una vez en superficie fueron extraídas y colocadas en botellas de borosilicato de sodio, fijadas con una solución concentrada de HgCl_2 y selladas con grasa Apiezon®. Se obtuvieron datos de temperatura y salinidad mediante lances de CTD SBE19.

Análisis de muestras y procesamiento de datos

Se midieron dos de las cinco variables del sistema del CO_2 . Debido a la disponibilidad de equipo, en las muestras de abril se midió DIC y pH y en las de noviembre se midió DIC y alcalinidad total (AT). La medición de DIC se llevó a cabo mediante coulometría, utilizando la técnica descrita por Johnson *et al.*, (1987). Alcalinidad total se midió mediante el método potenciométrico de Hernández-Ayon *et al.*, (2013). El pH en la escala de agua de mar se midió utilizando un método potenciométrico en celda cerrada (Dickson *et al.*, 2003). 24 h antes de la medición se obtuvo la pendiente del electrodo mediante buffers NBS 4.01 y 10.01. Los métodos se calibraron con material de referencia certificado generado por Andrew Dickson en Scripps Institution of Oceanography, de la Universidad de California, San Diego. A partir de dichas variables se calculó pCO_2 , mediante el programa CO2SYS. Para ello se utilizaron las constantes de disociación de Mehrbach y colaboradores, modificadas por Dickson *et al.*, (2003), así como los datos de temperatura, y

salinidad. Los valores de $p\text{CO}_2$ fueron a su vez empleados para calcular el flujo de CO_2 (FCO_2) océano-atmósfera ($\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) mediante la ecuación 1.

$$\text{FCO}_2 = K\alpha(\Delta p\text{CO}_2) \quad (1)$$

donde, K es la velocidad de transferencia del gas en función de la velocidad del viento (Wanninkhof, 1992); α es la solubilidad del CO_2 en el agua de mar a la temperatura y salinidad *in situ* calculada mediante las ecuaciones de Weiss (1974), y $\Delta p\text{CO}_2$ es la diferencia entre la presión parcial del CO_2 en el agua y en la atmósfera. Se utilizó el valor promedio de $p\text{CO}_2$ en la atmósfera de $398.35 \mu\text{atm}$ y de $395.11 \mu\text{atm}$ para abril y noviembre de 2013 respectivamente (<ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/>). Los datos de viento empleados se obtuvieron de imágenes satelitales SeaWinds de NOAA (Zhang *et al.*, 2006a y b). Para ello se obtuvieron los valores de magnitud del viento (m s^{-1}) ubicados en, o cerca de cada estación para los días en que se realizaron los muestreos, y se calculó el promedio por estación para cada muestreo. El error calculado para FCO_2 fue de $\pm 0.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para vientos débiles $\leq 2.5 \text{ ms}^{-1}$ (dicha condición fue dominante durante la campaña de muestreo) y un máximo de $1.3 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para vientos de mayor velocidad ($> 4 \text{ ms}^{-1}$). Para el caso de noviembre fue de 0.16 y $0.4 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para vientos débiles y fuertes, respectivamente. Se calculó el parámetro de estratificación con el método de Simpson y Bowers (1981), para los primeros 100 m de la columna de agua. Dicho parámetro es una medida de la energía necesaria para homogenizar la columna de agua.

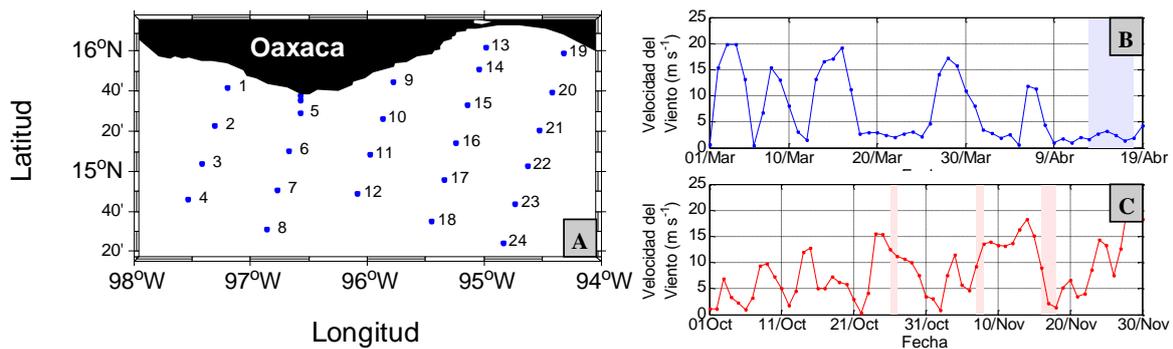


Figura 22. A= área de estudio y red de muestreo. Las estaciones 25-27 se localizan al norte de la estación 5, B= velocidad del viento previo y durante el muestreo de abril, y C= noviembre en $15^{\circ}30'$ Norte y 95° Oeste. Las áreas sombreadas indican las fechas de colecta (Datos satelitales de viento: <http://www.ncdc.noaa.gov>).

Resultados y discusión

Se discuten los flujos océano-atmósfera de CO_2 para abril y noviembre de 2013. Los valores positivos sugieren un flujo del océano hacia la atmósfera, mientras que los valores negativos sugieren lo contrario. En abril de 2013 se presentaron los flujos en un intervalo de valores de -2.6 a $+42 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Los mayores valores positivos se observan cercanos a la costa en las estaciones 9 y 15. La mayoría de las estaciones (70%) presenta valores positivos, de los cuales 16 fluctuaron entre 0 y $5 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Figura 2A), indicando un flujo predominante de CO_2 del océano hacia la atmósfera. Los máximos observados se encuentran por encima de los reportados para otras regiones del Pacífico Mexicano (Franco *et al.*, 2014; Reimer *et al.*, 2013) y para otras zonas del Pacífico oriental tropical.

En el muestreo de noviembre se observaron flujos entre -24 y $+23 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$. En este caso solamente el 40% de las estaciones presentó flujos positivos. La mayoría de las estaciones mostraron flujos entre -5 y $0 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Los mayores flujos de la atmósfera hacia el océano se observan en las estaciones localizadas en la región oriental del GT. Las estaciones que presentaron flujo del océano hacia la atmósfera se encuentran en la región media del área de estudio, con respecto a la costa. La diferencia entre ambos muestreos indica que las estaciones en la región

oriental así como las más cercanas a la región de influencia del viento presentan una mayor variación que el resto del área. La suma de los flujos para cada muestreo, así como el promedio de los flujos por muestreo indican que el Golfo de Tehuantepec se comportó como un sumidero de CO₂ durante el muestreo de noviembre ($\Sigma\text{FCO}_2 = -52.9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, FCO_2 promedio = $-2.3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), mientras que en abril se comportó como fuente ($\Sigma\text{FCO}_2 = +68.8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, FCO_2 promedio = $+3.6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) de CO₂ hacia la atmósfera. En ambos muestreos los máximos flujos positivos sobrepasaron los valores reportados en otras regiones del Pacífico mexicano en donde los valores más altos fueron de $4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Franco *et al.*, 2014; Reimer *et al.*, 2013). Así mismo los máximos positivos alcanzaron valores similares a otras regiones del Pacífico Oriental tropical como las regiones de surgencia frente a Perú. Los flujos negativos observados en noviembre también son mayores a los reportados para otras regiones del Pacífico mexicano (Franco *et al.*, 2014).

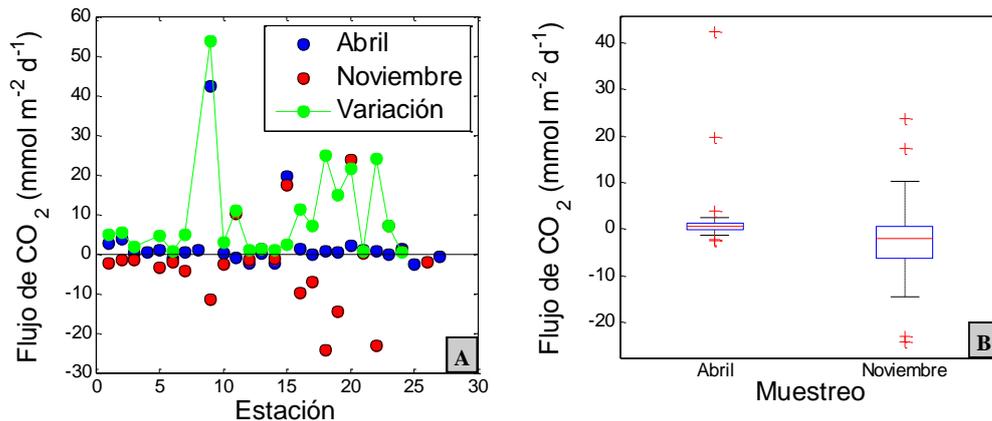


Figura 2. Flujos de CO₂ en el Golfo de Tehuantepec. Los valores positivos indican un flujo del océano a la atmósfera; valores negativos indican lo contrario. A= distribución por estación. La línea verde indica la diferencia entre abril y noviembre, y B= diagrama de cajas por muestreo.

Los resultados del muestreo de noviembre presentan una mayor variabilidad y sesgo hacia un sentido del flujo, en comparación con los datos de abril (Figura 2B). El muestreo de noviembre se realizó en medio de dos eventos tehuanos y es probable que sus efectos puedan haber producido una mayor heterogeneidad en la columna de agua. En contraste el muestreo de abril se realizó posterior al último evento tehuano, por lo que la circulación inducida por viento haya modificó las condiciones generadas inmediatamente después de los tehuanos, redistribuyendo el agua mezclada.

En ambos muestreos la región presenta unas zonas altamente estratificadas y otras altamente mezcladas (Figura 3). Si bien la relación entre estratificación y FCO₂ no es lineal, es posible observar que en abril, las regiones más estratificadas presentan un menor flujo de CO₂ entre el océano y la atmósfera. Las regiones con los mínimos de estratificación presentan una mayor variabilidad y mayores flujos de CO₂ hacia la atmósfera. En noviembre las regiones menos estratificadas actúan como fuente de CO₂ a la atmósfera, las zonas con estratificación media ($250\text{-}400 \text{ J m}^3$) funcionan principalmente como sumidero de CO₂ y en las más estratificadas el flujo es cercano a cero. Se observa una mayor variación en los valores del parámetro de estratificación en el muestreo de noviembre. La alta estratificación limita el intercambio de CO₂ entre el agua superficial y la subsuperficial (Franco *et al.*, 2014). Sin embargo no es el único factor que modula los flujos de CO₂ entre el océano y la atmósfera. Estos dependen de la concentración de carbono inorgánico disuelto la cual puede ser modificada por cambios en la influencia de las masas de agua que actúan como fuente de CO₂ (Hernández-Ayón *et al.*, 2013), en la velocidad del viento (Wanninkhof, 1992), así como procesos biogeoquímicos como son la fotosíntesis y la desnitrificación, entre otros (Bianchi *et al.*, 2005; Fennel *et al.*, 2008).

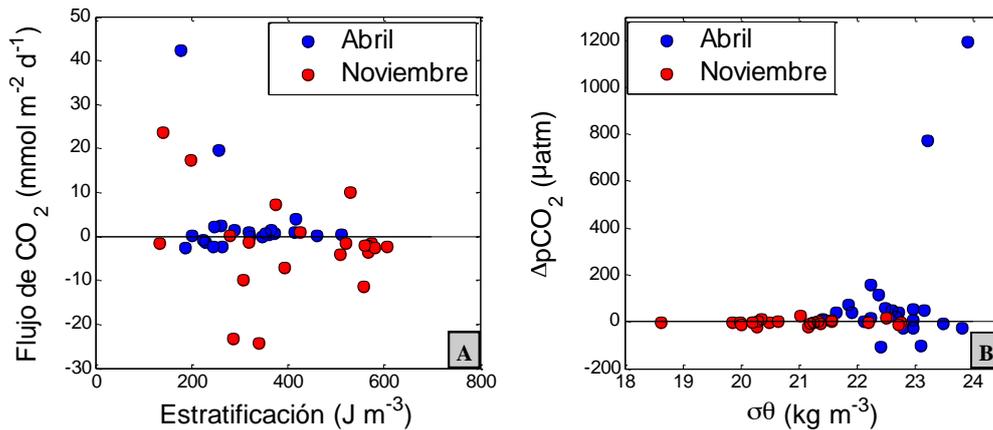


Figura 3. A= relación entre el flujo de CO₂ y la estratificación de la columna de agua, calculada con base en 5- 100 m., y B= relación entre la ΔpCO₂ con respecto a la densidad superficial.

La ΔpCO₂ (Figura 3B) presenta los mayores valores durante abril. Esto sugiere que en dicho mes, los flujos dependen más de la concentración de carbono inorgánico disuelto en el agua, en comparación con los datos de noviembre. Durante este mes el agua presentó una mayor densidad (21.4-23.8 kg m⁻³, promedio 22.6 kg m⁻³) que en el caso de noviembre (18.6 a 22.7 kg m⁻³, promedio 20.9 kg m⁻³). Los máximos positivos se encuentran en las regiones con mayor densidad (hasta 23.8 kg m⁻³), lo que sugiere una mayor influencia del agua subsuperficial subtropical y procesos de mezcla, ya que los máximos de ΔpCO₂ coinciden con los máximos de densidad y los mínimos de estratificación. En noviembre, se observan valores de ΔpCO₂ menores (<134 µatm) que en abril. En este caso, el viento está amplificando el intercambio océano-atmósfera. Para tener una idea de la magnitud de la influencia del viento, al calcular los flujos de noviembre utilizando los datos de viento del mes de abril, se obtiene un intervalo de valores entre -5 y +5 mmol m⁻² d⁻¹, es decir, el viento en noviembre está incrementando el flujo aproximadamente cuatro veces.

Otros factores que modifican los flujos de CO₂

Existen otros factores que pueden estar teniendo un papel importante en los flujos observados. La actividad fotosintética actúa como modulador de la intensidad y variabilidad de los flujos de CO₂ mediante la asimilación del carbono inorgánico disuelto (Wang *et al.*, 2006). Según Robles-Jarero y Lara-Lara (1993), en el Golfo de Tehuantepec dicha productividad es comparable con la encontrada en zonas de surgencia del Golfo de California y funciona como una bomba biológica de carbono. La influencia de los vientos tehuanos es tan intensa que las condiciones cambian de oligotróficas a eutróficas (Lluch-Cota *et al.*, 1997), por lo que la productividad que se genera durante la temporada de Tehuanos podría estar generando efectos importantes en los flujos de CO₂. Así mismo en las regiones costeras el proceso de desnitrificación incrementa la alcalinidad del agua y disminuye pCO₂ (Fennel *et al.*, 2008), lo que a su vez disminuye FCO₂. Para poder entender el papel de dichos procesos sobre los flujos de CO₂ es necesario desarrollar más estudios en la región que contemplen otras variables biogeoquímicas, que complementen la información presentada.

Conclusiones

Durante abril de 2013 el Golfo de Tehuantepec se comportó como una fuente de CO₂ hacia la atmósfera, con flujos positivos de CO₂ en el 70% de las estaciones, y alcanzó valores de hasta 42 mmol m⁻² d⁻¹. Los máximos valores positivos se presentaron en las áreas menos estratificadas y con agua de mayor densidad, lo que sugiere una mayor influencia del agua subsuperficial subtropical. Las estaciones más estratificadas presentaron flujos cercanos a 0 mmol m⁻² d⁻¹, ya que la estratificación de la columna de agua y un menor alcance del ASsSt contribuyen a disminuir el

intercambio de CO₂ entre el océano y la atmósfera. Así mismo, las áreas menos estratificadas presentan una mayor variabilidad.

En noviembre, el Golfo de Tehuantepec se comportó como sumidero de CO₂ aunque también existieron estaciones en donde los valores fueron positivos. Los altos flujos se deben principalmente al efecto del viento que magnificó el intercambio océano-atmósfera.

Los flujos de CO₂ observados, sugieren que las diferencias entre ambos muestreos se deben principalmente a variaciones en la intensidad del viento, estratificación de la columna de agua, y abordamiento del ASSt.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Marina por el acceso a los cruceros y los datos de CTD. Al C. Contralmirante CG DEM Carlos A. Abascal Andrade, Director General Adjunto de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología y al personal de la Estación de Investigación Oceanográfica de Salina Cruz por su apoyo logístico.

Bibliografía

- Bianchi A. A., L. Bianucci, A. R. Piola, D. R. Pino, I. Schloss, A. Poisson, C. F. Balestrini. 2005. Vertical stratification and air-sea CO₂ fluxes in the Patagonian shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 110:1-10.
- De La Cruz-Orozco M. E., J. E. Valdez-Holguín, G. Gaxiola-Castro, M. Mariano-Matías, T. L. Espinosa-Carreón. 2010. Flujos de CO₂ océano-atmósfera. Aspectos químicos. pp. 165-180.
- Dickson A., J. Afghan, G. Anderson. 2003. Reference materials for oceanic CO₂ analysis: a method for the certification of total alkalinity. *Marine Chemistry* 80:185-197.
- Fennel K., J. Wilkin, M. Previdi, R. Najjar. 2008. Denitrification effects on air-sea CO₂ flux in the coastal ocean: Simulations for the northwest North Atlantic. *Geophysical Research Letters* 35:5 pp.
- Flores-Vidal X., R. Durazo, L. Zavala-Sansón, P. Flament, C. Chavanne, F. J. Ocampo-Torres, C. Reyes-Hernández. 2014. Evidence of inertially generated coastal-trapped waves in the eastern tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119:3121-3133.
- Franco A. C., J. M. Hernández-Ayón, E. Beier, V. Garçon, H. Maske, A. Paulmier, J. Färber-Lorda, R. Castro, R. Sosa-Ávalos. 2014. Air-sea CO₂ fluxes above the stratified oxygen minimum zone in the coastal region off Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119:2923-2937.
- Hernández-Ayón J. M., C. Chapa-Balcorta, F. Delgadillo-Hinojosa, V. F. Camacho-Ibar, M. A. Huerta-Díaz, E. Santamaría-del-Angel, S. Galindo-Bect, 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* 39:183-201.
- Johnson K., J. Sieburth, P. Williams, L. Brändström. 1987. Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: Automation and calibration. *Marine Chemistry* 21:117-133.
- Lluch-Cota S. E., S. Alvarez-Borrego, E. Santamaria-Angel, F. Muller-Karger, S. Hernandez-Vazquez. 1997. The Gulf of Tehuantepec and adjacent areas: spatial and temporal variation of satellite-derived photosynthetic pigments. *Ciencias Marinas* 23:329-340.
- Müller-Karger F. E., C. Fuentes-Yaco. 2000. Characteristics of wind-generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research* 105:1271-1284.
- Paulmier A., D. Ruiz-Pino, V. Garçon. 2011. CO₂ maximum in the oxygen minimum zone (OMZ). *Biogeosciences* 8:239-252.
- 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.
- Robles-Jarero E. G., J. R. Lara-Lara. 1993. Phytoplankton biomass and primary productivity by size classes in the Gulf of Tehuantepec, México. *Journal of Plankton Research* 15:1341-1358.
- Simpson J., D. Bowers. 1981. Models of stratification and frontal movement in shelf seas. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 28:727-738.
- Velázquez-Muñoz F. A., J. A. Martínez, C. Chavanne, R. Durazo, P. Flament. 2011. Wind-driven coastal circulation in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Ciencias Marinas* 37:443-456.
- Wang X., J. R. Christian, R. Murtugudde, A. J. Busalacchi. 2006. Spatial and temporal variability of the surface water pCO₂ and air-sea CO₂ flux in the equatorial Pacific during 1980–2003: A basin-scale carbon cycle model. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 111:18 pp.
- Wanninkhof R. 1992. Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean. *Journal of Geophysical Research* 97:7373-7382.
- Weiss R. F. 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry* 2:203-215.

- Zhang H. M., J. J. Bates, R. W. Reynolds. 2006a. Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed. *Geophysical Research Letters* 33:5 pp.
- Zhang H. M., R. W. Reynolds, J. J. Bates. 2006b. Blended and Gridded High Resolution Global Sea Surface Wind Speed and Climatology from Multiple Satellites: 1987 - Present. American Meteorological Society 2006 Annual Meeting, Atlanta, GA, USA.