

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](http://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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O and CH <sub>4</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>3</sub> 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 <sub>2</sub> a la atmósfera o sumideros de COP a los sedimentos?	473



2.7	CO <sub>2</sub> 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 <sub>cmax</sub> y J <sub>max</sub> ) por la inundación y salinidad en árboles y herbáceas de humedales costeros	508
2.12	Flujos de CO <sub>2</sub> entre la atmósfera y el océano en el Pacífico tropical mexicano	514
2.13	Variabilidad de alta frecuencia del fCO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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



## 2.3 Influencia de la intrusión anómala del Agua del Subártico en la producción primaria frente a Baja California

Espinosa-Carreón Leticia<sup>1</sup>; Gaxiola-Castro Gilberto<sup>2</sup>; Durazo Reginaldo<sup>3</sup>; De la Cruz-Orozco Martín<sup>2</sup>; Norzagray-Campos Mariano<sup>1</sup>; Solana-Arellano Elena<sup>4</sup> y Sosa-Ávalos Ramón<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa, Blvd. Juan de Dios Bátiz Paredes No. 250, San Joaquín, CP 81101, Guasave, Sinaloa. Autor para correspondencia: leticiaesp@gmail.com

<sup>2</sup>Departamento de Oceanografía Biológica, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, CP 22860, Ensenada, Baja California.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, AP 453, Ensenada, Baja California.

<sup>4</sup>Departamento de Ecología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, CP 22860, Ensenada, Baja California.

<sup>5</sup>Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, Universidad de Colima, Carretera Manzanillo-Cihuatlán, km 20, Manzanillo, Colima.

### Resumen

La región sur de la Corriente de California (CC) representa un ambiente transicional, con influencia de agua de baja temperatura y salinidad durante primavera y verano, y agua cálida y salada de origen tropical y subtropical al final del verano y otoño. De 2002 a 2006 se registraron condiciones anómalas del Agua del Subártico (ASA) modificando el ecosistema epigelágico afectando la biomasa y la producción del fitoplancton. El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de la intrusión anómala del ASA en la producción del fitoplancton frente a Baja California en 2002 y 2005 como años contrastantes. Se realizaron experimentos fotosíntesis-irradiancia y se estimó la producción primaria con el método de Herman y Platt (1986), en 2002 y 2005. Los resultados mostraron que la invasión anómala fue más fuerte en 2005, registrándose anomalías negativas promedio de clorofila ( $< -0.4 \text{ mg m}^{-3}$ ) asociadas a anomalías negativas de salinidad ( $< -0.02$ ). Los parámetros fotosintéticos promedio (coeficiente de máxima utilización de luz ( $\alpha^B$ ) y tasa de fotosíntesis máxima ( $P_m^B$ )) fueron de un orden de magnitud más altos en 2005 que en 2002 ( $p < 0.01$ ). La producción primaria en 2002 fue ligeramente superior ( $907 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) a la registrada en 2005 ( $750 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), la baja diferencia sugiere una aclimatación fisiológica de las células en 2005.

**Palabras clave:** carbono, Corriente de California, biomasa fitoplanctónica, parámetros fotosintéticos.

### Abstract

The southern region of the California Current (CC) off Baja California represents a transitional environment, with the influence of low temperature and less saline CC water during spring and summer, and warm and salty tropical and subtropical conditions through the end of summer and autumn. From 2002 to 2006, an anomalous subarctic water (SAW) intrusion generated changes in the epipelagic ecosystem dynamics, affecting phytoplankton biomass and primary production. The goal of the present work is to show the effects of the SAW intrusion off Baja California in the phytoplankton production during the two contrasting years 2002 and 2005. We realized photosynthesis-irradiance experiments and determined the primary production with Herman and Platt (1986), method in 2002 and 2005. Our results show the anomalous invasion was more pronounced in 2005, the mean chlorophyll concentration was low ( $< -0.4 \text{ mg m}^{-3}$ ) and associated with negative salinity anomalies ( $< -0.02$ ). The mean values of the photosynthetic parameters (maximum light utilization coefficient ( $\alpha^B$ ) and maximum photosynthesis rate ( $P_m^B$ )) were one order of magnitude higher in 2005 compared to 2002 ( $p < 0.01$ ). The primary production was slightly

higher in 2002 (mean values of  $907 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) than in 2005 ( $750 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), the low differences suggest a phytoplankton physiological acclimatization in 2005.

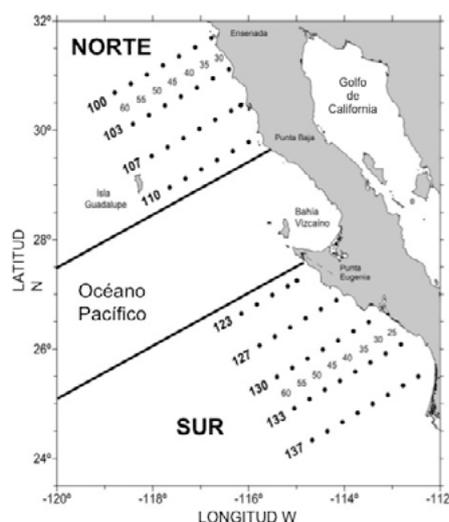
**Key words:** carbon, California Current, phytoplankton biomass, photosynthetic parameters.

## Introducción

La región sur de la Corriente de California (CC) en Baja California representa un ambiente transicional, con influencia de baja temperatura y salinidad durante primavera y verano (Durazo y Baumgartner, 2002) y con aguas cálidas y saladas de aguas tropicales y subtropicales a finales de verano y otoño (Bograd *et al.*, 2000; Durazo, 2009). El flujo de la CC hacia el Ecuador contribuye en importantes procesos de mesoescala, como frentes (Gaxiola-Castro y Alvarez-Borrego, 1991), surgencias costeras (Zaytsev *et al.*, 2003), y remolinos recurrentes (Soto-Mardones *et al.*, 2004). Lo que induce una fuerte variabilidad estacional en la producción biológica (Henson y Thomas, 2007a y b). En 2002-2003 se presentó un evento El Niño débil, mientras que en 2005-2006 se presentó un evento El Niño fuerte (Goericke *et al.*, 2005; Peterson *et al.*, 2006; Schwing *et al.*, 2002; Venrick *et al.*, 2003), y el sistema epipelágico frente a Baja California presentó una intrusión anómala de agua con baja salinidad, identificada como una presencia inusual del Agua del Subártico (ASA). El objetivo de este trabajo fue conocer la respuesta de la influencia de la intrusión anómala del ASA en la producción del fitoplancton frente a Baja California en 2002 y 2005 como años contrastantes.

## Materiales y métodos

En los meses de enero abril, julio y octubre de los años 2002 y 2005 frente a Baja California se realizaron campañas oceanográficas como parte del programa de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL). En las campañas se realizaron 85 estaciones de muestreo, pero en este trabajo se utilizaron las secciones 100, 103, 107 y 110 para la zona norte y las secciones 123, 127, 130, 133 y 137 para la sur (Figura 1) de acuerdo a la regionalización propuesta por Durazo (2009). En cada estación se realizaron perfiles de conductividad, temperatura y presión (CTD) por medio de un Sea-Bird plus. La salinidad fue derivada de estas mediciones. Para calcular la salinidad de largo-periodo se utilizaron las mediciones históricas del IMECOCAL de 1988 a 2013.



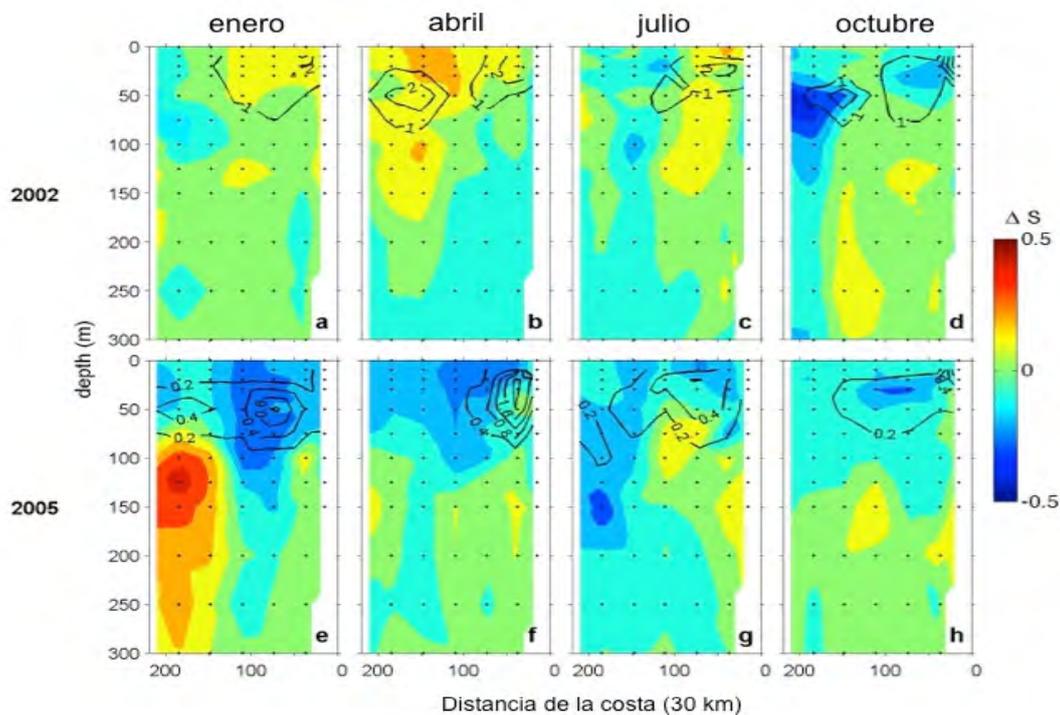
**Figura 1.** Área de estudio. Estaciones de muestreo en enero, abril, julio y octubre de 2002 y 2005. Las líneas diagonales separan las zonas norte y sur.

La concentración de clorofila fue obtenida de profundidades discretas con botellas Niskin de 5 l a profundidades estándar de 0, 10, 20, 30, 50, 100, 150 y 200 m. Adicionalmente a un nivel del 30% de irradiancia superficial se obtuvieron muestras de agua para experimentos fotosíntesis-irradiancia (PI). Con las mediciones de clorofila al 30% se normalizaron las estimaciones de producción primaria (P) derivadas de las curvas PI para estimar los parámetros fotosintéticos descritos por Herman y Platt (1986) y Côté y Platt (1983).

Para conocer la estimación de la producción primaria integrada en la zona eufótica, se utilizó el modelo de Herman y Platt (1986) considerando la irradiancia y la clorofila a diferentes profundidades, los parámetros fotosintéticos y el coeficiente de atenuación de la columna de agua.

## Resultados

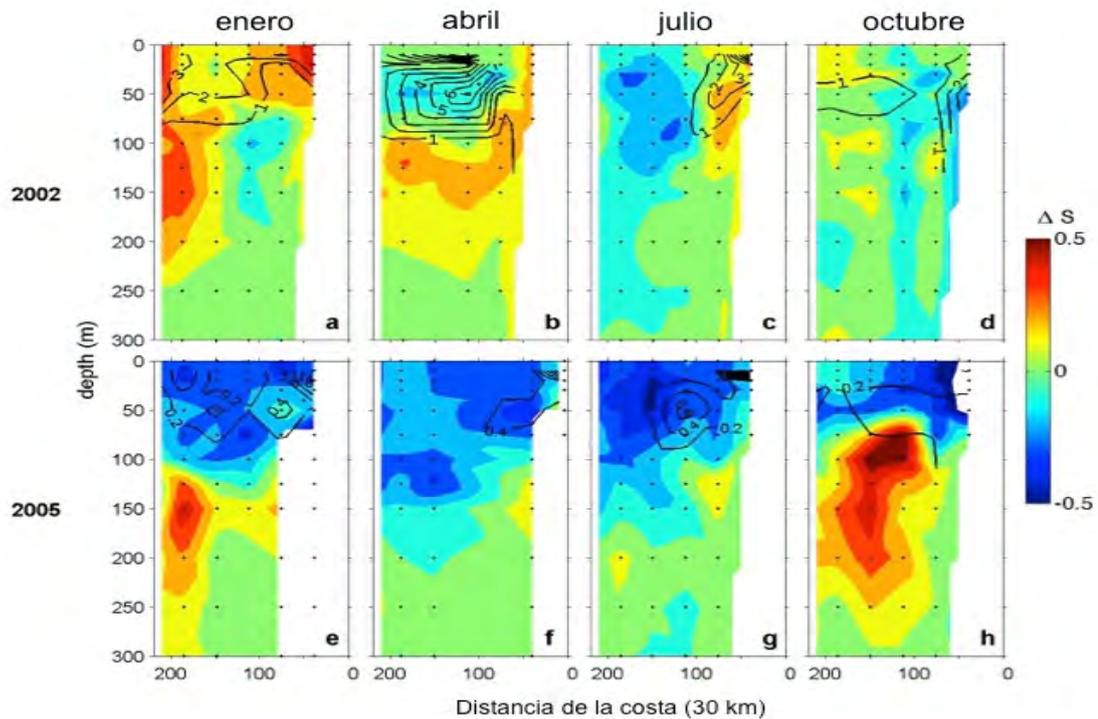
Las fuertes anomalías de salinidad fueron asociadas a la elevada concentración de clorofila en ambas zonas y años, pero con una fuerte variabilidad estacional en la zona sur (Figura 2 y Figura 3). En la zona norte, el máximo subsuperficial de clorofila (MSC) ( $> 2.0 \text{ mg m}^{-3}$ ) se localizó entre 10-50 m, asociado a anomalías positivas de salinidad ( $> 0.4$ ) en enero, abril y julio 2002 (Figura 2a-c), con anomalías negativas ( $< -0.2$ ) en octubre 2002 (Figura 2d). En 2005, el MSC disminuyó ( $> 0.4 \text{ mg m}^{-3}$ ) y fue asociado a anomalías negativas ( $< -0.3$ ) en enero (Figura 2e). Altas concentraciones de clorofila en 2005 fueron asociadas a la zona costera en abril (Figura 2f).



**Figura 2.** Anomalías de salinidad (contornos de color) y concentraciones de clorofila ( $\text{mg m}^{-3}$ , líneas negras) para la zona norte (sección 107, Figura 1) de: a) enero, b) abril, c) julio y d) octubre de 2002; y e) enero, f) abril, g) julio y h) octubre de 2005. La anomalía positiva (rojo) o negativa (azul) es con respecto al promedio de largo periodo (1998-2013). Los intervalos de los contornos de clorofila son de  $1.0 \text{ mg m}^{-3}$  para 2002 y de  $0.2 \text{ mg m}^{-3}$  para 2005.

En la zona sur, la estacionalidad de salinidad y clorofila fueron más fuertes. Las condiciones más contrastantes se registraron en enero y julio 2002. En enero, las anomalías positivas de salinidad ( $> 0.4$ ) y altas concentraciones de clorofila ( $> 1 \text{ mg m}^{-3}$ ) se observaron en todas las secciones (Figura 3a), mientras que en julio, ambas condiciones se replegaron a la costa (Figura 3c). En abril 2002, el MSC ( $> 0.4 \text{ mg m}^{-3}$ ) fue asociado a anomalías negativas de salinidad ( $< -0.2$ ) (Figura 3b). En 2005

se observó una disminución considerable de clorofila ( $< 0.6 \text{ mg m}^{-3}$ ) asociada a anomalías negativas de salinidad ( $< 0.3$ ) (Figura 3e-h).



**Figura 3.** Anomalías de salinidad (contornos de color) y concentraciones de clorofila ( $\text{mg m}^{-3}$ , líneas negras) para la zona norte (sección 127, Figura 1) de a) enero, b) abril, c) julio y d) octubre de 2002; y e) enero, f) abril, g) julio y h) octubre de 2005. La anomalía positiva (rojo) o negativa (azul) es con respecto al promedio de largo periodo (1998-2013). Los intervalos de los contornos de clorofila son de  $1.0 \text{ mg m}^{-3}$  para 2002 y de  $0.2 \text{ mg m}^{-3}$  para 2005.

Todos los parámetros físicos excepto  $E_{\text{PAR}}$  ( $\text{TCM}$ ,  $\text{SCM}$ ,  $\text{Phi}$ ,  $K_{\text{PAR}}$  y  $Z_{\text{eu}}$ ) tuvieron diferencias significativas entre años ( $p < 0.01$ ). En promedio  $\text{TCM}$ ,  $\text{Phi}$ ,  $K_{\text{PAR}}$  y  $Z_{\text{eu}}$  se incrementaron de 2002 a 2005, mientras que  $\text{SCM}$  disminuyó (Cuadro 1). Los parámetros fotosintéticos ( $\alpha^{\text{B}}$  máximo coeficiente de utilización de luz y  $P^{\text{B}}_{\text{m}}$  máxima tasa de fotosíntesis) tuvieron diferencias significativas entre años, estaciones y zonas ( $p < 0.01$ ). En 2005  $\alpha^{\text{B}}$  fue en promedio cinco veces más alta y  $P^{\text{B}}_{\text{m}}$  fue dos veces alta que en 2002. La producción primaria estimada con el modelo de Herman y Platt (1986) ( $\text{PP}_{\text{HP}}$ ) indicó que en 2002 fue ligeramente superior ( $907 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) a la registrada en 2005 ( $750 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).

## Discusión

Los cambios en las condiciones hidrográficas en 2005 comparadas a 2002 pueden estar asociados a condiciones remotas como forzamientos locales. Por un lado, la presencia anómala del ASA en verano y otoño 2002 puede ser resultado de anomalías atmósfera-oceano en el Océano Pacífico nororiental. Lo que podría inducir a un incremento en la advección de la corriente del Pacífico Norte, la que a su regreso puede acarrear un exceso del ASA hacia el área de estudio (Murphree *et al.*, 2003; Durazo, 2009).

**Cuadro 1.** Valores promedio ( $\pm$ desviación estándar) de: TCM= temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) promedio en la capa de mezcla; SCM= salinidad promedio en la capa de mezcla; Phi= parámetro de estratificación ( $\text{J m}^{-3}$ );  $E_{\text{PAR}}$ = irradiancia ( $\text{mol cuanta m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), mismo valor para ambas zonas;  $\alpha^{\text{B}}$ = máximo coeficiente de utilización de luz ( $\text{mgC}(\text{mgChla})^{-1} \text{d}^{-1}$  ( $\text{mol cuanta m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ));  $P^{\text{B}}_{\text{m}}$ = máxima tasa de fotosíntesis ( $\text{mgC}(\text{mgChla})^{-1} \text{d}^{-1}$ );  $K_{\text{PAR}}$ = coeficiente de atenuación de luz ( $\text{m}^{-1}$ );  $Z_{\text{eu}}$ = zona eufótica (m);  $\text{PP}_{\text{HP}}$ = producción primaria estimada con el modelo de Herman y Platt (1986) en enero, abril, julio y octubre de 2002 y 2005 frente a Baja California.

		TCM	SCM	Phi	$E_{\text{PAR}}$	$\alpha^{\text{B}}$	$P^{\text{B}}_{\text{m}}$	$K_{\text{PAR}}$	$Z_{\text{eu}}$	$\text{PP}_{\text{HP}}$
<b>2002</b>										
ENE	N	15.23 (0.53)	33.58 (0.16)	75.24 (22.99)	28.72	2.54	24.83	0.068 (0.008)	99 (11)	788 (405)
	S	17.08 (1.34)	34.24 (0.20)	81.84 (31.86)		2.79 (1.70)	28.13 (14.93)	0.097 (0.013)	70 (10)	1636 (823)
ABR	N	15.00 (0.49)	33.53 (0.08)	63.75 (28.59)	43.24	0.66	53.73	0.081 (0.014)	84 (15)	274 (298)
	S	16.17 (0.80)	33.81 (0.21)	85.41 (32.94)		2.07	63.46	0.094 (0.0001)	70 (1)	620 (197)
JUL	N	17.44 (0.79)	33.49 (0.14)	134.16 (24.72)	48.72	1.32	28.84	0.082 (0.020)	86 (20)	586 (342)
	S	20.35 (1.38)	33.77 (0.17)	169.37 (30.15)		1.55	60.81	0.101 (0.066)	85 (35)	662 (846)
OCT	N	17.62 (0.77)	33.44 (0.09)	161.33 (21.26)	35.75	4.45	30.21	0.082 (0.018)	85 (19)	1192 (861)
	S	19.29 (0.51)	33.95 (0.21)	150.47 (33.27)		3.72 (0.59)	77.48 (16.81)	0.069 (0.023)	107 (32)	1932 (985)
Prom		17.40 (2.02)	33.68 (0.29)	120.67 (40.41)	39.78 (7.94)	2.32 (1.26)	42.86 (17.75)	0.084 (0.033)	86 (24)	907 (823)
<b>2005</b>										
ENE	N	15.99 (0.47)	33.26 (0.10)	107.87 (14.92)	28.89	17.50 (10.21)	90.33 (53.04)	0.057 (0.010)	120 (17)	781 (230)
	S	17.77 (0.46)	33.72 (0.11)	99.52 (13.62)		22.15 (7.98)	86.55 (7.53)	0.062 (0.011)	111 (18)	1005 (798)
ABR	N	16.12 (0.33)	33.24 (0.05)	106.70 (32.71)	48.38	14.88	143.07	0.063 (0.007)	106 (10)	1232 (989)
	S	17.91 (0.40)	33.54 (0.09)	49.70 (13.04)		6.31	78.73	0.058 (0.003)	114 (5)	964 (1549)
JUL	N	17.96 (0.55)	33.31 (0.04)	144.09 (30.89)	45.15	9.57 (3.67)	96.60 (13.09)	0.365 (0.295)	49 (40)	488 (683)
	S	20.73 (1.43)	33.44 (0.09)	200.23 (38.29)		13.26 (5.85)	145.29 (60.55)	0.088 (0.017)	78 (12)	745 (492)
OCT	N	18.86 (0.57)	33.38 (0.07)	185.62 (24.97)	35.78	9.60 (1.91)	125.79 (27.41)	0.070 (0.013)	98 (16)	565 (253)
	S	20.19 (0.56)	33.61 (0.11)	201.91 (28.49)		6.85	101.65	0.083 (0.002)	80 (2)	342 (169)
Prom		18.23 (1.82)	33.41 (0.17)	146.42 (52.95)	39.54 (7.47)	13.01 (4.62)	113.78 (24.13)	0.119 (0.162)	91 (31)	750 (696)

En este trabajo se observó la intrusión del ASA en la zona norte en otoño (octubre) 2002 (Figura 2d), pero en verano (julio) y otoño en la zona sur de ese mismo año (Figura 3c,d). Por otro lado, las condiciones de La Niña desde 1998 a 2003 dominaron las condiciones ambientales en Baja California. Además el índice multivariado ENSO presentó anomalías positivas de diciembre 2001 a enero 2002, su intensidad y duración fue menor que otros eventos El Niño. Lo que podría explicar la ausencia de agua cálida en el área de estudio. Así como una disminución del esfuerzo del viento que produce las surgencias como resultado de la disminución de la divergencia de Ekman, que puede producir la presencia del agua anómala de baja salinidad en Baja California durante 2002-2006 (Durazo, 2009).

La baja concentración de clorofila asociada a anomalías negativas en 2005 en la zona norte en enero (Figura 2e) y para la zona sur en enero y octubre (Figura 3e,h) podría estar asociada a una disminución de nutrientes en la zona eufótica. Thomas *et al.* (2003) reportaron anomalías positivas de clorofila en 2002 en el norte de la Corriente de California; los patrones de desplazamiento fueron consistentes con la advección del ASA. Durazo (2009) reporta una intrusión del ASA frente a Baja California de otoño 2002 hasta primavera de 2006 donde la anomalía negativa de salinidad está asociada a bajas concentraciones de clorofila ( $\sim 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ ) (Gaxiola-Castro *et al.*, 2008).

En 2002 y 2005, diferentes factores influenciaron el desarrollo de la producción primaria. En 2002 enero y abril fue principalmente pro forzamientos físicos como salinidad, temperatura y la estabilidad del agua como respuesta a La Niña, promoviendo surgencias y alta concentración de clorofila, mientras que en julio y octubre, se observó un predominio del ASA. En 2005 la producción primaria fue favorecida por la combinación de forzamientos físicos (temperatura, salinidad y estabilidad del agua), variables bio-ópticas (irradiancias) y parámetros fisiológicos (tasa máxima de fotosíntesis normalizada por unidad de clorofila). Por lo anterior, se sugiere que la salinidad juega el factor más importante, y que el ASA produce una homogenización de la columna de agua, con el consecuente incremento de la estabilidad del agua y zona eufótica. Lo que causa una limitación de nutrientes en la columna de agua, promoviendo una aclimatación fisiológica de las células en 2005.

## Conclusiones

La influencia de la invasión anómala del Agua del Subártico provoca un cambio en las propiedades físicas y por lo tanto de la producción fitoplanctónica. En 2002, los parámetros fotosintéticos fueron más bajos que en 2005. En 2005 la intrusión anómala del ASA homogeniza el ecosistema pelágico, promoviendo una aclimatación que cambia las condiciones de crecimiento del fitoplancton.

## Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por los proyectos CONACYT #129140, IPN-SIP 20131828, 20141301. El programa IMECOCAL contó con apoyo de CICESE y CONACYT. LEC y MMC tienen becas EDI y COFFA, LEC realizó su año sabático en CICESE, RD realizó su año sabático en CICESE y SIO-UCSD.

## Bibliografía

- Bograd S.J., P. M. DiGiacomo, R. Durazo, T. L. Hayward, K. D. Hyrenbach, R. J. Lynn, A. W. Mantyla, F. B. Schwing, W. J. Sydeman, T. Baumgartner, B. Lavaniegos, C. S. Moore. 2000. The state of the California Current, 1999–2000: Forward to a new regime?. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report 41:26–52.
- Côté B., T. Platt. 1983. Day-to-day variations in the spring-summer photosynthetic parameters of coastal marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography* 28:320–344.
- Durazo R., 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Progress in Oceanography* 83:361–368.
- Durazo R., T. Baumgartner. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Progress in Oceanography* 54:7–31.
- Gaxiola-Castro G., R. Durazo, B. Lavaniegos, M. E. De la Cruz-Orozco, E. Millán-Núñez, L. Soto-Mardones, J. Cepeda-Morales. 2008. Pelagic ecosystem response to interannual variability off Baja California. *Ciencias Marinas* 34:263–270.
- Gaxiola-Castro G., S. Alvarez-Borrego. 1991. Relative assimilation numbers of phytoplankton across a seasonally recurring front in the California Current off Ensenada. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report 32:91–96.
- Goericke R., E. Venrick, V. Mantyla, V. Hooff, C. Collins, G. Gaxiola-Castro, S. J. Bograd, F. B. Schwing, W. T. Peterson, B. Marinovic, A. Huyer, P. Wheeler, R. L. Smith, F. Chávez, N. Lo, K. D. Hyrenbach, W. J. Sydeman. 2005. The state of the California Current, 2004–2005: still cool?. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report 46:182–197.



- Henson S. A., A. C. Thomas. 2007a. Phytoplankton scales of variability in the California Current System: 2. Latitudinal variability. *Journal of Geophysical Research* 112.
- Henson S. A., A. C. Thomas. 2007b. Interannual variability in timing of bloom initiation in the California Current System. *Journal of Geophysical Research* 112.
- Herman A. W., T. Platt. 1986. Primary production profiles in the ocean: estimation from a chlorophyll/light model. *Oceanologica Acta* 9:31–40.
- Murphree T., S. J. Bograd, F. B. Schwing, B. Ford. 2003. Large-scale atmosphere-ocean anomalies in the northeast Pacific during 2002. *Geophysical Research Letters* 30.
- Peterson W. T., R. Emmet, R. Goericke, E. Venrick, A. W. Mantyla, S. J. Bograd, F. B. Schwing, R. Hewitt, N. C. H. Lo, W. H. Watson, J. Barlow, M. Lowry, S. Ralston, K. A. Forney, B. E. Lavaniegos-Espejo, W. J. Sydeman, K. D. Hyrenbach, R. W. Bradley, F. P. Chávez, P. Warzybok, K. Hunter, S. Benson, M. Weise, J. Harvey, G. Gaxiola-Castro, R. Durazo. 2006. The state of the California Current, 2005–2006: Warm in the north, cold in the south. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 47:30–74.
- Schwing F. B., S. J. Bograd, C. A. Collins, G. Gaxiola-Castro, J. Garcia, R. Goericke, J. Gomez-Valdes, A. Huyer, K. D. Hyrenbach, P. M. Kosro, B. E. Lavaniegos, R. J. Lynn, A. W. Mantyla, M. D. Ohman, W. T. Peterson, R. L. Smith, W. J. Sydeman, E. Venrick, P. A. Wheeler. 2002. The state of the California Current, 2001–2002: will the California Current System keep its cool, or is El Niño coming?. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 43:31–68.
- Soto-Mardones L., A. Parés-Sierra, J. García, R. Durazo, S. Hormazabal. 2004. Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL region (off Baja California) from Hydrographic, ADCP and Altimetry Data. *Deep Sea Research* 51:785–798.
- Thomas A. C., P. T. Strub, P. Brickley. 2003. Anomalous satellite-measured chlorophyll concentrations in the northern California Current in 2001–2002. *Geophysical Research Letters* 30.
- Venrick E., S. J. Bograd, D. Checkley, R. Durazo, G. Gaxiola-Castro, J. Hunter, A. Huyer, K. D. Hyrenbach, B. E. Lavaniegos, A. Mantyla, F. B. Schwing, R. L. Smith, W. J. Sideman, P. A. Wheeler. 2003. The state of the California Current, 2002–2003: Tropical and subarctic influences vie for dominance. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 44:28–60.
- Zaytsev O., R. Cervantes-Duarte, O. Montante, A. Gallegos-García. 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of Oceanography* 59:489–502.