

# DIAGNÓSTICO Y ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA EN LOS MARES DE MÉXICO

## DIAGNOSIS AND ANALYSIS OF THE NET PRIMARY PRODUCTION IN THE SEAS OF MEXICO

Ramón Sosa-Ávalos<sup>1†</sup>, T. Leticia Espinosa-Carreón<sup>2</sup>, Eduardo Santamaría-del Ángel<sup>3</sup>, Jushiro Cepeda-Morales<sup>4</sup>, Alfredo Mercado-Santana<sup>5</sup>, Martín E. De la Cruz-Orozco<sup>5</sup>, J. Rubén Lara-Lara<sup>5</sup>, Saúl Álvarez-Borrego<sup>5</sup> y Gilberto Gaxiola-Castro<sup>5†</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, Universidad de Colima, Manzanillo, Colima, México.

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa, Guasave, Sinaloa, México.

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

<sup>4</sup>Laboratorio de Percepción Remota Satelital en Ecosistemas Costeros y Oceánicos, CENIT2, Universidad Autónoma de Nayarit, Tepic, Nayarit, México. 63155.

<sup>5</sup>Departamento de Oceanografía Biológica, División de Oceanología. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México.

†Q. E. P. D. Gilberto Gaxiola fue el responsable de generar la información de producción primaria del programa IMECOCAL desde 1998 hasta 2017.

‡Autor para correspondencia: rsosa@ucol.mx

### RESUMEN

En este estudio se revisaron más de 50 artículos publicados en revistas indizadas y arbitradas, así como literatura gris (tesis de licenciatura y posgrado), bases de datos, memorias de congresos, reportes técnicos y datos no publicados, relacionados con la estimación de la producción primaria *in situ* (PP). La información obtenida se dividió en cuatro regiones, lo que permitió estimar la variabilidad estacional e interanual de la PP en las diferentes regiones. La mayoría de los estudios se realizaron frente a la Península de Baja California, Golfo de California, Pacífico oriental tropical mexicano y Golfo de México. Sin embargo, en este último son escasos los trabajos realizados por investigadores mexicanos, por lo que la mayoría de los datos se encuentran en las costas de Estados Unidos de América. En la región del Pacífico oriental tropical mexicano es donde menos estudios existen, por tanto, se recomienda implementar programas multidisciplinarios en las regiones donde son escasos los estudios, para conocer la cantidad de CO<sub>2</sub> que fijan los productores primarios en espacio y tiempo. La PP fue 1.3 veces mayor en invierno en la Península de Baja California (PBC), 61% más alta en la temporada cálida en el Golfo de California (GC), máxima en primavera (1.0 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) en el Pacífico oriental tropical mexicano (POTM), mientras que en el Golfo de México (GM) el promedio más alto fue de 0.98 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> durante la primavera. La estimación gruesa de la PP en cada región fue de 280, 759, 236 y 308 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, en la PBC, GC, POTM y GM, respectivamente. En general en los mares mexicanos se desconocen los flujos de carbono a través de la columna de agua y el tamaño de sus reservorios, por lo que debería ser considerada de las prioridades en el país. La información revisada se compiló para generar una base de datos de producción primaria integrada en la zona eufótica.

**Palabras clave:** producción primaria; regiones; variabilidad espacial y temporal, procesos físicos.

## ABSTRACT

In this study, more than 50 articles published in indexed and refereed journals were reviewed, as well as gray literature (undergraduate and postgraduate theses), databases, conference proceedings, technical reports and unpublished data, related to the estimation of *in situ* primary production (PP). The information obtained was divided into four regions, which allowed us to estimate the seasonal and interannual variability of PP in the different regions. Most of the studies were conducted in front of the Peninsula of Baja California, the Gulf of California, Mexican tropical eastern Pacific and the Gulf of Mexico. However, in the latter, there are few works carried out by Mexican researchers, so most of the data is found on the coasts of the United States of America. In the Eastern Tropical Pacific region of Mexico, where there are fewer studies, it is therefore recommended to implement multidisciplinary programs in regions where studies are scarce, in order to know the amount of CO<sub>2</sub> that the primary producers fix in space and time. PP was 1.3 times higher in winter in the Baja California Peninsula (PBC), 61% higher in the warm season in the Gulf of California (GC), maximum in spring (1.0 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) in the Mexican tropical eastern Pacific (POTM), while in the Gulf of Mexico (GM) the highest average was 0.98 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> during the spring. The gross estimate of PP in each region was 280, 759, 236 and 308 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, in the PBC, GC, POTM and GM, respectively. In general, in the Mexican seas, the carbon fluxes through the water column and the size of its reservoirs are unknown, so it should be considered one of the priorities in the country. The information reviewed was compiled to generate a database of primary production integrated in the euphotic zone.

**Key words:** *primary production; regions; spatial and temporal variability, physical processes.*

## INTRODUCCIÓN

La producción primaria del fitoplancton es la base principal de las redes tróficas que se desarrollan en el ecosistema pelágico del océano y tiene una importante relación con el flujo de carbono (Callejas-Jiménez *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2015). En los sistemas acuáticos, la tasa de conversión de carbono inorgánico a carbono orgánico durante el proceso fotosintético, sostiene no solamente el fitoplancton mismo, sino también a los otros organismos presentes en el ecosistema. Las típicas redes tróficas marinas involucran fitoplancton grande (*e.g.* diatomeas, dinoflagelados) que son pastoreados por el mesozooplancton (*e.g.* copépodos), los cuales son consumidos por depredadores, incluyendo muchas especies de invertebrados y peces económicamente importantes (Gattuso y Hansson, 2011). Por lo tanto, resulta esencial conocer la variabilidad espacial y temporal de la producción primaria del fitoplancton para los ciclos del carbono oceánico, los cambios en las poblaciones de recursos pesqueros y, el acoplamiento del forzamiento físico-biogeoquímico de los ecosistemas pelágicos, con una base regional (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010).

El flujo de carbono en los océanos está controlado, principalmente, por la fotosíntesis realizada por el fitoplancton, la cual puede reducir la presión parcial de bióxido de carbono en las aguas superficiales (Holding *et al.*, 2015). Adicionalmente, en las zonas altamente productivas existe un desacoplamiento entre la producción primaria y el pastoreo, lo que permite que una cantidad significativa de carbono orgánico recién formado se hunda fuera de la zona eufótica (Gattuso y Hansson, 2011). Lo anterior provoca un efecto neto de flujo de carbono de la atmósfera hacia el océano. Dicho fenómeno es conocido como “bomba biológica” (Lewis, 1992).

El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo una intensiva búsqueda bibliográfica de los estudios realizados de producción primaria a través de experimentos *in situ* con el método de asimilación de carbono catorce en los mares de México. Adicionalmente, se consultaron bases de datos de producción primaria integrada en la zona eufótica. El análisis de los estudios permitió clasificar la información obtenida en regiones, para generar una base de datos de producción primaria disponible.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Revisión de la información

En México no existen inventarios sobre el carbono inorgánico que fija el fitoplancton y que a través del proceso fotosintético se convierte en material orgánico, así mismo, se desconoce cuánto de este material formado en la zona eufótica se exporta hacia aguas más profundas por efecto de la bomba biológica, en los mares del país. No existen bases de datos que documenten cómo se comporta la producción primaria en escalas de tiempo y espacio y, se desconoce la cantidad de carbono orgánico que se produce por año en las distintas regiones.

Para la revisión del carbono orgánico producido por el fitoplancton en los mares mexicanos, se realizó una búsqueda bibliográfica, en la cual se consultaron artículos en revistas indizadas (Ciencias Marinas, Deep-Sea Research, Continental Shelf Research, Environmental Development, Marine Biology, Marine Ecology Progress Series, Revista de Biología Marina y Oceanografía, entre otras) capítulos de libro, bases de datos ([http://coastalcarbon.pbworks.com/w/file/68216610/GoMex\\_pp.xls](http://coastalcarbon.pbworks.com/w/file/68216610/GoMex_pp.xls), doi.org/10.1594/PANGAEA.899222 (Sosa-Ávalos, 2019), [http://pmccarbono.org/pmc/bases\\_datos/](http://pmccarbono.org/pmc/bases_datos/)), libros (Sociedad Mexicana de Planctología, Rice University Studies, SEMARNAT, United Nations Industrial Development Organization, Blackwell Science, John Wiley & Sons, SEP-UABC, American Geographical Society), tesis de licenciatura y posgrado (Universidad de Colima, Universidad Autónoma de Baja California, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de

Ensenada, Louisiana State University, Florida State University), reportes técnicos (CICESE, CSIRO, North American Carbon Program, SCRIPPS), memorias de congreso (Sociedad Mexicana de Planctología, Congreso Nacional de Oceanografía, Simposium Latinoamericano sobre Oceanografía Biológica, Simposio sobre Investigaciones Marinas y Acuícolas en el Pacífico Mexicano), así como información no publicada (datos de producción primaria que no se encuentran como literatura gris y, que no fueron publicados). Los estudios se revisaron para obtener información sobre la producción primaria (PP) estimada con el método de radioisótopos ( $^{14}\text{C}$ ) (Steemann-Nielsen, 1952), a través de experimentos *in situ* y relación fotosíntesis-irradiancia (curvas P-E).

La información obtenida de cada trabajo se clasificó de acuerdo con las siguientes regiones del país: Península de Baja California (PBC), Golfo de California (GC), Pacífico oriental tropical mexicano (POTM) y Golfo de México (GM). En la PBC se agruparon todos los estudios realizados de la costa de Tijuana hasta Cabo San Lucas, el GC comprende desde la boca hasta el alto golfo, en el POTM se incluyeron estudios desde las costas de Nayarit hasta Chiapas, mientras que en el GM se consideraron estudios de las costas de Estados Unidos de América hasta la Península de Yucatán (Figuras 1a y 1b). Los resultados de PP de las distintas regiones se expresaron en  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$  (PBC),  $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$  (GC) y  $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$  (POTM y GM). En la PBC se obtuvo información de 58 cruceros oceanográficos, más 42 muestreos mensuales en una estación frente a Bahía Magdalena (un total de 102), 42 cruceros en el GC, 19 en el POTM y 128 en el GM (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Cruceros oceanográficos realizados por año en los cuales se hicieron experimentos para estimar la producción primaria en cada una de las regiones.**

Regiones							
PBC		GC		POTM		GM	
Año	No. crucero	Año	No. crucero	Año	No. crucero	Año	No. crucero
1988	2	1960	1	1967	4	1956	2
1999	3	1967	1	1968	2	1960	3
2000	4	1968	2	1981	1	1962	1
2001	4	1969	1	1990	1	1964	1
2002	4	1980	2	2001	1	1965	4
2003	4	1981	3	2002	2	1966	5
2004	3	1982	1	2003	1	1967	4

Regiones							
PBC		GC		POTM		GM	
Año	No. crucero	Año	No. crucero	Año	No. crucero	Año	No. crucero
2005	4	1983	2	2005	4	1968	1
2006	3	1984	2	2006	1	1969	1
2007	4	1985	1	2007	1	1970	5
2008	9	1987	2	2008	1	1971	3
2009	14	1990	3			1975	8
2010	14	1991	2			1977	4
2011	17	1992	1			1979	8
2012	1	1998	1			1981	9
2013	3	1999	3			1984	2
2014	2	2000	2			1987	9
2016	2	2002	1			1988	1
2017	1	2005	1			1989	1
		2006	1			1990	6
		2007	1			1991	5
		2008	1			1992	23
		2010	1			1993	7
		2011	1			1994	5
		2012	2			2000	1
		2013	1			2001	1
		2015	1			2005	3
		2016	1			2006	3
						2007	2

## RESULTADOS

El conocimiento generado sobre la producción primaria del fitoplancton, ha sido gracias a los diferentes cruceros oceanográficos que se han realizado en las distintas regiones del país, con la participación de diversas instituciones nacionales y extranjeras. En esta revisión se analizaron 53 artículos indizados y arbitrados, que comprendieron el 47.3% de la información total, 9 capítulos de libros (8.04%), tesis de licenciatura y posgrado que representaron el 32.1%, memorias de congresos (5.4%), reportes técnicos y datos no publicados (3.6%, respectivamente), haciendo un total de 112 revisiones. La mayor cantidad de la información

analizada corresponde al GM, seguida del GC, PBC y en menor cantidad por el POTM. Adicionalmente, en el GM se localizó una base de datos de PP integrada en la columna de agua (100 m) de aproximadamente 1520 valores, distribuidos principalmente en las costas de USA; desde la plataforma oeste de Florida hasta la península de Yucatán (Figura 1b). Mientras que en la región de la PBC se analizaron alrededor de 440 datos de PP integrada en la zona eufótica. Es importante hacer notar que no se consideraron estudios en donde se estimó la PP a partir de modelos bio-ópticos, en los cuales se utilizaron observaciones derivadas de sensores remotos satelitales.

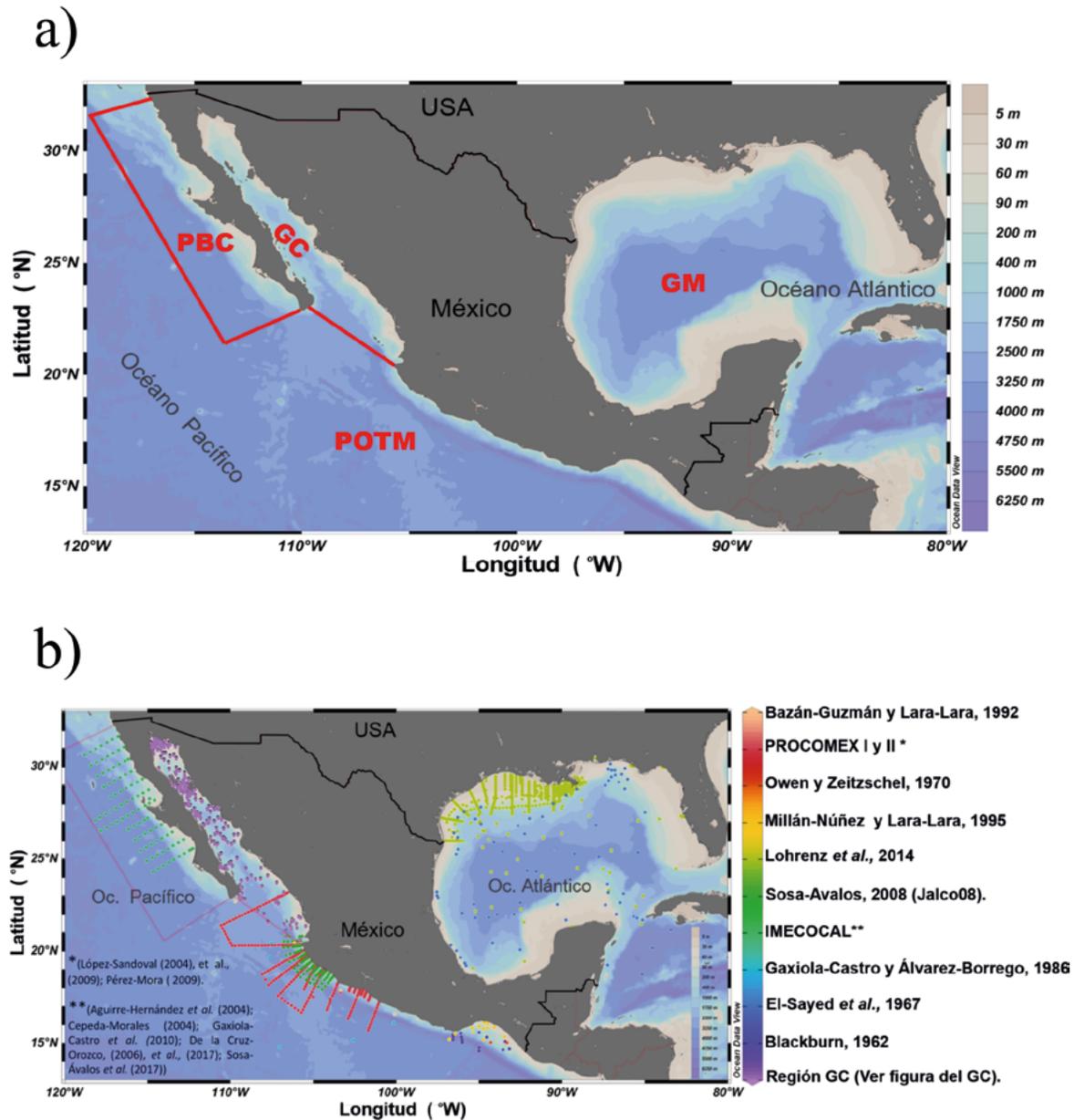


Figura 1. (a) Distribución de las regiones donde se realizaron estudios de producción primaria en los mares mexicanos, (b) red de estaciones y estudios de PP que se hicieron, por región.

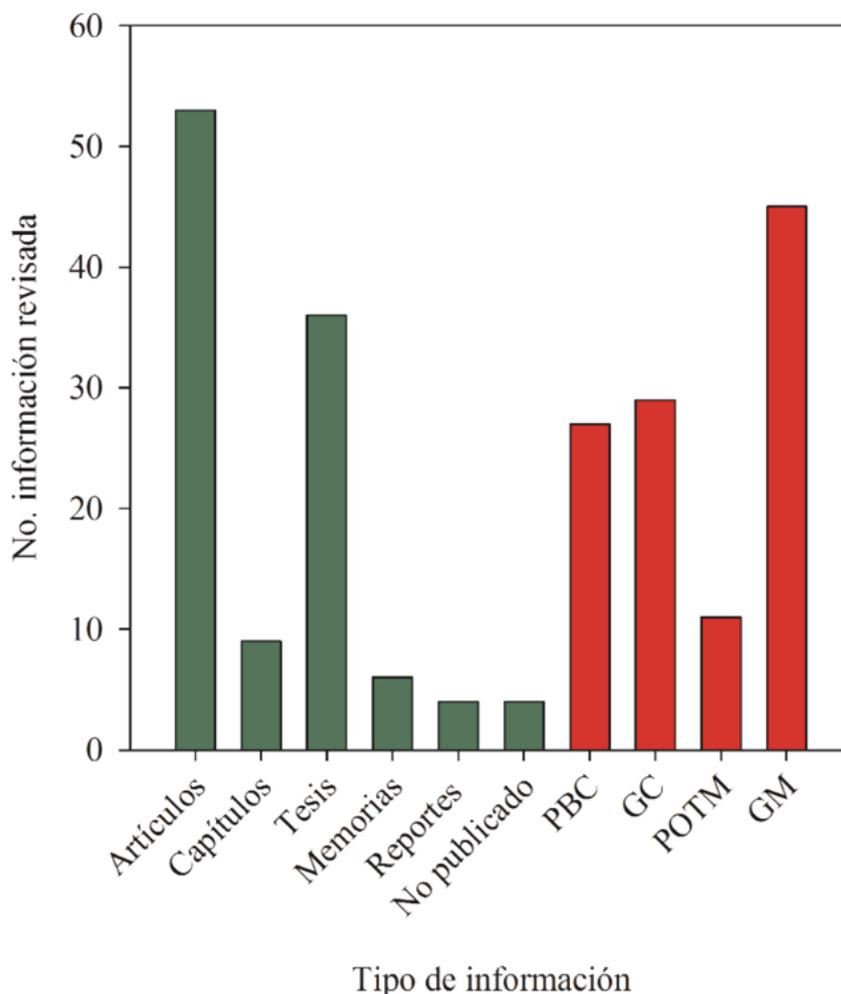
La distribución de la información analizada fue más abundante en la región del GM. Dicha información comprende artículos científicos, tesis de posgrado, congresos, reportes y bases de datos ([http://coastalcarbon.pbworks.com/w/file/68216610/GoMex\\_pp.xls](http://coastalcarbon.pbworks.com/w/file/68216610/GoMex_pp.xls)), lo que representó el 40.2% del total de la información analizada. En el GC predominaron los artículos científicos, tesis de licenciatura y posgrado, que contribuyeron con el 25.9% de la información. En la PBC la mayor parte de la información se encuentra como literatura gris (tesis de licenciatura y posgrado),

artículos científicos y capítulos de libro, lo que representa el 24.1% (<http://imecocal.cicese.mx/>); mientras que en el POTM, la información se encuentra como tesis de licenciatura y posgrado, artículos científicos en menor cantidad y datos no publicados, con un total del 9.8% ([doi.org/10.1594/PANGAEA.899222](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.899222); Sosa-Ávalos, 2019). Una característica importante del GM es que la mayoría de los datos fueron generados por parte de investigadores de USA (El-Sayed et al., 1972; Lohrenz et al., 1997; Chen et al., 2000; Lohrenz et al., 2014). Actualmente científicos mexicanos realizan

experimentos para medir la producción primaria del fitoplancton como parte de un proyecto financiado por CONACYT-SENER, pero los datos aún no están disponibles. Este proyecto tendrá una duración de cinco años (2016-2020), durante los cuales se desarrollarán cinco líneas de investigación basadas en: 1) plataformas de observación oceanográfica, 2) línea bases y monitoreo ambiental, 3) modelos numéricos de circulación y biogeoquímica, 4) degradación natural de hidrocarburos y, 5) análisis de derrame. Una vez terminado el proyecto, se espera que la base de datos esté disponible al público.

En la Figura 2 se puede observar que las dos fuentes con mayor información fueron los artículos indizados en revistas internacionales y, la literatura gris, en forma de tesis de licenciatura y posgrado. Sin embargo, en la región del POTM la zona entre

Guerrero y Chiapas, la información es muy escasa. La falta de estudios de producción primaria en algunas zonas, se debe principalmente a: a) la presencia de fenómenos climatológicos como tormentas y huracanes, que dificultan realizar monitoreos, b) poco interés por parte de la comunidad científica para llevar a cabo estudios oceanográficos en el Pacífico tropical mexicano por considerarla una región oligotrófica, c) baja consolidación de grupos científicos que estudien el océano en la región, d) costo de tiempo de barco para realizar cruceros oceanográficos de, al menos, 20 días, e) falta de implementación de un programa oceanográfico multidisciplinario a mediano y largo plazo, f) establecer redes de colaboración con investigadores de otras instituciones del país, interesados en estudiar el océano en la región, entre otros.



**Figura 2. Tipo de información revisada para generar la base de datos de producción primaria en las diferentes regiones del país en el periodo de 1956 a 2017.**

Las barras en rojo representan la cantidad de información revisada para cada región: Península de Baja California (PBC); Golfo de California (GC); Pacífico oriental tropical mexicano (POTM); Golfo de México (GM).

Los Cuadros 2, 5 y 6, muestran la cantidad de estudios realizados, valores promedio, desviación estándar, mínimo y máximo de la producción primaria, reportados para las regiones de PBC ( $\text{mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), POTM y GM ( $\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), respectivamente, mientras que el Cuadro 3, presenta los valores de PP ( $\text{mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ) por subregiones (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1994) en el GC (Figura 3) y, el Cuadro 4 muestra los estudios realizados en cada subregión durante las épocas fría y cálida.

En promedio, la PP en la PBC fue 50% más alta durante los eventos La Niña (1999, 2003, 2007) que en El Niño (1998, 2002, 2004). Además, se observó importante variabilidad estacional con valores promedio de  $67.20 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1} \pm 31.02 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (desviación estándar) en invierno que fue 1.3 veces mayor que en primavera ( $52.33 \pm 16.34 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Asimismo, la región mostró significativa variación interanual con promedio de  $61.52 \pm 23.07 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (Cuadro 2). La zona de Bahía Magdalena se caracteriza por ser muy productiva debido a las surgencias que se forman de febrero a julio, generando una PP promedio

de  $1.27 \pm 0.98 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  a  $1.73 \pm 0.63 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . El promedio global de la región fue de  $0.77 \pm 0.31 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , que representa una producción anual de  $280 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ .

El Golfo de California presentó una variabilidad significativa entre las temporadas y las subregiones (latitudinal), el promedio más alto de  $168.71 \pm 178.21 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  se estimó en la temporada cálida y fue 61% superior a la temporada fría. Las máximas tasas fotosintéticas se observaron al norte de la región (alto golfo) en las subregiones I, III y IV con promedios de  $305 \pm 83.44 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ;  $424 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  y  $337 \pm 405.88 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente (Cuadro 3). La temporada fría está representada por los meses de noviembre a mayo y la temporada cálida por los meses de junio a octubre. Durante la temporada fría se encontró una marcada variación latitudinal de la temperatura, con valores que van de 17 a 25 °C del alto golfo hacia la boca, mientras que en la temporada cálida se observaron valores de 29 a 34 °C a lo largo del golfo.

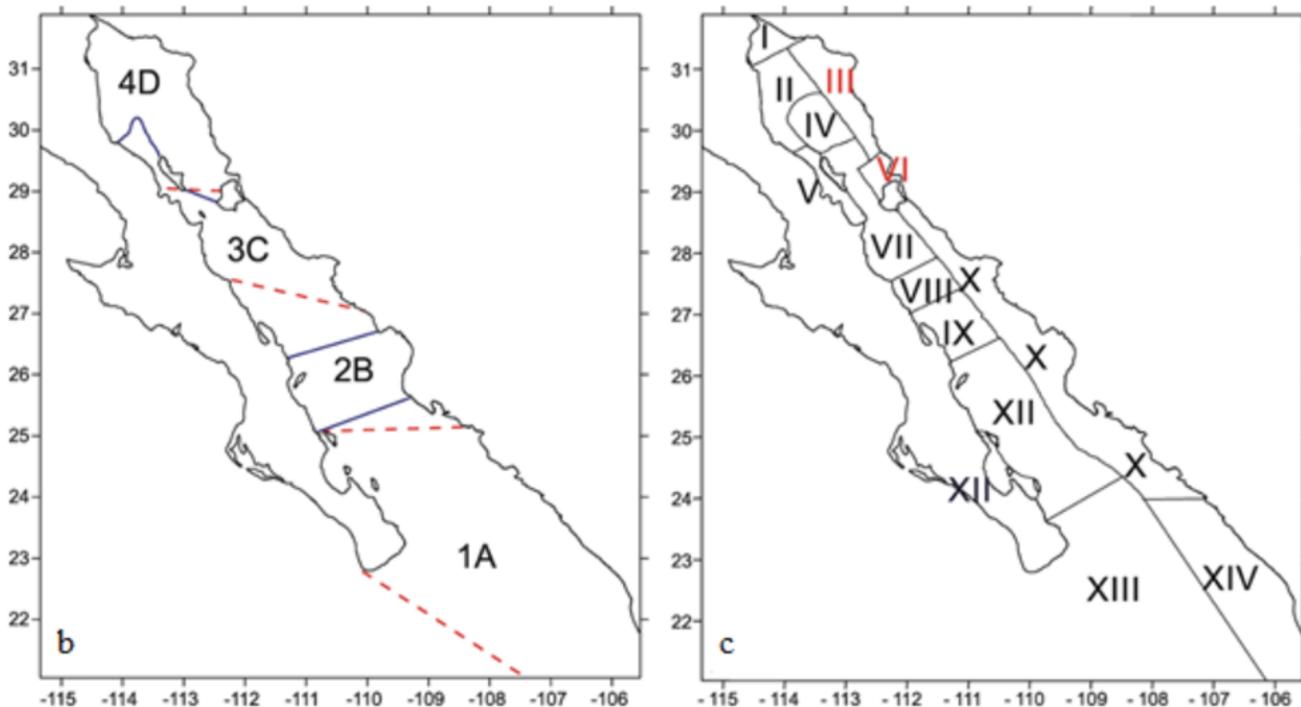


Figura 3. Estudios de producción primaria divididos por subregión en el Golfo de California durante; (a) estación cálida y, (b) estación fría.

De acuerdo a Santamaría-del Ángel *et al.* (1994) y Kahru *et al.* (2004).

**Cuadro 2. Valores promedio de la producción primaria del fitoplancton estimada en el sur de la Corriente de California, frente a la PBC.**

Referencias	Mes-año	PP (mg C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	D. E.	Min	Max	n
Aguirre-Hernández <i>et al.</i> (2004)	Jul 1998	42	29	12	94	9
	Sep 1998	36	9	18	46	9
Cepeda-Morales (2004)	Ene 2000	48	35	11	159	15
	Abr 2000	63	65	7	188	7
	Jul 2000	72	44	29	165	12
	Oct 2000	52	16	29	80	9
	Ene 2001	69	47	38	148	7
	Abr 2001	28	2	27	29	2
	Jun 2001	50	26	21	123	14
	Oct 2001	60	24	31	118	11
	Ene 2002	39	18	17	67	10
	Abr 2002	35	14	17	62	7
	Jul 2002	39	31	20	124	13
Cantú-Ontiveros (2005)	Oct 2002	67	36	39	142	10
	Ene 2003	80	44	36	180	11
	Abr 2003	37	14	25	54	5
	Ene 2005	51	18	33	86	8
De la Cruz-Orozco (2006)	Abr 2005	56	24	28	83	5
	Jul 1998-Oct 2006	55	30	24	114	277
Sosa-Ávalos <i>et al.</i> (2017)	Abr 1999	75	58	22	175	8
	Ago 1999	55	15	40	80	12
	Oct 1999	114	65	48	241	14
De la Cruz-Orozco <i>et al.</i> (2017)	Invierno (1998-2016)	67	31	21	130	109
	Primavera (1998-2016)	52	16	28	85	74
	Verano (1998-2016)	60	18	36	97	150
	Otoño (1998-2016)	64	30	19	114	99
Cervantes-Duarte <i>et al.</i> (2015)*	Surgencia débil (Ago-Ene)					
	2008	0.93	0.49			6
	2009	1.01	0.79			6
	2010	1.30	0.62			6
	2011	1.50	0.78			6
	Surgencia intensa (Feb-Jul)					
	2009	1.73	0.63			6
	2010	1.27	0.98			6
2011	1.32	0.36			6	

\*Los valores promedio reportados por Cervantes-Duarte *et al.* (2015) se expresan en g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.  
Desviación estándar (D.E. mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), número de experimentos (n), mínimo (Min), máximo (Max).

**Cuadro 3. Mediciones de productividad superficial (mg C m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>) por subregión y época en el Golfo de California de 1960 a 2016.**

Subregión	Temporada Fría			Temporada Cálida		
	n	Promedio	D. E.	n	Promedio	D. E.
I	226	246	245	97	364	327
II	1	53		7	92	39
III	0	NP		3	424	647
IV	3	50	44	3	624	889
V	6	76	66	7	153	58
VI	0	NP		1	72	
VII	13	87	96	39	182	184
VIII	6	41	29	4	68	26
IX	6	19	16	2	99	4
X	17	63	70	5	135	138
XI	11	29	31	6	55	35
XII	11	60	34	3	20	4
XIII	8	18	27	11	18	13
XIV	15	49	51	13	56	65

Desviación estándar (D.E.), número de experimentos (n).  
Tomado de Mercado-Santana *et al.* (2017).

La producción primaria en el Pacífico oriental tropical mexicano presentó valores promedio que varían de  $0.13 \pm 0.03$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> a  $2.20 \pm 1.51$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Los valores más altos se estimaron a finales de invierno y durante la primavera y, los más bajos se registraron en otoño, mostrando variabilidad estacional. Adicionalmente, las altas tasas fotosintéticas se encontraron frente a Cabo Corrientes, Lázaro Cárdenas y Zihuatanejo (Cuadro 5). En el Cuadro 6 se muestran los valores promedio de la producción primaria en donde se observa una amplia variación espacial y temporal. El promedio de la PP más alta se estimó en

la pluma y delta del Río Mississippi ( $3.48$  a  $3.80 \pm 2.60$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), plataforma de Luisiana, plataforma oeste de Florida y península de Yucatán ( $1.87 \pm 1.91$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,  $3.86 \pm 2.99$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,  $1.48$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente). Mientras que los valores más bajos se registraron en la parte central del golfo y en los giros anticiclónicos ( $0.12 \pm 0.04$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) Asimismo, los promedios de la PP por estación del año fueron mayores en primavera y verano ( $0.98 \pm 1.16$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,  $0.90 \pm 1.40$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente) y los más bajos se presentaron en otoño ( $0.69 \pm 0.90$  g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

Cuadro 4. Número total de registros de productividad primaria superficial reportada en el Golfo de California por subregión, 1960-2016

[año de muestreo]	Mes-año	Región/Número de registros de <sup>14</sup> C													
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
<b>Temporada fría</b>															
SIO (1967) en Zeitzschel (1969)	May-1960												2	2	4
Leet y Stevenson (1969)	Abr-1967												2		2
Jitts (1969) en Zeitzschel (1969)	May/Dic-1968											7	1	1	8
Zeitzschel (1969)	Nov/Dic-1968				1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	10
Calvario-Martínez y De la Lanza-Espino (1981)	May-1980, Feb-1981, May-1981													3	3
Valdez-Holguín y Lara-Lara (1987)	Mar-1983						2	1	4	2	1		1		10
Lara-Lara y Valdez-Holguín (1988)	Mar/Abr-1984						2	1	1	3	1				8
Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988)	Dic-1981		1	1	2	1									5
Bazán-Guzmán y Lara-Lara (1992)	Nov/Dic-1984						1	1	2	3					7
Millán-Núñez y Lara-Lara (1995)															
Lara-Lara <i>et al.</i> (1993)	Abr-1985							1	2	2					5
Millán-Núñez <i>et al.</i> (1993)	Nov-1987						2			1					3
Gaxiola-Castro <i>et al.</i> (1995)	Feb/Mar-1990				1	1	3	3		3	2				9
Millán-Núñez <i>et al.</i> (1999)	May-1991	23													23
Valdez-Holguín <i>et al.</i> (1995)	May-1992			1	1	1	1	1					1		5
Lara-Lara and Bazán-Guzmán (2005)	Feb-1999												1	1	2
Verdugo-Díaz <i>et al.</i> (2012)	May-2000													3	3
Verdugo-Díaz <i>et al.</i> (2014)	May-2005, Dec-2006, Feb-2007													5	5
López-Sandoval <i>et al.</i> (2009)	May-2002													3	3





Continuación Cuadro 4...

Mercado-Santana <i>et al.</i> (2017)	Jun-2008	6	2	2	1	3	3	1	39	4	2	5	6	17	14	19	11	13	28	201
Mercado-Santana <i>et al.</i> (2017)	Jun-2010	6																		6
Mercado-Santana <i>et al.</i> (2017)	Ago-2012	6																		6
Mercado-Santana <i>et al.</i> (2017)	Sep-2012	6																		6
Mercado-Santana <i>et al.</i> (2017)	Jun-2013	6																		6
Mercado-Santana <i>et al.</i> (2017)	Jun-2015																		9	9
<b>Total por región en temporada cálida</b>		<b>97</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>39</b>	<b>1</b>	<b>52</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>22</b>	<b>17</b>	<b>14</b>	<b>19</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>28</b>	<b>201</b>
<b>Total por región</b>		<b>323</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>1</b>	<b>52</b>	<b>1</b>	<b>52</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>22</b>	<b>17</b>	<b>14</b>	<b>19</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>28</b>	<b>524</b>

Tomado de Mercado-Santana *et al.* (2017).

Cuadro 5. Valores promedio de producción primaria integrada en la zona eufótica medida en el POTM de 1967 a 2008.

Referencias	Mes-año	PP promedio (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	D. E. (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Min	Max	n
Owen y Zeitzschel (1970)	Abr-May 1967	0.23	0.09	0.09	0.32	
	Jun-Jul 1967	0.15	0.05	0.12	0.24	
	Ago-Sep 1967	0.22	0.13	0.05	0.39	
	Oct-Nov 1967	0.13	0.03	0.09	0.18	
	Dic 1967-Ene 1968	0.13	0.04	0.09	0.20	
	Feb-Mar 1968	0.27	0.06	0.19	0.32	
	Ene 1981	0.63	0.44	0.30	1.40	25
Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego (1986)	Abr-May 2001	0.95	0.50	0.31	1.98	11
López-Sandoval (2004)	Mayo 2002	0.37	0.36	0.11	0.64	10
López-Sandoval <i>et al.</i> (2009)	Nov 2002	0.20	0.20	0.12	0.31	8
	Jun 2003	0.45	0.45	0.25	0.51	10
	Jun 2005	1.35	1.58	0.41	6.53	13
Molina-Cárdenas (2008)	Nov 2005	0.51	0.29	0.16	1.26	14
	Mar 2005	2.20	1.51	1.33	6.40	10
Moreno-Ramos (comunicación personal)	Jul-Ago 2005	1.19	0.66	0.61	2.79	9
Pérez-Mora (2009)	Ago 2006	1.28	0.51	0.51	2.04	12
	Mar 2007	1.25	0.87	0.34	3.29	13
Sosa-Ávalos (comunicación personal)	Nov-Dic 2008	0.77	0.50	0.24	1.53	10

Desviación estándar (D.E. mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), número de experimentos (n), mínimo (Min), máximo (Max).

Cuadro 6. Valores promedio de producción primaria integrada en la zona eufótica medida en el GM desde 1956 a 2007. Desviación estándar (D.E.), mínimo (Min), máximo (Max), número de experimentos (n).

Referencias	Lugar	Mes-año	PP promedio (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	D. E. (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Min (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Max (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	n
Biggs y Ressler (2001)		1960 a 1970	> 2.00				
El-Sayed <i>et al.</i> (1972)		1964 a 1971	> 0.13				
Barreiro-Guemes <i>et al.</i> (2003)	Plataforma de Yucatán Plataforma de Texas y Louisiana		1.48 0.95				
Lohrenz <i>et al.</i> (1997)	Región oriental y central (frente Río Mississippi y Louisiana) Región occidental	1988-1994 1988-1994	0.3 a 3.8 0.6 a 3.3				
	Pluma del río	Jul-Ago 1990	3.8				
	Pluma del río	Mar 1991	0.28				
	Pluma del río	Abr 1992	1.9				
	Pluma del río	May 1992	3.8				
	Oriental	Jul-Ago 1990	3.7				
	Oriental	Mar 1991	0.29				
	Oriental	Abr 1992	1.2				
	Oriental	May 1992	1.3				
Lohrenz <i>et al.</i> (1997)	Delta Mississippi	Jul	3.07	3.06	0.16	10.84	23
		Ago	2.67	1.02	0.46	3.55	7
		Mar	0.47	0.55	0.06	2.19	19
		Sep	0.87	0.59	0.27	2.99	26
		Abr	1.56	1.34	0.13	6.27	30
		May	1.56	1.64	0.21	6.38	12
		Oct	0.87	0.67	0.16	2.09	11

Continuación Cuadro 6...

Referencias	Lugar	Mes-año	PP promedio (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	D. E. (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Min (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Max (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	n
Lohrenz <i>et al.</i> (1997)	Delta Mississippi	Mar	2.53	2.34	0.39	7.40	11
		Abr	2.66	2.22	0.21	7.76	8
		May	1.38	0.32	1.00	1.68	4
		Oct	1.66	0.76	0.59	2.57	5
Lohrenz <i>et al.</i> (1997)	Plataforma Lousiana	Oct	1.32	0.55	0.62	1.78	5
	Norte GM	May	0.28				
Lohrenz <i>et al.</i> (1999)	Aguas oceánicas		0.14 a 0.48				
Herrera-Silveira <i>et al.</i> , 2010)			0.41 a 0.82				
Curl (1956)	Bahía Apalachee (estuarino/ costero)	Abr	2.80				
		Jun	3.80				
Bittaker (1975)	Ecofina (estuarino/costero)	Abr-Nov	0.11	0.05	0.06	0.21	10
	Control	Abr-Dic	0.14	0.09	0.05	0.31	12
	Fenholloway	Abr-Dic	0.29	0.13	0.06	0.44	8
	Contaminado	Abr-Nov	0.23	0.12	0.03	0.40	9
Randall y Day (1987)	Bahía Fourleague (estuarino/ costero)	Feb-Dic	3.86	2.99	0.01	9.60	14
Madden (1992)	Bahía Fourleague (estuarino/ costero)	Ene-Dic	1.19	0.80	0.01	2.50	12
Pennock <i>et al.</i> (1994)	Bahía Mobile (estuarino/costero)	Estacional	0.78	0.47	0.20	1.70	11
Thomas and Simmons (1960)	Río Mississippi (delta)	Nov	0.51	0.67	0.02	1.50	4
		May	1.03	0.81	0.45	1.60	2

Continuación Cuadro 6...

Referencias	Lugar	Mes-año	PP promedio (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	D. E. (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Min (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Max (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	n
Fucik y El-Sayed (1979)	Río Mississippi (delta, plataforma)	Ene-Oct	1.26	1.31	0.18	3.41	8
Sklar y Turner (1981)	Río Mississippi (delta, control)	Ene-Nov	1.23	0.92	0.48	2.97	7
Lohrenz <i>et al.</i> (1990)	Bahía Barataria	Oct-Sep	0.75	0.73	0.12	2.23	9
Sanchez (1992)	Delta Mississippi	Abr	1.98	1.47	0.67	5.20	17
	Noroeste GM	Jul	1.20	1.32	0.20	5.00	13
		Oct	0.47	0.32	0.20	1.10	9
Redalje <i>et al.</i> (1994)	Delta Mississippi	Jul	3.48	2.60	1.00	8.20	7
		Ago	1.79	0.90	0.58	3.00	5
		Mar	1.29	2.02	0.12	4.88	5
		Sep	0.70	0.59	0.18	1.65	5
		May	1.62	1.55	0.28	3.86	4
Redalje (1992)	Norte GM	Mar/May/Jul	0.41	0.15	0.30	0.58	3
	Noreste GM	Oct	0.53	0.07	0.47	0.61	3
Biggs (1992)	Giro anticiclónico	Oct	0.30	0.10	0.17	0.42	5
	Giro ciclónico	Nov	0.25				
Sanchez (1992)	Giro anticiclónico	Mar	0.12	0.04	0.08	0.17	5
El-Sayed y Turner (1977)	Occidental GM	Oct-Nov	0.18	0.11	0.02	0.30	9
	Occidental GM	Jun	0.10	0.08	0.03	0.20	9
	Oriental GM	Jun-Ago	0.48	0.44	0.20	1.60	9
Lohrenz <i>et al.</i> (1995)	Norte GM	Mar/May/Jul	0.20	0.17	0.08	0.46	4
	Plataforma oeste Florida	Oct	1.69	0.40	1.22	2.27	5
Ortner <i>et al.</i> (1984)	Oriental GM	Ene-Feb	0.46	0.41	0.17	0.74	2

Continuación Cuadro 6...

Referencias	Lugar	Mes-año	PP promedio (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	D. E. (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Min (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Max (g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	n
Lehrter <i>et al.</i> (2009)	Plataforma Lousiana	Mar	0.92	0.44	0.03	2.05	26
		Abr	1.41	1.37	0.13	5.16	36
		May	1.04	0.88	0.10	4.68	66
		Jun	1.09	1.17	0.06	5.91	57
		Ago	1.87	1.91	0.26	12.72	70
		Sep	1.49	0.97	0.17	5.73	86
		Oct	0.34	0.44	0.01	1.80	33
		Jul	0.49	0.38	0.04	2.58	136
		Ago	0.28	0.25	0.01	1.50	168
		Nov	0.40	0.40	0.03	2.96	307
Chen <i>et al.</i> (2000)	Noroeste GM	Abr	0.51	0.54	0.03	3.31	77
		May	0.39	0.26	0.09	1.94	76
		May	0.28				
		Jun	0.33				
		Jul	1.10				
Lohrenz <i>et al.</i> (2014)	Océano abierto Noroeste Texas Centro norte Plataforma oeste Florida Sureste México	Invierno	0.98	1.16	0.01	7.76	422
		Primavera	0.90	1.40	0.01	12.72	534
		Verano	0.84	1.21	0.01	4.20	16
		Otoño	0.69	0.90	0.01	9.60	545
			0.23				

## DISCUSIÓN

En los mares de México se han realizado importantes estudios sobre la producción primaria del fitoplancton, pero se carece del conocimiento de la cantidad de material orgánico almacenado en aguas más profundas. La mayor parte de los datos de PP se encuentran reportados en artículos indizados, arbitrados y, como literatura gris (tesis, memorias de congresos, reportes técnicos y datos no publicados). Un alto porcentaje de artículos fueron encontrados en el GM, GC y PBC, pero fueron escasos en el POTM. La mayoría de los artículos del GM fueron publicados por investigadores americanos y muy pocos por mexicanos. Por tanto, es necesario fomentar la cultura de publicar en revistas internacionales la información generada en las distintas regiones de los mares mexicanos, sobre todo en la PBC, POTM y GM.

El análisis de los resultados obtenidos en la revisión de la literatura, mostró importante variabilidad estacional y espacial de la productividad primaria en todas las regiones de los mares del país. Las tasas fotosintéticas fueron mayores del 50% en las estaciones costeras, lo que no se observó en las estaciones oceánicas. Esto, como resultado de eventos de surgencias costeras que se presentan en la PBC, GC, POTM (Cepeda-Morales, 2004; Cantú-Ontiveros, 2005; López-Sandoval *et al.*, 2009; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010; Sosa-Avalos *et al.*, 2017; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017; Gómez-Ocampo *et al.*, 2017) y la península de Yucatán; además de las descargas de ríos importantes a la zona costera como el Mississippi, Tuxpan, Grijalva, Usumacinta (Lohrenz *et al.*, 2014), entre otros, en el GM y el Balsas frente a Michoacán y Guerrero. Estos procesos físicos, junto con la formación de giros ciclónicos, suministran nutrientes a las aguas superficiales de la zona costera que son aprovechados por los productores primarios, incrementando la producción primaria (Pennington *et al.*, 2006).

Adicionalmente, el océano Pacífico se vio afectado por eventos interanuales como El Niño y La Niña, que ocasionan variabilidad de la PP. La Niña de 1999, 2003 y 2007 generó altas tasas fotosintéticas en la PBC, como resultado de mayor formación de surgencias que suministran nutrientes a las aguas superficiales (Cepeda-Morales, 2004; Cantú-Ontiveros, 2005; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010; Sosa-Avalos *et al.*, 2017; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017). Durante la influencia de eventos, El Niño 1998, 2002 y 2004, la PP disminuyó significativamente, debido al calentamiento de las

aguas que profundizan la termoclina y los nutrientes hacia aguas más profundas (Aguirre-Hernández *et al.*, 2004; Cepeda-Morales, 2004; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017).

Las máximas tasas de PP fueron se estimaron en invierno y, las más bajas, en primavera en la región de la PBC (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017). La diferencia en los valores entre estas dos estaciones del año se debe, en parte, a la menor cantidad de experimentos realizados durante los cruceros de primavera, por las condiciones climatológicas que prevalecen en la región, aun cuando en primavera se presenta la mayor cantidad de surgencias. En invierno también se observan procesos físicos de mesoescala (remolinos ciclónicos, meandros y surgencias; Durazo *et al.*, 2010) que podrían suministrar nutrientes a la zona eufótica y, favorecer el crecimiento y dominancia del microfitoplancton (diatomeas, dinoflagelados), que producen mayores tasas fotosintéticas (Sosa-Avalos *et al.*, 2017; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017).

El GC presenta tres importantes mecanismos de fertilización natural: el intercambio de agua con el océano Pacífico, las surgencias costeras y la mezcla por corrientes de marea (Álvarez-Borrego y Giles-Guzmán, 2012). Estos procesos físicos promueven valores altos de PP, superiores a  $300 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , los cuales en promedio son mayores a los reportados para la PBC ( $280 \pm 113 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), POTM ( $236 \pm 208 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) y GM ( $308 \pm 427 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). El promedio de la PP fue mayor en verano (estación cálida) y menor en invierno (estación fría) debido a las surgencias que se forman frente a la costa de Sinaloa y Sonora. La PP superficial muestra una distribución espacial con valores más altos al norte del área de estudio ( $355 \pm 163 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ) y los más bajos en la boca del golfo ( $29 \pm 20 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ; Cuadro 3), considerada como una zona oligotrófica.

La producción primaria en el POTM mostró los valores promedio más altos durante la primavera de  $1.00 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (D. E.  $\pm 0.35 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), mientras que los más bajos se estimaron en invierno ( $0.24 \pm 0.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Adicionalmente, presentó variabilidad interanual como resultado de la formación de surgencias costeras y mayor disponibilidad de nutrientes, así como a la influencia de la Corriente de California (Godínez *et al.*, 2010), esto permitió que en la zona de Cabo Corrientes se estimaran las máximas tasas de producción primaria en primavera (López-Sandoval *et al.*, 2009). En invierno son escasos los experimentos de PP realizados en la región, por ello es más difícil establecer las

causas y procesos que generan estos bajos valores. Una posible causa puede ser la baja incidencia de los vientos que producen surgencias costeras desde Cabo Corrientes hacia el sur, así como menor presencia del brazo tropical de la Corriente de California.

En el Golfo de México los valores más altos se reportaron en las descargas de importantes ríos caudalosos, bahías (Fourleague, Mobile), plataforma de Luisiana, en el oeste de la plataforma de Florida (Lohrenz *et al.*, 2014), frente a la Península de Yucatán y en la plataforma de Campeche (Cuadro 6). Bajos valores son típicos de muchas de las estaciones del este del Golfo, pero las que se localizan al oeste son más productivas, este patrón responde a la variabilidad temporal más que la espacial (El-Sayed *et al.*, 1972). El GM también presentó variación estacional con altos valores en primavera y verano y, bajas tasas fotosintéticas en otoño. Las altas tasas de PP son como resultado de las descargas de agua dulce por los ríos y la influencia de los “vientos norte” que generan mezcla vertical y, aportan importantes concentraciones de nutrientes a las aguas superficiales del GM, mientras que en otoño las bajas tasas de PP están asociadas

a la influencia de aguas tropicales más cálidas, pobres en nutrientes, que profundiza la termoclina (Lohrenz *et al.*, 1997; Pennock *et al.*, 1999).

Los estudios de producción primaria realizados hasta el momento en las diferentes regiones del país, solamente se han enfocado a conocer la cantidad de CO<sub>2</sub> fijado por el fitoplancton que, a través del proceso fotosintético, es convertido en material orgánico en la zona eufótica. Sin embargo, se desconoce cuánto de este material formado es exportado hacia aguas más profundas por medio de la bomba biológica. Por ejemplo, en las regiones donde ocurren intensas surgencias costeras como en la PBC, GC, POTM (Cabo Corrientes) y GM (Península de Yucatán), alrededor del 50% o más del material orgánico formado es exportado hacia aguas más profundas por hundimiento de las partículas, un porcentaje menor es exportado por pastoreo del zooplancton debido al desacoplamiento entre el pico máximo de fitoplancton y del zooplancton (Sarmiento y Gruber, 2006; Mann y Lazier, 2006). Cuando las surgencias no son tan intensas, un alto porcentaje (> 50%) del fitoplancton es consumido por el zooplancton, exportando la materia orgánica consumida al momento de migrar hacia aguas más profundas. Por consiguiente, es necesario llevar a cabo simultáneamente estudios de producción primaria, tasas de pastoreo por zooplancton (Linacre *et al.*, 2017)

y colocar trampas de sedimentos, para conocer el flujo de carbono orgánico a través de la columna de agua y poder estimar de forma gruesa los reservorios de carbono en los mares mexicanos.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los valores de producción primaria reportados para las cuatro regiones mencionadas muestran una gran variabilidad estacional e interanual. El promedio del coeficiente de variación (C.V.) de la PP estacional fue de 38.64, 104.26, 67.25 y 137 por ciento en la PBC, GC, POTM y GM, respectivamente. El promedio del C.V. de la PP interanual fue de 40.28% en PBC, 112.86% en el GC, 88.33% para el POTM y 138.53% en el GM. Los valores más altos se registraron en las estaciones costeras de la PBC, POTM y GM, mientras que en el GC se reportaron en el alto golfo, así como entre el norte de Sinaloa y Sonora. Esencialmente son los procesos físicos de mesoescala como las surgencias costeras y los remolinos, los que provocan aumento en la producción primaria en todas las regiones estudiadas, excepto en el GM, en donde además de estos procesos, influyen las descargas de ríos (Mississippi, Coatzacoalcos, Tuxpan, Usumacinta, Grijalva, entre otros) sobre la plataforma continental. Estos ríos transportan grandes cantidades de nutrientes que ocasionan incremento en la producción primaria. Se estimó un proxy de la producción primaria anual para cada región que en promedio fue de 280, 759, 236 y 308 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> en la PBC, GC, POTM y GM, respectivamente, siendo el GC > 2 veces más productivo que las otras regiones del país.

A pesar de que en el GM se localizaron estudios y bases de datos que describen de manera general el patrón estacional, interanual y latitudinal, de la producción primaria, la mayoría de estos se realizaron en las costas de Estados Unidos de América y muy pocos datos se encuentran en las aguas de México. Por tanto, es necesario implementar un programa sistemático multidisciplinario a mediano plazo, que permita conocer los procesos oceanográficos que ocurren en las aguas mexicanas del golfo, sobre todo lo relacionado con los procesos biológicos y químicos de la región. El programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), es un ejemplo de los programas que se deberían implementar en otras regiones del Pacífico mexicano, donde son escasos los estudios oceanográficos, como ocurre en la parte tropical del país (POTM). Esto llevaría a entender la

variación de las pesquerías de importancia comercial que se desarrollan en el ecosistema pelágico, los flujos de carbono a través de la columna de agua y los almacenes de carbono en los mares mexicanos.

## BASES DE DATOS

De acuerdo con la política del Programa Mexicano del Carbono sobre el acceso libre a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones en México, así como de proporcionar soporte científico a la síntesis del estado del conocimiento del carbono en ecosistemas acuáticos de México, las bases de datos de este trabajo están disponibles en [http://pmccarbono.org/pmc/bases\\_datos/](http://pmccarbono.org/pmc/bases_datos/), [doi.org/10.1594/PANGAEA.899222](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.899222) y <http://imecocal.cicese.mx/>.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por los proyectos financiados que permitieron estimar la producción primaria en las cuatro regiones mencionadas. Proyectos de las distintas instituciones educativas y de investigación (CICESE, UABC, IPN-CICIMAR, UNISON, IPN-CIIDIR, UCOL, IPN-CINVESTAV, entre otras). Programas como el IMECOCAL y PROCOMEX I y II, Fundaciones nacionales e internacionales, a la tripulación de los distintos buques oceanográficos (EL PUMA, Francisco de Ulloa, Alpha Helix, Altair, Río Tecolutla) que participaron en los cruceros, así como a la SEMAR. Adicionalmente, se agradece al North American Carbon Program por la base de datos de producción primaria del Golfo de México y, a todos los proyectos y fundaciones de EEUU que generaron datos a través de cruceros oceanográficos en esta región.

## LITERATURA CITADA

- Aguirre-Hernández, E., G. Gaxiola-Castro, S. Nájera-Martínez, T. Baumgartner, M. Kahru and B. G. Mitchell. 2004. Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters, and primary production off Baja California: summer and autumn 1998. *Deep-Sea Research II* 51:799-816.
- Álvarez-Borrego, S. and A. D. Giles-Guzmán. 2012. Opal in the Gulf of California sediments as a tool to estimate the vertical component of water exchange between the gulf and the Pacific. *Botanica Marina* 55:161-168.
- Álvarez-Borrego, S. and G. Gaxiola-Castro. 1988. Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton. *Continental Shelf Research* 8:37-47.
- Barreiro-Guemes, M. T., M. Signoret-Poillon and C. Bulit-Gámez. 2003. Phytoplankton biomass and production distribution patterns in the Gulf of Mexico. pp. 125-142. En: M. T. Barreiro-Guemes, M. V. Meave-Del Castillo, M. Signoret-Poillon and M. G. Figueroa-Torres (eds.). *Mexican studies of plankton*. Sociedad Mexicana de Planctología, La Paz.
- Bazán-Guzmán, C. y J. R. Lara-Lara. 1992. Biomasa y productividad primaria del fitoplancton por fracciones de tamaño en el Golfo de California durante el otoño de 1984. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas, Serie Ecología. CICESE. 61 p.
- Biggs, D. C. 1992. Nutrients, plankton and productivity in a warm-core ring in the western Gulf of Mexico. *Journal Geophysical Research* 97:2143-2154.
- Biggs, D. C. and P. H. Ressler. 2001. Distribution and abundance of phytoplankton, zooplankton, ichthyoplankton and micronekton in the Deepwater Gulf of Mexico. *Gulf of Mexico Science* 19:7-29.
- Bittaker, H. F. 1975. A comparative study of the phytoplankton and benthic macrophyte primary productivity in a polluted versus an unpolluted coastal area. M.S. Thesis. Florida State University, Tallahassee, FL. 174 p.
- Callejas-Jiménez, M., E. Santamaría-del Ángel, A. González-Silvera, R. Millan-Núñez and R. Cajal-Medrano. 2012. Dynamic Regionalization of the Gulf of Mexico based on normalized radiances (nLw) derived from MODIS-Aqua. *Continental Shelf Research* 37:8-14.
- Calvario-Martínez, O. y G. De la Lanza-Espino. 1981. Productividad primaria y productos de excreción en el noreste de la isla Isabel, México. Resúmenes del VII Simposium Latinoamericano sobre Oceanografía Biológica. Acapulco, Guerrero.
- Cantú-Ontiveros, J. P. 2005. Producción primaria en la región sur de la Corriente de California durante enero y abril del 2003. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, Baja California.
- Cepeda-Morales, J. C. 2004. Aplicación de un modelo para estimar la producción primaria por sensores remotos en la región sur de la Corriente California: Evaluación y consecuencias. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California. 85 p.
- Cervantes-Duarte, R., R. Prego, G. Gaxiola-Castro, S. López-López, F. Aguirre-Bahena and I. Murillo-Murillo. 2015. Intra-annual upwelling patterns and its linkage with primary production in the euphotic zone (24.5°N) of Southern Baja California coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 157:51-58.
- Chen, X., S. E. Lohrenz and D. A. Wisenburg. 2000. Distribution and controlling mechanisms of primary production on the Louisiana-Texas continental shelf. *Journal of Marine Systems* 25:179-207.

- Curl, H. C., Jr. 1956. The hydrography and phytoplankton ecology of the inshore, northeastern Gulf of Mexico. Ph.D. dissertation. Florida State University, Tallahassee, FL. 285 p.
- De la Cruz-Orozco, M. E. 2006. Contribución de la producción primaria a la variabilidad de la presión parcial de bióxido de carbono (pCO<sub>2</sub>) durante otoño (2004), invierno y primavera (2005) en la región de IMECOCAL. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California. 100 p.
- De la Cruz-Orozco, M. E., E. Gómez-Ocampo, L. E. Miranda-Bojórquez, J. Cepeda-Morales, R. Durazo, B. E. Lavaniegos, T. L. Espinosa-Carreón, R. Sosa-Ávalos, E. Aguirre-Hernández and G. Gaxiola-Castro. 2017. Phytoplankton biomass and production off Baja California Peninsula: 1997-2016. *Ciencias Marinas* 43:217-228.
- Durazo, R., A. M. Ramírez-Manguilar, L. E. Miranda y L. A. Soto-Mardones. 2010. Climatología de variables hidrográficas. pp. 25-57. En: G. Gaxiola-Castro G y R. Durazo (eds.). *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California 1997-2007*. Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- El-Sayed, S. Z. and J. T. Turner. 1977. Productivity of the Antarctic and tropical/subtropical regions: a comparative study. pp. 463-503. *In*: M. J. Dunbar (ed.). *Polar Oceans*. Arctic Institute of North America. McGill University Montreal.
- El-Sayed, S. Z., W. M. Sackett, L. M. Jeffrey, A. D. Fredericks, R. P. Saunders, P. S. Conger, G. A. Fryxell, K. A. Steidinger and S. A. Earle. 1972. Primary productivity and standing crop of phytoplankton. Chemistry, primary productivity, and benthic algae of the Gulf of Mexico. pp. 22-29. *In*: V. C. Bushnell, W. M. Sackett and L. M. Jeffrey (eds.). *Serial Atlas of the Marine Environment*. American Geographical Society, New York.
- Fucik, K. W. and S. Z. El-Sayed. 1979. Effect of oil production and drilling operations on the ecology of phytoplankton in the OEI study area. *Rice University Studies* 65:325-354.
- Gattuso, J. P. and L. Hansson. 2011. *Ocean Acidification*. Oxford University Press. 326 p.
- Gaxiola-Castro, G. and S. Álvarez-Borrego. 1986. Primary productivity of the Mexican Pacific. *Ciencias Marinas* 12:26-33.
- Gaxiola-Castro, G., J. Cepeda-Morales, S. Nájera-Martínez, T. L. Espinosa-Carreón, M. E. De la Cruz-Orozco, R. Sosa-Avalos, E. Aguirre-Hernández y J. P. Cantú-Ontiveros. 2010. Biomasa y producción del fitoplancton. pp. 59-85. En: G. Gaxiola-Castro y R. Durazo (eds.). *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California 1997-2007*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, D. F., México.
- Gaxiola-Castro, G., J. García-Córdova, J. E. Valdez-Holguin and M. Botello-Ruvalcaba. 1995. Spatial distribution of chlorophyll *a* and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research* 15:1043-1059.
- Godínez, V. M., E. Beier, M. F. Lavín and A. Kurczyn. 2010. Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observation. *Journal Geophysical Research* doi.org/10.1029/2009JC005705.
- Gómez-Ocampo, E., G. Gaxiola-Castro, R. Durazo and E. Beier. 2017. Effects of the 2013-2016 warm anomalies on the California Current phytoplankton. *Deep-Sea Research II* 151:64-76.
- Herrera-Silveira, J. A., S. Morales and C. Álvarez. 2011. Productivity. pp. 1-39. *In*: UNIDO. *Transboundary diagnostic analysis. Integrated Assessment and Management of the Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem*. United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria.
- Holding, J. M., C. M. Duarte, M. Sanz-Martín, E. Mesa, J. M. Arrieta, M. Chierici, I. E. Hendriks, L. S. García-Corral, A. Regaudie-de-Gioux, A. Delgado, M. Reigstad, P. Wassmann and S. Agustí. 2015. Temperature dependence of CO<sub>2</sub>-enhanced primary production in the European Arctic Ocean. *Nature Climate Change* 1-4.
- Jitts, H. R. 1969. Data collected by the Australian participants during the May, 1968 sea trials of the SCOR/UNESCO Working Group 15 on Photosynthetic radiation in the sea in the Gulf of California on board the Ellen B. Scripps. Report Division Fisheries Oceanography. C.S.I.R.O. Australia 43.
- Kahru, M., S. G. Marinone, S. E. Lluch-Cota, A. Parés-Sierra and B. G. Mitchell. 2004. Ocean-color variability in the Gulf of California: Scales from days to ENSO. *Deep-Sea Research II* 51:139-146.
- Lara-Lara, J. R. and C. Bazán-Guzmán. 2005. Distribution of chlorophyll and primary production by size classes along the Mexican Pacific coast. *Ciencias Marinas* 31:11-21.
- Lara-Lara, J. R. y J. E. Valdez-Holguin. 1988. Biomasa y productividad primaria del Golfo de California por fracción de tamaños durante primavera de 1984. *Ciencias Marinas* 14:1-14.
- Lara-Lara, J. R., R. Millán-Núñez, J. L. Lara-Osorio y C. Bazán-Guzmán. 1993. Productividad y biomasa del fitoplancton por clases de tamaño, en la parte central del Golfo de California durante primavera, 1985. *Ciencias Marinas* 19:137-154.
- Lee, Z., J. Marra, M. J. Perry and M. Kahru. 2015. Estimating oceanic primary productivity from ocean color remote sensing: A strategic assessment. *Journal of Marine Systems* 149:50-59.
- Leet, W. S. and M. R. Stevenson. 1969. Oceanographic observations for the Mazatlán project. October 1966–August 1967.
- Lehrter, J. C., Murrell, M. C. and J. C. Kurtz. 2009. Interactions between freshwater input, light, and phytoplankton dynamics on the Louisiana continental shelf. *Continental Shelf Research* 29:1861-1872.

- Lewis, M. R. 1992. Satellite ocean color observations of global biogeochemical cycles. pp. 139-153. *In*: P. G. Falkowski and A. D. Woodhead (eds.). Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea. Plenum Press, New York.
- Linacre, L., J. R. Lara-Lara, U. Mirabal-Gómez, R. Durazo and C. Bazán-Guzmán. 2017. Microzooplankton grazing impact on the phytoplankton community at a coastal upwelling station off northern Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas* 43:93-108.
- Lohrenz, S. E., D. A. Wisenburg, R. A. Arnone and X. Chen. 1999. What controls primary production in the Gulf of Mexico? pp. 151-170. *In*: H. Kumpf, K. Steidinger and K. Sherman (eds.). The Gulf of Mexico large marine ecosystem. Blackwell Science Ltd.
- Lohrenz, S. E., D. G. Redalje, G. L. Fahnenstiel, M. J. McCormick, G. A. Lang, K. Prasad, X. Chen, D. A. Atwood and B. Chen. 1995. Phytoplankton rate processes in coastal waters of the northern Gulf of Mexico and relationships to environmental conditions. Nutrient-Enhanced Coastal Ocean Productivity. N. C. O. P. Office, Baton Rouge, LA, Sea Grant Publications. pp. 56-66.
- Lohrenz, S. E., G. L. Fahnenstiel, D. G. Redalje, G. A. Lang, X. Chen and M. J. Dagg. 1997. Variations in primary production of Northern Gulf of Mexico continental shelf waters linked to nutrient inputs from Mississippi River. *Marine Ecology Progress Series* 155:45-54.
- Lohrenz, S. E., M. J. Dagg and T. E. Whittedge. 1990. Enhanced primary production at the plume-oceanic interface of the Mississippi River. *Continental Shelf Research* 10:639-664.
- Lohrenz, S. E., S. Chakraborty, M. Huettel, J. Herrera-Silveira, K. Gundersen, D. Redalje, J. Wiggert, B. E. Denton and J. Lehrt. 2014. Primary Production. pp. 28-38. *In*: H. M. Benway and P. G. Coble (eds.). Report of the U.S. Gulf of Mexico Carbon Cycle Synthesis Workshop, March 27-28, 2013. Ocean Carbon and Biogeochemistry Program and North American Carbon Program.
- López-Sandoval, D. C. 2004. Estimación de la productividad primaria en el Pacífico central mexicano. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad de Colima. 46 p.
- López-Sandoval, D. C., J. R. Lara-Lara, M. F. Lavín, S. Álvarez-Borrego and G. Gaxiola-Castro. 2009. Primary productivity in the Eastern tropical off Cabo Corrientes, Mexico. *Ciencias Marinas* 35:169-182.
- Madden, C. F. 1992. Control of phytoplankton production in a shallow, turbid estuary. Ph.D. dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge.
- Mann, K. H. and J. R. N. Lazier. 2006. Dynamics of marine ecosystems: Biological-Physical Interactions in the Oceans. Third Edition. Blackwell Publishing. 496 p.
- Mercado-Santana, J. A., E. Santamaría-del Ángel, A. González-Silvera, L. Sánchez-Velasco, F. Gracia-Escobar, R. Millán-Núñez and C. Torres-Navarrete. 2017. Productivity in the Gulf of California large marine ecosystem. *Environmental Development* 22:18-29.
- Millán-Núñez, R. y R. Lara-Lara. 1995. Productividad primaria del fitoplancton del Pacífico mexicano: un diagnóstico. pp. 31-60. *En*: F. González-Farías y J. De -la-Rosa (eds.). Temas de Oceanografía Biológica en México. SEP-UABC Mexicali.
- Millán-Núñez, R., E. Santamaría-del Ángel, R. Cajal-Medrano y O. A. Barocio-León. 1999. El delta del Río Colorado: un ecosistema con alta productividad primaria. *Ciencias. Marinas* 25:509-524.
- Millán-Núñez, R., R. Cajal-Medrano, E. Santamaría-del Ángel y E. Millán-Núñez. 1993. Productividad primaria y Clorofila *a* en la parte central del Golfo de California (otoño, 1987). *Ciencias Marinas* 19:29-40.
- Molina-Cárdenas, C. A. 2008. Productividad primaria in situ en el Pacífico central mexicano durante 2005. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad de Colima. 51 p.
- Moreno-Ramos, O. L. Producción primaria y clorofila *a* medidas en la margen continental del Pacífico tropical mexicano durante invierno y verano de 2005. Comunicación personal.
- Ortner, P. B., R. L. Ferguson, S. L. Piotrowicz, L. Chesal, G. Berberian and A. V. Palumbo. 1984. Biological consequences of hydrographic and atmospheric advection within the Gulf Loop intrusion. *Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 31:1101-1120.
- Owen, R. W. and B. Zeitzschel. 1970. Phytoplankton production: seasonal change in the oceanic eastern tropical Pacific. *Marine Biology* 71:32-36.
- Pennington, J. T., K. L. Mahoney, V. S. Kuwahara, D. D. Kolber, R. Calienes and F. P. Chavez. 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69:285-317.
- Pennock, J. R., J. H. Sharp and W. W. Schroeder. 1994. What controls the expression of estuarine eutrophication? Case studies of nutrient enrichment and phytoplankton production from the Delaware Bay and Mobile Bay estuaries, USA. pp. 139-146. *In*: K. Dyer and C. D'Elia (eds.). Changes in Fluxes in Estuaries: Implications from Science to Management. Olsen and Olsen.
- Pennock, J. R., J. N. Boyer, J. A. Herrera-Silveira, R. L. Iverson, T. E. Whittedge, B. Mortazavi and F. A. Comin. 1999. Nutrient behavior and phytoplankton production in Gulf of Mexico estuaries. pp. 109-162. *In*: T. S. Bianchi, J. R. Pennock and R. R. Twilley (eds.). Biogeochemistry of Gulf of Mexico Estuaries. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Pérez-Mora, G. I. 2009. Parámetros fotosintéticos y producción primaria in situ y estimada a partir de modelos globales en el Pacífico tropical mexicano. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad de Colima. 76 p.



- Randall, J. M. and J. W. Jr. Day. 1987. Effects of river discharge and vertical circulation on aquatic primary production in a turbid Louisiana estuary. *Netherlands Journal of Sea Research* 21:231-242.
- Redalje, D. G., S. E. Lohrenz and G. L. Fahnenstiel. 1992. The relationship between primary production and the export of POM from the photic zone in the Mississippi River plume and inner Gulf of Mexico shelf regions. *Nutrient Enhanced Coastal Ocean Productivity, NECOP Workshop Proceedings, October 1991. N. C. O. Program. College Station, Texas, Texas Sea Grant Publications.* pp. 105-110.
- Redalje, D. G., S. E. Lohrenz and G. L. Fahnenstiel. 1994. The relationship between primary production and the vertical export of particulate organic matter in a river impacted coastal ecosystem. *Estuaries* 17:829-838.
- Sanchez, L. 1992. Primary productivity of the northwest Gulf of Mexico: shipboard measurement in July 1990, October 1990, and March 1991. M.S. thesis, Texas A&M University, College Station, TX, 120 p.
- Santamaría-del Ángel, E., S. Álvarez-Borrego and F. E. Müller-Karger. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal Geophysical Research* 99:7411-7421.
- Sarmiento, J. L. and N. Gruber. 2006. *Ocean Biogeochemical Dynamics*. Princeton University Press. 503 p.
- SIO. 1967. CCOFI cruise 6505 (El Golfo II). Data Report Scripps Institution of Oceanography (SIO). Scripps Institution of Oceanography, University of California. Ref. 67-16. 8 p.
- Sklar, F. H. and R. E. Turner. 1981. Characteristics of phytoplankton production off Barataria Bay in an area influenced by the Mississippi River. *Contributions in Marine Science* 24:9-106.
- Sosa-Ávalos, R. 2008. Producción primaria estimada en el Pacífico oriental tropical mexicano. Comunicación personal.
- Sosa-Ávalos, R. 2019. Primary production in the Mexican Pacific Ocean from 1999 to 2008 using C-14. doi.org/10.1594/PANGAEA.899222.
- Sosa-Ávalos, R., R. Durazo, B. G. Mitchell, J. Cepeda-Morales and G. Gaxiola-Castro. 2017. Phytoplankton photosynthetic parameters off Baja California: A tool to estimate primary production with remote sensing data. *Ciencias Marinas* 43:157-172.
- Steemann-Nielsen, E. 1952. The use of radioactive carbon 14C for measuring organic production in the sea. *ICES Journal Marine Science* 18:117-140.
- Thomas, W. H. and E. G. Simmons. 1960. Phytoplankton production in the Mississippi Delta. pp. 103-116. *In*: F. P. Shepard, F. B. Phleger and T. H. van Andel (eds.). *Recent Sediments, Northwest Gulf of Mexico*. American Association of Petrologists, Tulsa.
- Valdez-Holguín, E., R. Cervantes-Duarte y G. Gaxiola Castro. 1995. Productividad primaria en el Golfo de California, calculada a partir de la relación entre irradiancia superficial y clorofila de la zona eufótica. *Ciencias Marinas* 21:311-329.
- Valdez-Holguín, J. E. y J. R. Lara-Lara. 1987. Productividad primaria en el Golfo de California: efectos del evento El Niño 1982-1983. *Ciencias Marinas* 13:34-50.
- Verdugo-Díaz, G., A. Martínez-López, G. Gaxiola-Castro and J. E. Valdez-Holguín. 2012. Phytoplankton photosynthetic parameters from the Gulf of California southern region. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 47:527-535.
- Verdugo-Díaz, G., A. Martínez-López, M. M. Villegas-Aguilera y G. Gaxiola-Castro. 2014. Producción primaria y eficiencia fotosintética en cuenca Alfonso, Bahía de la Paz, Golfo de California, México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 49:527-536.
- Zeitzschel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* 3:201-207.