

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 _{cmax} 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

2.16 Aplicación de una relación empírica para el estudio del sistema del CO₂ en la región oceánica frente a Ensenada, B.C

Oliva-Méndez Norma L.^{1,2}; Hernández-Ayón J. Martín²; Durazo Reginaldo¹;
Simone Alin R.³ y Santamaría Eduardo¹

¹Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Apartado Postal 453, Ensenada, CP 22800, Baja California, México. Autor para correspondencia: norma.oliva@gmail.com

²Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Apartado postal 453, Ensenada, CP 22800, Baja California, México.

³NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, Washington, USA.

Resumen

El estado de la acidificación de los océanos puede estimarse mediante datos hidrográficos calibrados con variables del sistema del carbono. Recientemente se desarrollaron modelos empíricos para calcular variables del carbono para las costas del Sur de California y la parte Norte de Baja California (B. C.). Estos modelos se pueden aplicar principalmente, en sitios donde existen datos hidrográficos pero también mediciones de variables del carbono disponibles para realizar calibraciones. El objetivo de este trabajo fue analizar los datos hidrográficos de un transecto costa-oceano frente a las costas de Ensenada, correspondiente a la línea 100 del programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de La Corriente de California) durante el periodo de 1998-2014. A dichos datos se les aplicó un modelo empírico para estimar el estado de saturación de aragonita (Ω_a) con la finalidad de identificar las posibles condiciones oceanográficas que influyeron en la variabilidad de la profundidad del horizonte de saturación que pudieron presentarse en los últimos 17 años en hábitats de moluscos y áreas de producción ostrícola aledañas a las costas de Ensenada. Se detectó que la temperatura, salinidad, oxígeno, pH, carbono inorgánico disuelto (CID) y Ω_a presentaron una variabilidad estacional con diferentes escenarios oceanográficos: a) durante primavera-verano ocurre el flujo de la Corriente de California hacia el ecuador y se presentan eventos de surgencias; b) en otoño-invierno con la influencia el giro del Sur California, que puede transportar agua del subártico hacia el Ecuador en la porción más oceánica del transecto y hacia al polo en la más costera. Estas características oceanográficas promueven que la estación más costera presente variabilidad estacional, que se refleja en la profundidad del horizonte de Ω_a más somero ($\sim 66 \text{ m} \pm 21 \text{ m}$) en primavera y más profundo hacia el invierno ($\sim 122 \text{ m} \pm 35$). Se ha reportado que las surgencias en las costas de B. C. son transportadas desde una profundidad entre 80 y 90 m en primavera-verano; por tanto agua subsaturada en carbonato de calcio con $\Omega_a < 1$ puede transportarse por surgencias hacia la plataforma de las costas de B. C.

Palabras clave: surgencias, aragonita, corriente de California.

Abstract

The status of the ocean acidification can be estimated by hydrographic calibrated data with carbon system variables. Recently empirical models for the coast of southern California and northern Baja California (B. C.) were developed. These models can be applied mainly in places where hydrographic data exist but also with measurements of the carbon system available for calibrations. The aim of this study was to analyze the hydrographic data of a transect in front of Ensenada's coast, corresponding to the line 100 of IMECOCAL's program during the period 1998-2014. Such data was used to apply an empirical model to estimate the aragonite saturation state (Ω_a) in order to identify oceanographic conditions that could influence the variability of the depth of saturation horizon that might be in the last 17 years in habitats of shellfish and oyster production areas adjacent to the coast of Ensenada. It was found that the temperature, salinity, oxygen, pH, dissolved inorganic carbon and Ω_a showed a seasonal variation with different oceanographic scenarios: a)

during spring-summer the California Current flow to the Ecuador and upwelling events are presented; b) in autumn-winter the influence the Southern California Bight Eddy can transport water from the subarctic to Ecuador in the oceanic portion of the transect and towards the pole at the coastal side. These oceanographic characteristics encourage that coastal stations present seasonal variability, reflected in the depth of the horizon Ω_a shallower ($\sim 66 \text{ m} \pm 21 \text{ m}$) in spring and deeper into the winter ($\sim 122 \text{ m} \pm 35$). It has been reported that the upwelling off the coast of B. C. transport water from a depth between 80 and 90 m in spring and summer; therefore under saturated water ($\Omega_a < 1$) may be transported to the platform upwelling off the coast of B. C.

Key words: upwelling, California Current, aragonite.

Introducción

En el océano, el pH ha mostrado cambios no sólo en tiempo y espacio debido a procesos de advección, sino también como resultado del incremento en la absorción de CO_2 de origen antropogénico (Sabine *et al.*, 2004). Este incremento de CO_2 en el océano, ha provocado cambios en la profundidad de los horizontes de saturación de aragonita ($\text{HS}\Omega\text{A}$) (Feely *et al.*, 2004 y 2012). Particularmente en el Pacífico Norte, en donde el horizonte de saturación de aragonita es cada vez más somero debido a la absorción de CO_2 de origen antropogénico. En un estudio realizado por Feely *et al.*, (2012) se observó por primera vez en 1994 que la profundidad del $\text{HS}\Omega\text{A}$ frente a las costas de San Diego Ca., era de $\sim 400 \text{ m}$. El mismo transecto se repitió para el 2004 y se observó que la profundidad de dicho horizonte se encontraba solo a $\sim 250 \text{ m}$ de la superficie. La evaluación de este y otros transectos, permitió estimar la velocidad de migración del $\text{HS}\Omega\text{A}$ es de entre 1 y 2 m/año (Feely *et al.*, 2004). Por tanto, el $\text{HS}\Omega\text{A}$ ha migrado a una profundidad tal que actualmente las surgencias pueden transportar dicha agua subsaturada a la plataforma continental. Este hecho fue confirmado en el 2007 al encontrar aguas subsaturadas con respecto a ΩA en la plataforma continental desde las costas de Canadá hasta Baja California, México (Feely *et al.*, 2004 y 2012). Sin embargo, estas mediciones puntuales del $\text{HS}\Omega\text{A}$ no permiten conocer desde cuando y como cambia la profundidad del $\text{HS}\Omega\text{A}$. En un estudio reciente se desarrolló un modelo que permite reconstruir los parámetros del sistema de carbono usando las ecuaciones propuestas por Alin *et al.*, 2012. Este modelo, permite estimar las variables del sistema del CO_2 a lo largo del sistema de la corriente de California (SCC), particularmente: pH, Ω , la concentración de carbono inorgánico disuelto (CID) y la concentración de iones de carbonato [CO_3^{2-}]. El modelo requiere de la calibración de mediciones hidrográficas (T, S, O_2 , y $\sigma\theta$) mediante mediciones de variables del carbono; pero es ideal su aplicación cuando se cuenta con una base de mediciones hidrográficas. El resultado al aplicar este método en datos hidrográficos históricos, es la reconstrucción de los valores de pH y Ω , los cuales permiten estudiar la estacionalidad y la tendencia a largo plazo de la acidificación de los océanos en las aguas costeras del SCC.

En Baja California se cuenta con el programa Imecocal (Investigaciones Mexicanas de La Corriente de California), el cual cuenta con datos hidrográficos de 17 años. Por tanto, esta base de datos puede ser utilizada para aplicar el modelo desarrollado por Alin *et al.*, (2012). El presente trabajo muestra el análisis después de aplicar dicho modelo con la finalidad de describir la dinámica del sistema del CO_2 . Además se presenta el análisis de las fluctuaciones de profundidad del horizonte de saturación del ΩA en los últimos años en áreas donde ocurren surgencias y en sitios donde se realizan actividades ostrícolas en Baja California.

Materiales y métodos

Las relaciones empíricas de Alin *et al.*, (2012) requieren ser validadas con datos discretos de las variables del sistema del CO_2 (CID, AT) del sitio donde se pretenden aplicar. Además se requiere que haya bases de datos robustas de variables hidrográficas provenientes de mediciones de CTD para poder ser aplicados. Estas variables hidrográficas provienen de perfiles de temperatura,

salinidad y oxígeno que se realizaron en el programa IMECOCAL para la línea 100 desde la costa hasta ~220 km (Figura 1). En total se analizaron 56 cruceros oceanográficos desde 1997 al 2013, con ocho estaciones perpendiculares a la costa separadas ~35 km entre cada una.

La profundidad a la que se hicieron los lances del CTD fue en función de la profundidad que se encontraba en la estación. Para aplicar las relaciones empíricas de Alin *et al.*, (2012), fue necesario calibrar los datos de oxígeno medidos en los cruceros con CTD mediante datos disponibles para la misma área de estudio.

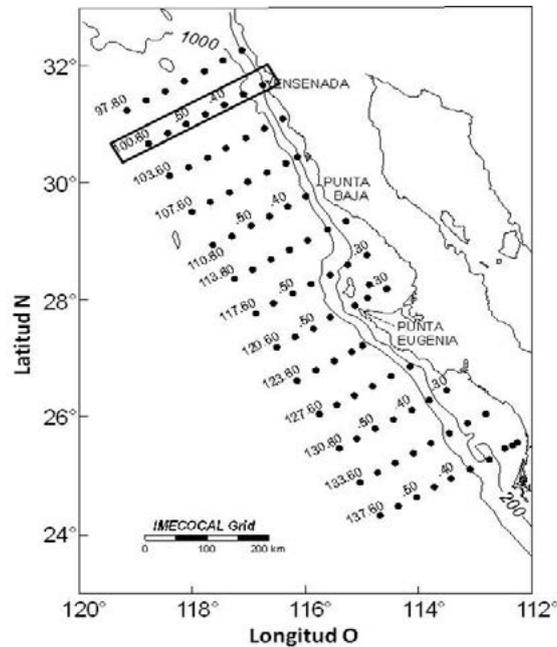


Figura 1. Zona IMECOCAL. El área de estudio comprende la línea 100 (rectángulo) frente a Ensenada.

Esto se realizó con datos medidos *in situ* en la misma línea durante el crucero de NACP (North American Carbon Project) en junio de 2007 y con datos medidos por el CTD durante el crucero de IMECOCAL en agosto de 2007. En este procesamiento se realizó un modelo de regresión múltiple con la concentración de oxígeno de muestras de la misma profundidad para ambos cruceros. Este modelo fue significativo en un ~80% y pudo aplicarse para la columna de agua pero por debajo de 20 m hasta los 990 m. Una vez que se aplicaron las relaciones empíricas de Alin *et al.*, (2012) a los datos disponibles de todo el transecto y para diferentes meses y años, se obtuvieron patrones estacionales a partir de promedios aritméticos.

En cada año se realizaron aproximadamente cuatro cruceros: enero (invierno), abril (primavera), julio (verano) y octubre (otoño). El número de estaciones que se muestrearon pudo cambiar de un crucero a otro, por esto el promedio aritmético que se muestra en este análisis tiene al menos cinco observaciones en cada punto.

Resultados

El análisis del campo de densidad del transecto costa-océano frente a las costas de Ensenada presentaron dos características: a) a profundidades menores a 100 m se detectó agua de menor densidad proveniente del sub-ártico que se asocia a la Corriente de California (CC) cuyo límite inferior corresponde a la isopícnica de ~25 kg/m³; b) por debajo de los ~150 m se encontró agua de mayor densidad que se asocia con la presencia de la Contracorriente de California (CcC) con valores de ≥ 26 kg/m³. Estas características se describieron por Linacre *et al.*, (2010) y Durazo (2015), al estudiar el mismo transecto con un análisis armónico. Estos autores también describieron que en dirección hacia la costa, las isopícnicas tienen un ascenso marcado especialmente en primavera a causa de la ocurrencia de surgencias en la zona.

En el presente estudio se detectó que estacionalmente existe un levantamiento de las isopícnas en dirección a la costa, mismo que es posible detectar en las isolinéas de aragonitas y pH (Figura 2).

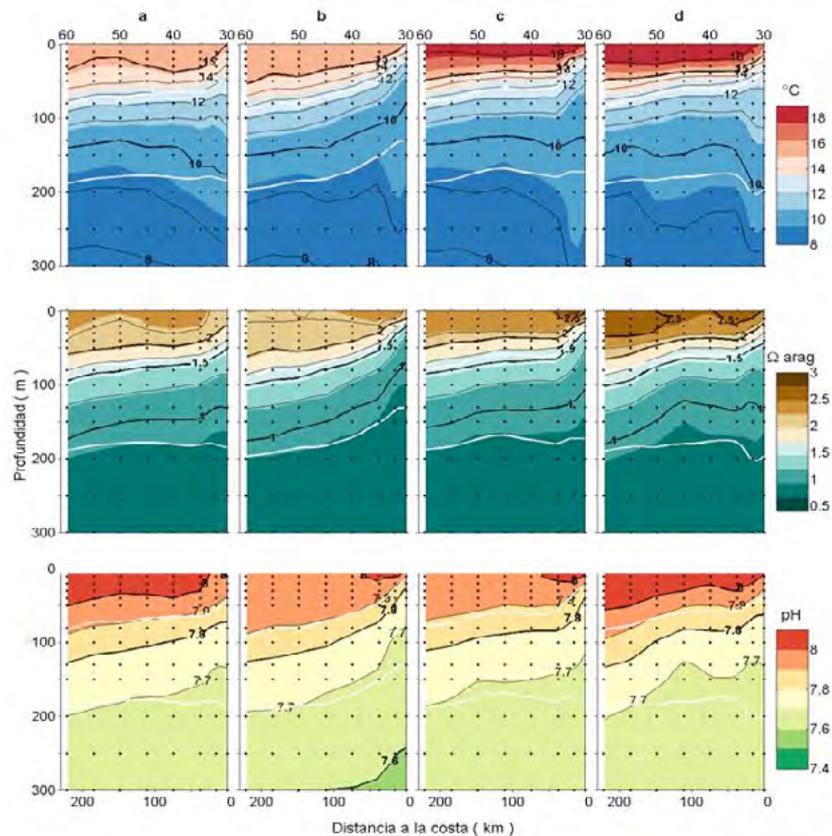


Figura 2. Patrones estacionales de la línea temperatura ($^{\circ}\text{C}$), aragonita y pH: a) invierno, b) primavera, c) verano y d) otoño. Las líneas blancas indican las isopícnas de 25.4 y 26.3 kg m^{-3} que indican aproximadamente el límite superior de la Corriente de California y el núcleo de la contra Corriente de California. La distancia a la costa está referida a la estación 30 del transecto.

En profundidades menores a 100 m donde se presenta la CC se encontraron valores de pH con valores entre $7.9\text{-}8.0$ y de $\Omega_{\text{arag}} \sim 2$. Mientras que a profundidades mayores a 200 m los valores de pH fueron ~ 7.7 y con valores de $\Omega_{\text{arag}} \leq 1$. Es decir, los valores de subsaturación del omega aragonita se detectan por debajo de los 100 m , excepto en primavera cuando las surgencias son más intensas en la zona y es posible encontrar valores de subsaturación $\sim 60 \text{ m} \pm 20$ en primavera sobre la plataforma (Figura 2). Adicionalmente en los meses de otoño se detectó la presencia de agua con menor densidad en superficie, que corresponde con la incidencia del giro del sur de California. De acuerdo a Durazo (2015), bajo estas condiciones puede transportar agua del subártico hacia el Ecuador en la porción más oceánica del transecto y hacia al polo en la más costera.

En estos resultados se encontró a diferentes profundidades el HSQA en la porción más costera del transecto. Se realizó un análisis estadístico para cada una de los puntos de muestreo a lo largo del transecto y a través de las estaciones del año en los cuales se confirma dicha observación (Figura 3). Para este análisis se aplicó a priori una ANOVA no paramétrica de Kruskal Wallis, que indicó que al menos en una de las estaciones del año la profundidad del HSQA era diferente. Por tanto a posteriori se hicieron pruebas de contraste múltiple para cada punto de muestreo en cada estación del año. Se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas en los puntos de muestreo cercanos a la costa a $\leq 50 \text{ km}$ y que no se detectan más allá de 50 km .

Lo anterior sugiere que los puntos de muestreo cercanos a la costa están influenciados por surgencias costeras que promueven el ascenso de agua subsuperficial y con ello el HSQA a menor profundidad. Esto se detecta especialmente en primavera cuando el HSQA puede estar tan somero como $60 \text{ m} \pm 20$ en comparación con el invierno que puede estar tan profundo como $120 \text{ m} \pm 35$ en el

punto de muestreo más costero (Figura 3). Esta observación sustenta lo propuesto por Linacre *et al.*, (2010) al señalar que el análisis de este transecto tiene una marcada variabilidad estacional en la termoclina, que se asocia con fluctuaciones en el flujo de la CcC hacia el ecuador y la CU hacia el polo, así como eventos de surgencias costeras.

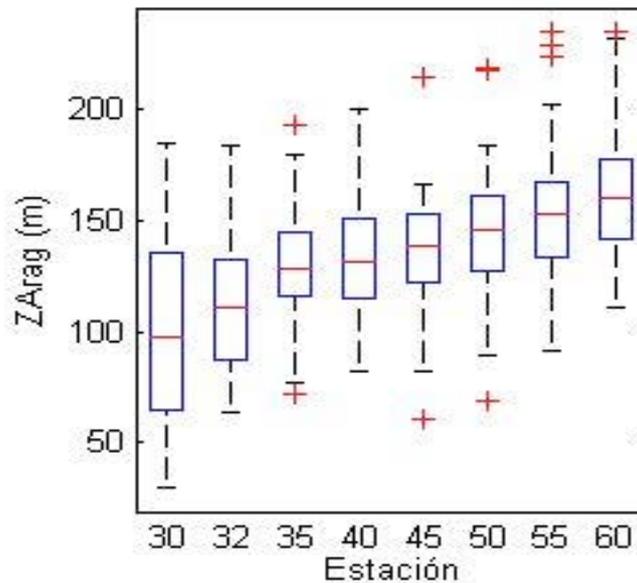


Figura 3. Profundidad del HSΩA para cada punto de muestreo. La estación 30 es la más costera y la 60 la más oceánica.

Estas últimas aumentan en magnitud y frecuencia durante primavera y verano. Lo anterior se corrobora en el diagrama de ubicación de la profundidad del HSΩA a través del periodo de estudio (1998-2014) en las diferentes estaciones de muestreo (Figura 4). En este se puede detectar que existen pulsos estacionales en los que el HSΩA es más somero en las estaciones más costeras y más profundas en las más oceánicas.

A la profundidad del HSΩA se encontraron valores de pH ~ 7.7 y de densidad de $\sim 26 \text{ kg/m}^3$. Estos valores pueden corresponder a características de la CcC ya que los valores de densidad pertenecen a valores cercanos al núcleo de la CcC (26.5 kg/m^3), como lo señalan Linacre *et al.*, (2010).

Las profundidades del HSΩA que se encontraron durante primavera cuando ocurren los eventos de surgencia, son de especial interés. Se sugiere que agua con valores cercanos al límite de saturación puede ser la que utiliza el sector ostrícola en los cultivos, lo que promueve problemas en el desarrollo de organismos como el ostión *Crassostrea gigas*. Esta especie se cultiva en el sector ostrícola de la zona y se ha reportado que durante eventos de surgencia cuando el $\Omega_A = 1$ se presenta poco o nulo desarrollo (47%) en larvas de ostión de entre 120 a 150 μ (Barton *et al.*, 2012). Esto sugiere que el efecto de agua subsaturada con respecto a Ω_A en algunas etapas larvales, no necesariamente tiene que estar por debajo o igual al valor de saturación para ser considerada como adversa para organismos marinos que calcifican.

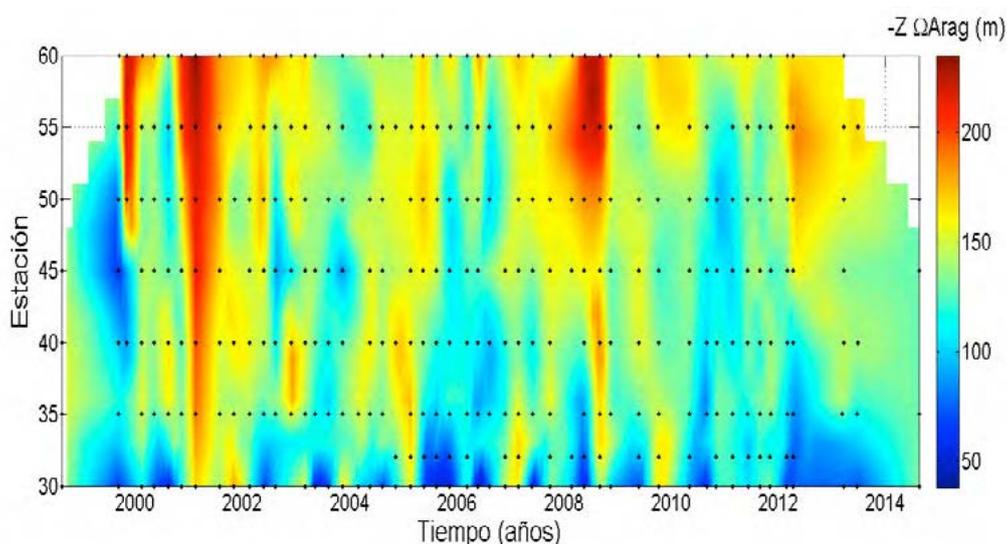


Figura 4. Diagrama Hovmoller que muestra la variabilidad de la profundidad del Horizonte de Saturación del Omega Aragonita a través del periodo de estudio (1998-2014) en las diferentes estaciones de muestreo.

Conclusiones

El HSQA presentó variación estacional con dos escenarios oceanográficos: 1) durante primavera-verano ocurre el flujo de la Corriente de California hacia el ecuador y se presentan eventos de surgencias; 2) en otoño-invierno la influencia el giro del sur California puede transportar agua del subártico hacia el Ecuador en la porción más oceánica del transecto y hacia al polo en la más costera. Estas diferentes características oceanográficas promueven que la estación más costera presente variabilidad estacional, que se refleja en la profundidad del horizonte de Ω_a más somero ($\sim 66 \text{ m} + 21 \text{ m}$) en primavera y más profundo hacia el invierno ($\sim 122 \text{ m} + 35 \text{ m}$). La surgencia costera es el principal factor físico que modula la profundidad del HSQA de la línea 100 de la region de IMECOCAL, con influencia hasta la Est-35 en aproximadamente $\sim 50 \text{ km}$ de la costa.

Bibliografía

- Alin S. R., R. Feely, A. G. Dickson, J. M. Hernández-Ayón, L. W. Juranek, M. D. Ohman, R. Goericke. 2012. Robust empirical relationships for estimating the carbonate system in the southern California Current System and application to CalCOFI hydrographic cruise data (2005-2011). *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117.
- Barton A., B. Hales, G. G. Waldbusser, C. Langdon, R. Feely. 2012. The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects. *Limnology and Oceanography* 57:698-710.
- Durazo R. 2015. Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120:1173-1196.
- Feely R., C. L. Sabine, K. Lee, W. Berelson, J. Kleypas, V. J. Fabry, F. J. Millero. 2004. Impact of anthropogenic CO_2 on the CaCO_3 system in the oceans. *Science* 305:362-366.
- Feely R., C. L. Sabine, R. H. Byrne, F. J. Millero, A. G. Dickson, R. Wanninkhof, A. Murata, L. Miller, D. Greeley. 2012. Decadal changes in the aragonite and calcite saturation state of the Pacific Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 26:1-15.
- Linacre L., R. Durazo, J. M. Hernández-Ayón, F. Delgadillo-Hinojosa, G. Cervantes-Díaz, J. R. Lara-Lara, V. Camacho-Ibar, A. Siqueiros-Valencia, 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.
- Sabine C. L., R. Feely, N. Gruber, R. M. Key, K. Lee, J. L. Bullister, R. Wanninkhof, C. S. Wong, D. W. Wallace, B. Tilbrook, F. J. Millero, T. H. Peng, A. Kozyr, T. Ono, A. F. Rios. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO_2 . *Science* 305:367-371.