

REGIONES DEL GOLFO DE CALIFORNIA DETERMINADAS POR LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-*a*

REGIONS OF THE GULF OF CALIFORNIA DETERMINED BY THE DISTRIBUTION OF SEA SURFACE TEMPERATURE AND CHLOROPHYLL-*a* CONCENTRATION

María del Carmen Heras-Sánchez¹, José Eduardo Valdez-Holguín^{2*}, Jaime Garatuza-Payán³, Miguel Ángel Cisneros-Mata⁴, Lourdes Mariana Díaz-Tenorio⁵, Agustín Robles-Morua³, Raúl Gilberto Hazas-Izquierdo⁶

¹ Doctorado en Ciencias con Especialidad en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero No. 818 Sur, Col. Centro, C.P. 85000, Ciudad Obregón, Sonora, México.

² Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

³ Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero No. 818 Sur, Col. Centro, C.P. 85000, Ciudad Obregón, Sonora, México.

⁴ Centro Regional de Investigación Pesquera de Guaymas, Instituto Nacional de Pesca, Calle 20 Sur No. 605, Col. Cantera, C.P. 85400, Guaymas, Sonora, México.

⁵ Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero No. 818 Sur, Col. Centro, C.P. 85000, Ciudad Obregón, Sonora, México.

⁶ Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

RESUMEN

Se realizó un análisis espacio-temporal en el Golfo de California, usando imágenes satelitales con una resolución espacial de 4 km, de los promedios mensuales de la temperatura superficial del mar (TSM) y la concentración de clorofila-*a* (Clo-*a*), para el periodo 1998-2015. Mediante análisis de clúster de TSM y Clo-*a*, se determinaron 12 regiones. Las regiones eutróficas (costeras) cubren el 15 % del área de estudio y contribuyen con el 38 % de la Clo-*a* total. La región 4 (30 % del área de estudio) contribuye el mayor porcentaje (44 %) de la Clo-*a* total. La correlación más alta TSM/Clo-*a* se estima en la región 3 ($R=-0.77$). El comportamiento de la TSM es claramente estacional, pero con variaciones entre las regiones, con una mayor amplitud en la región 4 (13.6 °C) y menor en la región 1 (7.2 °C), la cual registra la menor correlación TSM/Clo-*a*: $R=-0.46$. La Clo-*a* en las regiones 3 y 4 responde a cambios en la TSM, con un desfase de 1 a 2 meses. La región 2 registra una correlación TSM/Clo-*a* de $R=-0.73$, donde los meses de mayores TSM corresponden a los de menores concentraciones de Clo-*a* y viceversa.

Palabras clave: Golfo de California, regiones, TSM, Clo-*a*, análisis de clúster.

ABSTRACT

A spatial-temporal analysis was performed using 4 km of spatial resolution remotely sensed of mean monthly sea-surface temperatures (SST) and chlorophyll-*a* (Chla) in the Gulf of California over the period of 1998 to 2015. SST and Chla clustering analysis identified 12 regions. Eutrophic regions (coastals) cover nearly 15% of the study area and contribute 38% of the total Chla. Region 4 accounts 30% of the study area and includes the largest (44%) contribution

of Chla. The highest SST-Chla correlation ($R=-0.77$) was found in region 3. SST behavior is markedly seasonal, although it varies by region, with the largest range (13.6 °C) in region 4 tapering southward to the Gulf's mouth up to region 1 (7.2 °C), which displays the lowest SST-Chla correlation ($R=-0.46$). Chla response to SST shows a lag between 1 and 2 months in regions 3 and 4. SST-Chla showed a negative correlation ($R=-0.73$) in region 2, where the highest SST temperatures correspond to periods with lower Chla concentrations and vice versa.

Keywords: Gulf of California, regions, SST, Chla, clustering analysis.

INTRODUCCIÓN

El análisis de la temperatura superficial del mar (TSM) y la concentración de clorofila-*a* (Clo-*a*), a diferentes escalas temporales y espaciales, con datos generados por sensores remotos, permite caracterizar las condiciones oceanográficas y la variabilidad del Golfo de California (Santamaría del Ángel *et al.*, 1994; Soto-Mardones *et al.*, 1999; Bernal *et al.*, 2001; Lavín *et al.*, 2003; Lavín y Marinone, 2003; Kahru *et al.*, 2004; Lluch-Cota *et al.*, 2013; Escalante-Almazán *et al.*, 2013; García-Morales *et al.*, 2017a), con la ventaja de la disponibilidad y continuidad de los datos, tanto en el tiempo, como en el espacio. Debido a la variabilidad espacial y temporal de la TSM y la Clo-*a* del Golfo de California (Castro *et al.*, 1994; Lavín *et al.*, 2003; Mascarenhas *et al.*, 2004), es necesario establecer regiones para su estudio independiente y las relaciones entre las mismas. A nivel global, Longhurst *et al.* (1995) propusieron una caracterización de los océanos en 57 provincias biogeoquímicas, con base en aspectos de la oceanografía física regional y la producción primaria neta (estimada a

*Autor para correspondencia: José Eduardo Valdez-Holguín
 Correo electrónico: eduardo.valdez@unison.mx

Recibido: 29 de noviembre de 2017

Aceptado: 30 de mayo de 2018

partir de la concentración de Clo-a), utilizando una serie de datos satelitales de 1978 a 1986, con una resolución espacial de 1° (aproximadamente 111 km en latitud 0). El Golfo de California fue considerado dentro de la provincia denominada CAMR (Central American Coastal, Costa Central Americana) (Longhurst *et al.*, 1995; Reygondeau *et al.*, 2013).

El Golfo de California ha sido regionalizado usando diversos criterios. Con datos de la distribución de fitoplancton recolectado en cruceros oceanográficos, Round (1967), hizo dos divisiones similares del golfo (ambas en cuatro regiones: sur, boca, centro y norte), la primera con base en la distribución de fitoplancton en la columna de agua y la segunda a partir de la distribución de diatomeas en los sedimentos. Santamaría del Ángel *et al.* (1994), dividieron el golfo en catorce regiones biogeográficas como resultado del análisis de componentes principales de una serie de tiempo semanal (de 1978 a junio de 1986), de datos satelitales de pigmentos fotosintéticos (Clo-a), con resolución espacial de 4 km. Arias-Aréchiga (1998) utilizó la misma serie de datos que Santamaría del Ángel *et al.* (1994) y definió tres grandes regiones por su nivel de productividad primaria: norte centro y sur. Soto-Mardones *et al.* (1999), dividieron el golfo en cuatro zonas (norte, islas, central y sur) para el análisis espaciotemporal de una serie de tiempo semanal (1983-1996) de TSM, obtenida de sensores remotos con una resolución espacial de 18 km. Lluch-Cota y Arias-Aréchiga (2000) dividen la región norte propuesta por Arias-Aréchiga (1998) agregando una región más, correspondiente al Canal de Ballenas, considerando los altos niveles de Clo-a permanentes durante todo el año en esa zona (sumando cuatro regiones: norte, Canal de Ballenas, centro y sur). Lavín *et al.* (2003), dividieron el golfo en cuatro zonas para analizar las anomalías de la TSM, de una serie de tiempo semanal de datos satelitales a 18 km, de 1984 al 2000. La división fue similar a la empleada por Soto-Mardones *et al.* (1999), cuatro zonas identificadas como norte, islas, central y sur, pero, con diferencias geográficas en las líneas que limitan cada zona, en particular en el sur, donde se extienden más al sur de La Paz y Mazatlán, que fueron los límites utilizados por Soto-Mardones *et al.* (1999). Lavín y Marinone (2003), dividieron el golfo en cinco provincias en base a la batimetría: entrada, sur, archipiélago, norte y alto golfo, con el fin de revisar la oceanografía física particular de cada zona. Kahru *et al.* (2004), construyeron doce divisiones del golfo aplicando la técnica de clústeres al ciclo anual de concentración de Clo-a, usando datos satelitales del 1997 al 2003. Lluch-Cota (2004) dividió el golfo en cuatro regiones (para tres estaciones: verano, otoño e invierno) con base en la productividad primaria, estimada con datos de fitoplancton obtenidos de sensores remotos, de 1996 a 2002. Escalante-Almazán *et al.* (2013), analizaron la variabilidad temporal y espacial de la TSM, la Clo-a y producción primaria neta, de tres regiones de muestreo y usando datos satelitales de 1997-2010, para cuatro de las cinco regiones establecidas por Lavín y Marinone (2003). García-Morales *et al.* (2017b) utilizaron la regionalización propuesta por Lluch-Cota y Arias-Aréchiga (2000) y agregaron una división de las zonas continentales y peninsulares, sumando en total ocho grandes regiones.

La importancia de regionalizar el Golfo de California a partir del análisis de la variabilidad de la TSM y la Clo-a, radica en que se facilita la determinación de los procesos físicos que pueden influir en la distribución y abundancia de recursos naturales (Ripa, 1997; Soto-Mardones *et al.*, 1999; Lluch-Cota *et al.*, 2007; Behrenfeld *et al.*, 2006; García-Morales *et al.*, 2017b).

Las regiones ecológicas (o ecorregiones) son zonas geográficas relativamente grandes, que se caracterizan por la relación seres vivos con su entorno, término vinculado con las regiones biogeográficas, que se distinguen por la distribución geográfica de los seres vivos, considerando los procesos que originan la mencionada distribución, como ejemplo, las regiones biogeográficas propuestas por Santamaría del Ángel *et al.* (1994). Por otro lado cuando se utiliza el término de regiones biogeoquímicas, se agregan los elementos químicos y geológicos, que intervienen en la distribución geográfica de los seres vivos (Longhurst *et al.*, 1995).

La división por regiones permite estudiar los procesos climatológicos y biológicos, que pueden impactar en la distribución y abundancia de organismos marinos, por lo que, el objetivo de este trabajo fue llevar a cabo una regionalización del Golfo de California y su caracterización oceanográfica, utilizando análisis de clústeres, con una serie de datos mensuales de TSM y Clo-a, obtenidos de sensores remotos con una resolución espacial de 4 km, durante un periodo de 18 años (1998-2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Golfo de California tiene un ancho promedio de 200 km y 1,500 km de largo. Limita con los estados de Sonora y Sinaloa al Este y con la península de Baja California al Oeste (Alvarez-Borrego, 1983). En el Sur, el Golfo de California está en comunicación abierta con el Océano Pacífico (Roden, 1964) y para el presente estudio, se considera un límite de Cabo San Lucas, B.C.S., a Bahía de Banderas, Nay. El área de estudio (figura 1) tiene una superficie de 237,207 km², delimitando sus márgenes 12 km aproximadamente fuera de la línea de costa, con el fin de evitar el efecto de sobreestimación por la turbidez e influencia terrestre, características de las áreas someras (Longhurst *et al.*, 1995).

Datos

Se generó una serie de tiempo de imágenes diurnas, de los promedios mensuales de la temperatura superficial del mar (TSM), iniciando en enero de 1998 y finalizando en diciembre de 2015 (216 meses). El periodo ha sido definido en base a la calidad de las imágenes disponibles para la resolución espacial de 4 km. Las fuentes de las imágenes son: de enero de 1998 a junio de 2002, NOAA/ERDAPP data server, del sensor AVHRR (<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=100>) y de julio de 2002 a diciembre de 2015, NASA/Ocean Color Web, del sensor Aqua Modis (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3>). La serie de tiempo de Clo-a se generó para el

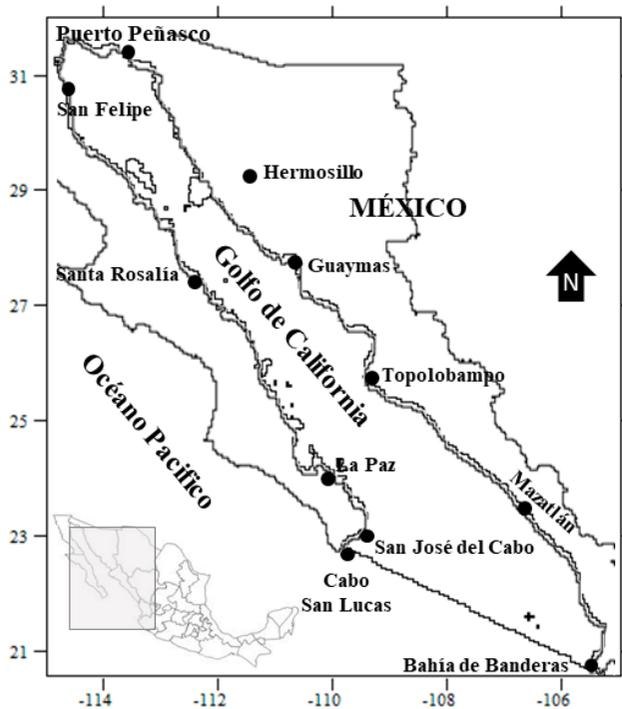


Figura 1. Área de estudio. Golfo de California, con margen de 12 km alejado de la costa.

Figure 1. Study area. Gulf of California with a margin of 12 km away from the coast.

mismo periodo, con la misma resolución espacial y temporal, siendo la fuente el proyecto Ocean Color Web, de enero de 1998 a junio de 2002, del sensor SeaWiFS y de julio de 2002 a diciembre de 2015, del sensor Aqua Modis (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3>). Los atributos de los datos necesarios para los análisis espacio-temporales (tipo de datos, unidad de medida, periodicidad, inicio y fin de la serie, días julianos, datum y sistema de coordenadas), están contenidos en los archivos raster.

Procesamiento de datos

Las imágenes de TSM se importaron al formato raster de Idrisi Terrset 18.09 para el análisis espacio-temporal de los datos. Se estandarizaron los atributos del grupo de imágenes y se recortó el área de estudio definida por sus coordenadas decimales en el rango de 20.61 a 32.02 en latitud norte y -114.98 a -104.98 en longitud oeste. Las imágenes se reclasificaron asignando un valor de cero a los píxeles (unidades de resolución espacial) que cubren la parte continental e islas. Se generaron las series de tiempo de donde se extrajeron las estadísticas básicas como el promedio mensual (espacial para cada imagen), el promedio general (espacial para toda la serie), desviación estándar y anomalías estandarizadas.

Utilizando la técnica de clústeres sobre las imágenes promedio de TSM y concentración de Clo-a, se agruparon automáticamente aquellos píxeles con valores similares utilizando el nivel de significancia del 1 %, valor por definición para este tipo de análisis (Idrisi, 2015). Cada clúster minimiza

la diferencia entre los píxeles que lo componen y las maximiza con píxeles de otros clústeres (Richards y Jia, 2006). El número de clústeres resultantes para TSM fueron cuatro y para Clo-a fueron seis (acumulativamente más grandes que el umbral del 1 %), sin embargo, solo se conservaron tres para Clo-a, los que explican la mayor superficie del área de estudio. Los tres clústeres eutróficos de menor frecuencia coinciden con la zona costera, cuya variabilidad de concentración de Clo-a es muy grande, pero en superficies pequeñas (representan solamente el 3.6% del área de estudio). Los píxeles de estos clústeres fueron absorbidos por los tres clústeres que resultaron más cercanos. En la figura 2a se puede ver la agrupación original, donde en color naranja, cian y magenta, se representan los clústeres que se acumularon a otros, dando como resultado la división que se muestra en la figura 2b.

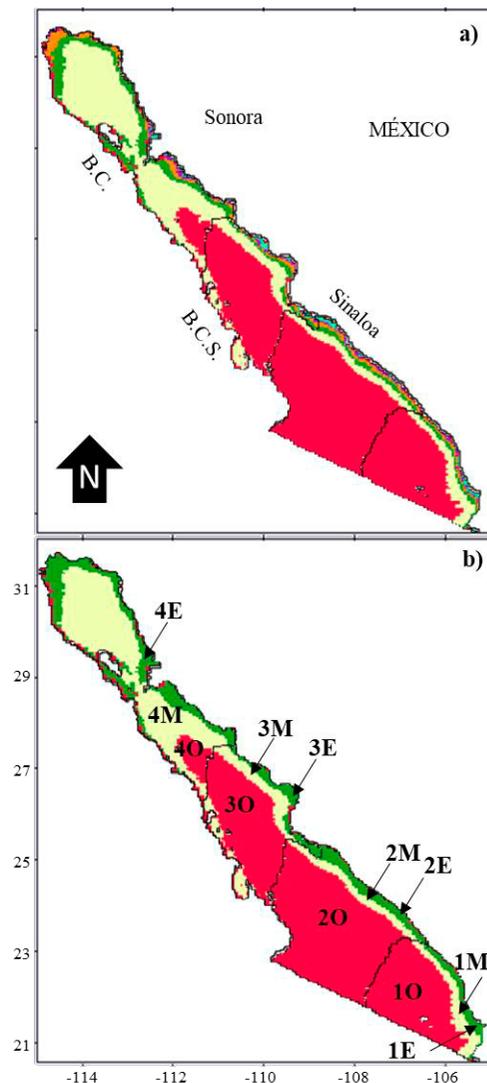


Figura 2. (a) Clústeres resultantes de la combinación de los promedios de TSM y concentración de Clo-a. (b) 12 Regiones definidas por la combinación de clústeres de los promedios de TSM y de concentración de Clo-a, 1998-2015.

Figure 2. (a) Clusters resulting from the combination of TSM means and Chla concentration. (b) 12 Regions defined by the combination of clusters of SST and Chla concentration means, 1998-2015.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Regionalización

En total se definieron doce regiones para el Golfo de California, resultantes de la combinación de cuatro regiones basadas en TSM y tres por la concentración de Clo-a, las cuales se identificaron mediante una composición alfanumérica. Los números hacen referencia a los clústeres derivados de la TSM y las letras al nivel trófico (clústeres resultantes de la Clo-a). Por ejemplos: 1O, es el identificador de la región 1 de TSM combinada con la región oligotrófica; 2M, corresponde a la región 2 de TSM, la cual es una región mesotrófica; y 3E, a su vez indica una región eutrófica dentro de la región 3 de TSM (figura 2b).

A nivel global, Longhurst *et al.*, 1995, propusieron una regionalización biogeoquímica utilizando TSM y Clo-a como base, pero a una escala muy general (1 ° X 1 °), resolución poco útil para una zona como el Golfo de California. En la mencionada regionalización, el golfo es parte de la provincia CAMR, que abarca la zona costera desde Cabo San Lucas en México, hasta el Golfo de Guayaquil en El Ecuador.

En estudios similares al presente, se ha regionalizado al Golfo de California con base en diversos criterios como: la distribución de fitoplancton y diatomeas; la TSM y/o la Clo-a; la producción primaria neta; la batimetría; y con datos obtenidos de sensores remotos con baja resolución espacial o de muestreos realizados en zonas pequeñas, o bajo condiciones temporales específicas (Round, 1967; Santamaría del Ángel *et al.*, 1994; Arias-Aréchiga, 1998; Soto-Mardones *et al.*, 1999; Lluch-Cota y Arias-Aréchiga, 2000; Lavín *et al.*, 2003; Lavín y Marinone, 2003; Kahru *et al.*, 2004; Lluch-Cota, 2004;

Escalante-Almazán *et al.*, 2013; García-Morales *et al.*, 2017b).

En el presente trabajo, se propone una regionalización del Golfo de California aplicando la técnica de clústeres, usando datos satelitales uniformemente distribuidos a 4 km, de una serie mensual de 18 años, tanto de TSM, como de Clo-a.

En la figura 2b, se muestra la regionalización del Golfo de California. Los pixeles que componen cada región, son aquellos que tienen la menor diferencia con su promedio (de la región), con valores tanto de TSM como de concentración de Clo-a similares. La línea negra marca las regiones con base en la TSM y los colores rojo, beige y verde, delimitan las regiones por su nivel trófico (rango de Clo-a): oligotrófico (0 - 0.82 mg/m³), mesotrófico (0.82 - 1.62 mg/m³) y eutrófico (1.62 - 9.21 mg/m³). Morel y Berthon (1989) definieron siete categorías tróficas a partir del promedio de Clo-a en la zona eufótica de los océanos: las primeras cuatro son oligotróficas (0 - 0.45 mg/m³), donde las menores a 0.05 mg/m³, fueron definidas como muy oligotróficas (ultraoligotróficas); la quinta es mesotrófica (0.45 - 1.50 mg/m³); la sexta (1.50 - 5.00 mg/m³) es eutrófica y la séptima (> 5.0 mg/m³) es muy eutrófica (hipertrófica).

En general, para el periodo 1998-2015, el Golfo de California presentó valores promedio de TSM de 25.4 (± 1.42) °C y de 0.95 (± 0.82) mg/m³ de Clo-a, valores que fluctúan en el interior del golfo debido a procesos oceánicos y costeros, locales y regionales, con un comportamiento claramente estacional, pero con diferencias importantes para cada región (Soto-Mardones, 1999). En la tabla 1, se pueden consultar las estadísticas de TSM y concentración de Clo-a particulares para cada región y el golfo.

Tabla 1. TSM y concentración de Clo-a por regiones, 1998-2015.
Table 1. SST and Chla concentration by regions, 1998-2015.

Golfo / Región	Temperatura superficial del mar				Concentración de Clo-a				
	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)	Desviación estándar (°C)	Mínimo (mg/m ³)	Máximo (mg/m ³)	Promedio (mg/m ³)	Desviación estándar (mg/m ³)	Aporte de Clo-a al Golfo de California (%)
Golfo	21.89	30.16	25.45	1.42	0.00	9.20	0.95	0.82	100.00
1O	26.79	30.16	27.29	0.33	0.00	0.82	0.43	0.17	6.13
1M	26.80	27.98	27.64	0.36	0.82	1.60	1.10	0.23	3.09
1E	26.79	28.02	27.53	0.38	1.62	7.80	2.94	1.23	5.55
2O	25.73	26.79	26.28	0.26	0.00	0.82	0.39	0.14	10.40
2M	25.72	26.79	26.19	0.30	0.82	1.61	1.14	0.23	2.96
2E	25.73	26.77	26.15	0.26	1.63	5.56	2.83	0.90	7.63
3O	24.66	25.72	25.27	0.27	0.00	0.82	0.60	0.18	9.10
3M	24.66	25.71	25.15	0.27	0.82	1.62	1.04	0.21	4.62
3E	24.68	25.72	25.27	0.31	1.62	5.20	2.81	0.93	6.26
4O	21.89	24.66	23.95	0.78	0.00	0.82	0.39	0.39	1.64
4M	22.31	24.66	23.62	0.42	0.82	1.62	1.21	0.21	23.73
4E	22.03	24.66	23.54	0.53	1.62	9.20	2.26	0.68	18.89

En la figura 3 se puede apreciar que la TSM disminuye hacia el interior del Golfo de California. Resultados similares fueron reportados por Soto-Mardones (1999). En el límite sur y boca del Golfo, predominan aguas cálidas provenientes del Océano Pacífico (Gutiérrez *et al.*, 2014; Lavín *et al.*, 2014), cuyo efecto en la distribución de aguas oligotróficas llega a notarse en algunos veranos hasta el alto golfo.

La región 1 se ubica en el sur del área de estudio, delimitada al este por las costas del sur de Sinaloa y norte de Nayarit, al norte se delimita con una línea irregular que parte de la latitud 23.19N (Mazatlán, Sin.) y se conecta en latitud 21.87N con la línea que determina el área de estudio en el oeste (figura 2b). En la parte costera se registran surgencias importantes que propician la producción primaria a pesar de las altas temperaturas. Lo anterior se debe a la amplia plataforma costera con profundidades menores a los 200 m, en su mayoría menores a 50 m (Lavín y Marinone, 2003), lo cual favorece a los procesos locales de mezcla. Esta región comprende el 18 % del Golfo de California, tiene una TSM promedio de 27.4 (± 0.37) °C y contiene el 15 % de la Clo-a del área de estudio. Del 100 % del espacio de la región 1, el 75 % son aguas oligotróficas (1O), el 15 % mesotróficas (1M) y el resto eutróficas (1E). De la Clo-a total para esta región, la región 1O concentra el 41 %, la 1M el 21 % y la 1E el 38 % (figura 3 y tabla 1).

La región 2 abarca la boca del Golfo de California, desde el límite norte de la región 1, hasta la latitud 25.51N (Topolobampo, Sin.), en la parte continental y La Paz, B.C.S. (latitud 24.29N), en la parte peninsular (figura 2b). Cubre 31 % del área de estudio y aquí se concentra 21 % de la Clo-a total. El promedio de la TSM es de 26.3 (± 0.27) °C. De la superficie total de la región 2, el 84 % son aguas oligotróficas (2O), el 8 % mesotróficas (2M) y el resto eutróficas (2E). De la Clo-a total para esta región, la región 2O concentra el 50 %, la 2M el 14 % y la 1E el 36 % (figura 3 y tabla 1).

La región 3 es la zona media del Golfo de California, limitada al sur por el límite norte de la región 2 y en el norte, por una línea irregular desde la latitud 27.45N, justo al sur de Guaymas, Son., hasta Loreto, B.C.S. (latitud 26.07N) (figura 2b). Comprende la zona más profunda del Golfo con una importante intrusión de aguas oceánicas (Lavín y Marinone, 2003). Abarca 21 % del área de estudio y 20 % de la concentración total de Clo-a. La TSM promedio es de 25.2 (± 0.28) °C. De la superficie total de la región 2, el 70 % son aguas oligotróficas (3O), el 20 % mesotróficas (3M) y el resto eutróficas (3E). De la Clo-a total para esta región, la región 3O concentra el 46 %, la 3M el 23 % y la 3E el 31 % (figura 3 y tabla 1).

La región 4 cubre el resto del área de estudio (alto golfo y región de las grandes islas), a partir del límite norte de la región 3 (figura 2b). Es la región más productiva del área de estudio, con 44 % de la concentración de Clo-a del Golfo de California y TSM promedio de 23.6 (± 0.52) °C, abarcando 30 % del área de estudio. Del 100 % del espacio de la región 1, el 13 % son aguas oligotróficas (4O), el 61 % mesotróficas (4M) y el resto eutróficas (4E). De la Clo-a total para esta región, la región 4O concentra el 4 %, la 4M el 54 % y la 4E el 42 % (figura 3 y tabla 1).

Las regiones 1 y 2 están comprendidas en la zona de transición del Pacífico Oriental hacia el Golfo de California, con una gran influencia de los movimientos de la zona de convergencia inter-tropical (ZCIT) (Lavín y Marinone, 2003). Bernal *et al.* (2001) encontraron que la variabilidad de la TSM en esta zona está controlada por los índices El Niño Oscilación Austral (ENOA) (forzamiento del Pacífico tropical y ecuatorial) y Oscilación Interdecadal del Pacífico Norte (ODPN) (influencia del Pacífico Norte). Alvarez-Borrego (1983) explica que la climatología del golfo tiene una influencia más continental que oceánica, con este trabajo se encontró esa influencia solo en las regiones 3 y 4.

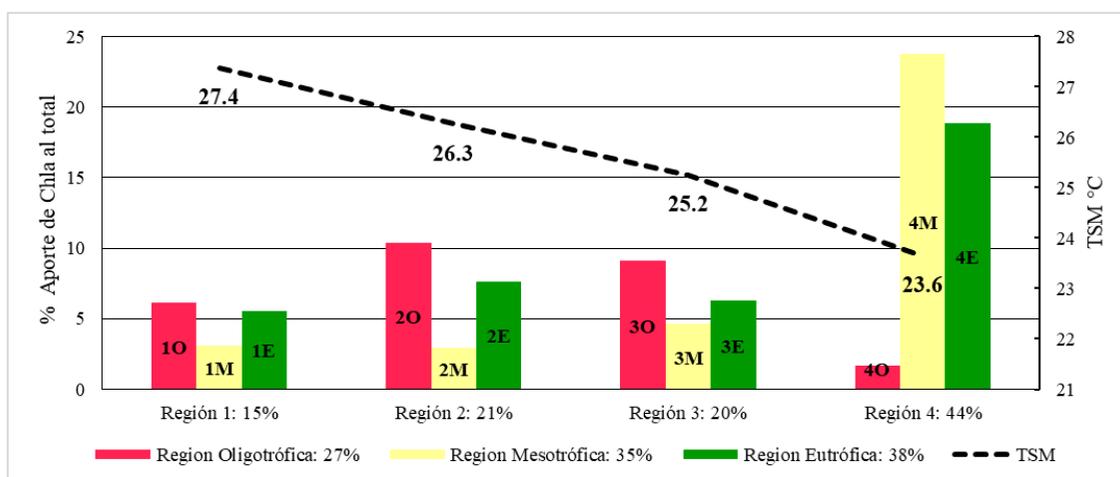


Figura 3. Promedio de la TSM y porcentaje del aporte de Clo-a al Golfo de California, por regiones, identificando regiones por nivel trófico, 1998-2015.

Figure 3. SST average and percentage of Chla contribution to the Gulf of California by regions, identifying regions by trophic level, 1998-2015.

En cada una de las cuatro regiones construidas con base a la TSM, se observan zonas con distintos niveles tróficos. Esto difiere con lo que reportan Escalante-Almazán *et al.* (2013), niveles tróficos independientes en cada región: eutrófica en la región de las grandes islas, mesotrófica en la región centro y oligotrófica en la boca. La diferencia puede deberse principalmente a las zonas de muestreo (solo 3 áreas) y a la resolución espacial de los datos (estacional, anual e interanual).

Los clústeres oligotróficos se encuentran sobre la zona profunda del golfo. Son resultado de procesos oceánicos en zonas con profundidades mayores a los 500 m (Lavín y Marinone, 2003), con una concentración promedio de Clo-a de $0.45 (\pm 0.2) \text{ mg/m}^3$ y un promedio de TSM de $26.1 (\pm 0.97) ^\circ\text{C}$. En total concentran 27 % de la Clo-a del Golfo de California, en el 58% de la superficie del área de estudio. Su distribución espacial incluye las costas de la parte sur de la Península de Baja California, donde no hay procesos que contribuyan a la fertilización superficial (Santamaría del Ángel *et al.*, 1994).

Las regiones mesotróficas se ubican principalmente sobre el talud continental. En su mayoría rodean a las regiones oligotróficas, excepto en la zona sur de la península de Baja California. Tienen profundidades entre 50 y 1,000 m aproximadamente, según la batimetría presentada por Lavín y Marinone (2003). Cubren el 27 % del área de estudio y contienen 35 % de la concentración total de Clo-a. Registran valores promedio de $1.17 (\pm 0.22) \text{ mg/m}^3$ de Clo-a y $24.5 (\pm 1.38) ^\circ\text{C}$ de TSM. Se pueden observar en gran proporción en el alto golfo y en la región de las grandes islas. La presencia de aguas mesotróficas en la zona de la península se debe a procesos de mezcla por marea que provocan surgencias importantes y dispersan los nutrientes a los alrededores, particularmente en los veranos, cuando los flujos de aguas superficiales, salen del golfo cerca de la península.

Las regiones eutróficas se ubican sobre la plataforma costera del golfo. Son causadas por las altas concentraciones de Clo-a en la zona costera de Sinaloa, Sonora y Baja California, en donde procesos locales como mezclas por viento y mareas, interactúan provocando una gran variabilidad. Otro factor importante son las descargas de granjas camaronícolas del sur de Sonora y norte de Sinaloa, que incrementan la cantidad de nutrientes y modifican los ecosistemas en la zona (Alonso-Rodríguez y Páez-Osuna, 2003; Beman *et al.*, 2005). Son regiones poco profundas, mayormente menores a 200 m (Lavín y Marinone, 2003). Suman 38 % de la concentración de Clo-a total en el Golfo de California, ocupando 15 % de su superficie. Promedian $2.53 (\pm 0.89) \text{ mg/m}^3$ de Clo-a y $24.8 (\pm 1.53) ^\circ\text{C}$ de TSM.

Estacionalidad

En la figura 4 se muestra la climatología mensual por región, donde se observa que la amplitud de la TSM se va reduciendo hacia el exterior del Golfo, aproximadamente $2 ^\circ\text{C}$ en cada región. Para todas las regiones, las TSM más elevadas corresponden a los meses de agosto (en concordancia con Soto-Mardones *et al.*, 1999 y Bernal *et al.*, 2001) y las más ba-

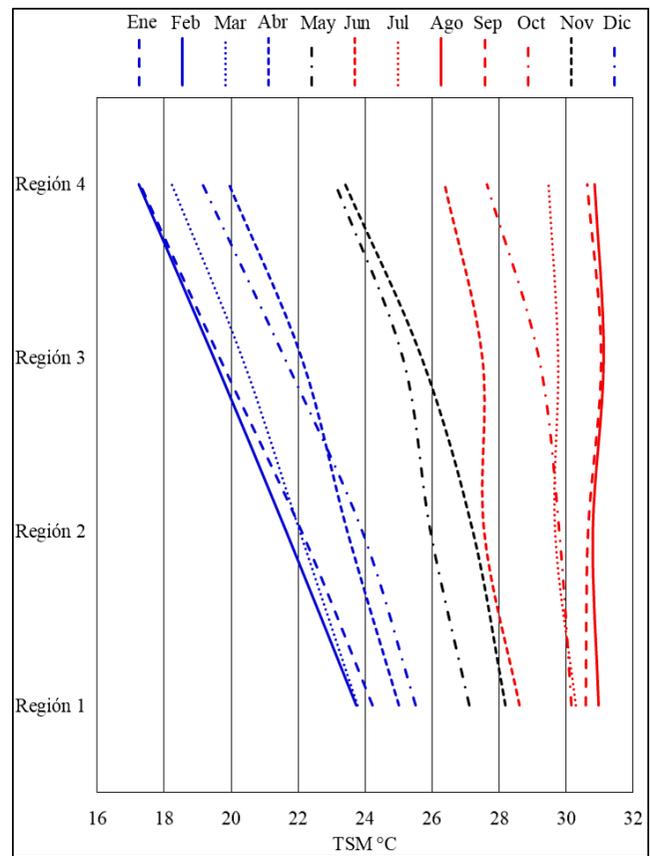


Figura 4. Climatología mensual por regiones. Invierno en azul, verano en rojo, meses de transición en negro, 1998-2015.
Figure 4. Monthly climatology by regions. Winter in blue, summer in red, transition months in black, 1998-2015.

jas a los meses de febrero, con amplitudes diferentes que se van reduciendo hacia el exterior del Golfo. En la región 4 los valores observados fluctúan entre los 17.2 y $30.8 ^\circ\text{C}$, una amplitud de $13.6 ^\circ\text{C}$, resultados similares a los presentados por Soto-Mardones *et al.* (1999). Con una serie de datos de TSM de 1983-2000, con $1 ^\circ$ de resolución espacial, Aragón-Noriega (2007) registra una amplitud de $11.4 ^\circ\text{C}$ para el área de Puerto Peñasco (parte de la región 4). La amplitud de $7.2 ^\circ\text{C}$ es la más reducida y corresponde a la región 1, con valores mínimos de 23.7 y máximos de $31 ^\circ\text{C}$, resultado similar al obtenido por Aragón-Noriega (2007) quien encontró una amplitud $7.8 ^\circ\text{C}$ en el área de Mazatlán. La transición hacia el invierno ocurre de manera generalizada en el mes de noviembre, con una diferencia abrupta en las TSM entre los meses de octubre y diciembre: 4.7 , 5.9 , 7.6 y $8.5 ^\circ\text{C}$ para las regiones 1, 2, 3 y 4, respectivamente. La transición hacia el verano se registra en el mes de mayo. Se observan diferencias importantes en la TSM entre los meses de abril y junio: 3.6 , 4.1 , 5.4 y $6.4 ^\circ\text{C}$, para las regiones 1, 2, 3 y 4, respectivamente. En julio continúa el aumento de temperatura hasta llegar a las máximas TSM en agosto.

En general, para todo el Golfo de California, la concentración de Clo-a tiene un desfase de uno a dos meses

respecto a los cambios en la TSM, con diferencias importantes para cada región. En la figura 5 se aprecian los promedios mensuales de concentración de la Clo-a por región para el periodo 1998-2015. En la región 1 durante los meses de febrero y marzo hay una correspondencia directa, tratándose de los 2 meses más fríos y más productivos. En la región 2, se corresponden los meses con las TSM más elevadas y las concentraciones de Clo-a más bajas y viceversa. Los meses de mayo y noviembre fluctúan alrededor del promedio para la región. Las regiones 1 y 2 registran la menor amplitud en la señal: 0.89 mg/m³, con valores que varían entre 0.30 y 1.19 mg/m³. Durante los inviernos las regiones 3 y 4 registran una señal desfasada de 1 a 2 meses en la Clo-a, respondiendo a los cambios en la TSM. Después de que se registran las menores TSM en febrero, marzo y abril registran máximos de concentración de Clo-a. En los veranos los meses de julio a septiembre son los menos productivos y los meses de transición estacional (mayo y noviembre), registran valores alrededor del promedio, para cada región. Las regiones 3 y 4 tienen una amplitud 1.47 y 1.98 mg/m³, respectivamente. Pérez-Arvizu *et al.* (2013), también reportaron una estacionalidad en la señal de la Clo-a para la región norte del golfo (región similar a la región 4 del presente estudio).

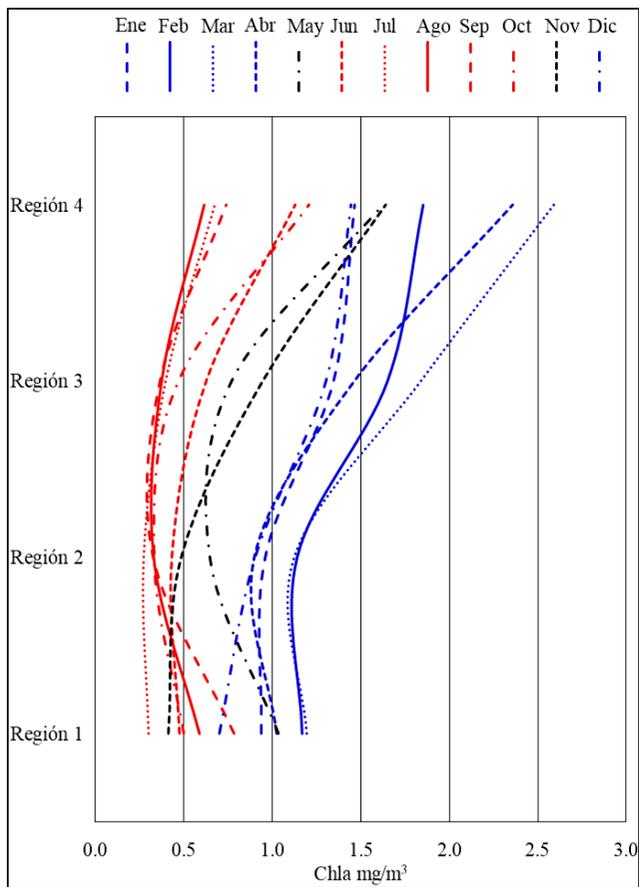


Figura 5. Promedios mensuales generales de concentración de Clo-a por regiones. Invierno en azul, verano en rojo, meses de transición en negro, 1998-2015.
Figure 5. General monthly average Chl-a concentrations by regions. Winter in blue, summer in red, transition months in black, 1998-2015.

Correlación TSM/Clo-a

La correlación de los promedios mensuales de TSM y concentración de Clo-a se pueden apreciar por regiones en la figura 6, con un nivel de confianza del 95 %. La región 1 tiene la TSM menos variable del golfo (amplitud de 9.78 °C), donde las condiciones cálidas muestran una alta variabilidad en las

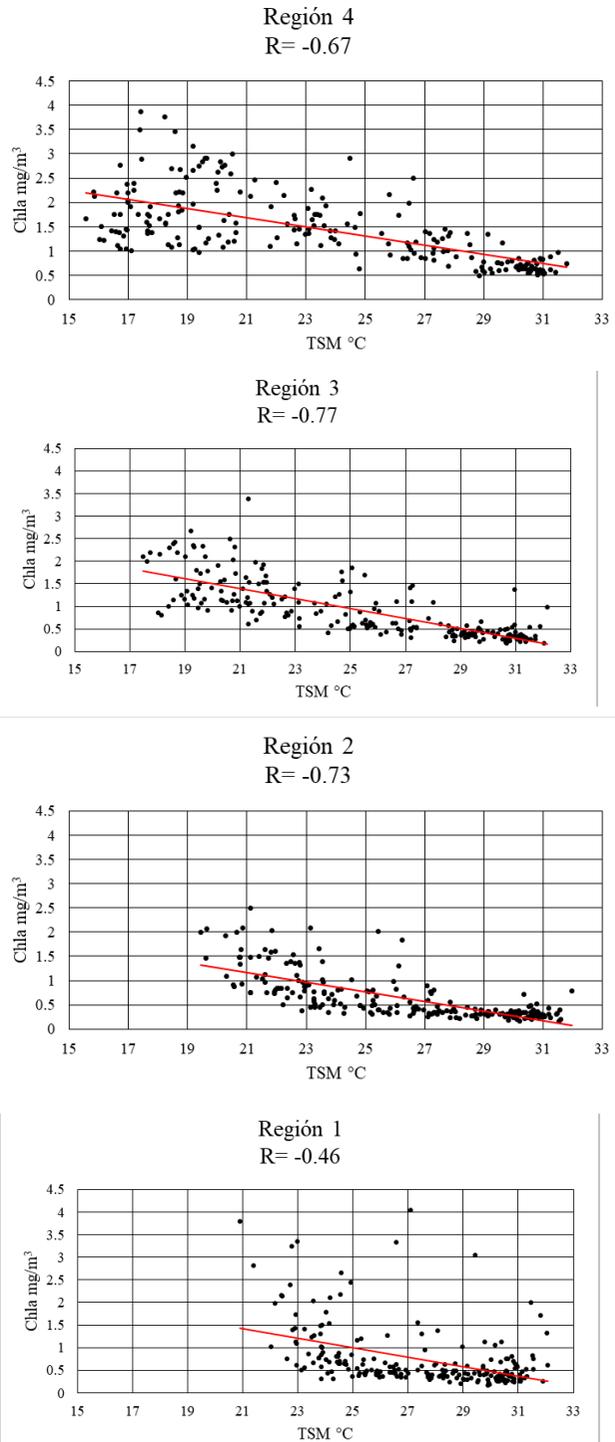


Figura 6. Dispersograma de los promedios mensuales de la TSM y concentración de Clo-a, por región, 1998-2015.
Figure 6. Dispersogram of SST and Chl-a concentration monthly means by region, 1998-2015.

concentraciones de Clo-a, con una amplitud de 3.85 mg/m³. No se observa un patrón bien definido en la correlación de los promedios mensuales de TSM y Clo-a, $R=-0.46$. Es una región que el 80 % del tiempo registra concentraciones de Clo-a menores a 0.5 mg/m³. La región 2 responde más directo a los cambios en la TSM con una correlación de $R=-0.73$. Aquí se observa que a mayores TSM se reduce la concentración de Clo-a, así como también su variabilidad. La TSM tiene una amplitud de 11.13 °C y la Clo-a de 1.84 mg/m³ (la menor del golfo). El 56 % del tiempo se registran valores de Clo-a menores a 0.5 mg/m³. La región 3 muestra la mayor correlación TSM/Clo-a: $R=-0.77$. Es una zona muy variable con amplitud de TSM de 14.14 °C y 3.22 mg/m³ para Clo-a (la mayor del golfo). A mayores TSM corresponden concentraciones de Clo-a menores y más estables. A menores TSM la concentración de Clo-a se vuelve más variable, pero con valores más altos. El 80 % del tiempo se registran valores por arriba de 1.0 mg/m³, cuando la TSM baja el umbral de 25.2 (± 0.28) °C (valor medio para la región). La región 4 tiene la TSM más variable del golfo, con una amplitud de 15.45 °C. Se estima una correlación TSM/Clo-a: $R=-0.67$. Es la zona más productiva con concentraciones superiores a 1 mg/m³, el 100 % del tiempo, con TSM menores al promedio de la región (23.6 ± 0.52 °C). Tiene una amplitud en la concentración de Clo-a de 2.5 mg/m³, la cual, a pesar de que se reduce en relación a la región 3, sigue siendo una zona muy variable. García-Morales, *et al.* (2017a) reportaron una correlación inversa $R^2=0.73$ entre la TSM y la Clo-a, gran diferencia a los resultados reportados con este trabajo, lo cual se puede deber al área que abarca el estudio citado, el cual es exclusivamente de la zona costera sonorense (zona eutrófica), de Bahía de Kino hasta Yavaros, zona incluida en las regiones 3 y 4. Consistente con lo observado en la parte central del golfo por Lluch-Cota (2000), en este trabajo se reconoce que, en general para todo el golfo, a menores valores de TSM corresponden las mayores concentraciones de clorofila-a y viceversa.

CONCLUSIONES

Se regionalizó el Golfo de California usando una combinación de clústeres de TSM y Clo-a, identificando cuatro regiones con base en la TSM, con tres niveles tróficos cada uno. Se caracterizaron las condiciones oceanográficas para cada región y para todo el golfo, encontrando que, el porcentaje de la aportación a la Clo-a total, varía entre las regiones, siendo las de mayor importancia las regiones 4M y 4E.

Se encontró que la estacionalidad de la TSM es clara para todas las regiones, pero con diferencias aproximadamente de 2 °C, en las amplitudes de las mismas, las cuales disminuyen hacia el exterior del golfo. Se estimó que el tiempo de respuesta de la Clo-a a los cambios en la TSM, varía entre las regiones y que, durante los periodos fríos, la amplitud de la Clo-a en las regiones 1 y 2 es similar, pero aumenta hacia el interior del golfo en las regiones 3 y 4.

Los resultados sugieren que, excepto en la región 1 y variando entre las regiones, hay una relación inversa importante entre variabilidad en la concentración de Clo-a

y la TSM. Se encontró que a mayores temperaturas se reduce la concentración de Clo-a, así como también su variabilidad y que a menores TSM los sistemas son más turbulentos y la concentración de Clo-a se vuelve inestable, pero registra valores más altos.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por el apoyo otorgado para la realización de la investigación "Biosimulación de la producción primaria en el Golfo de California", de donde se deriva este estudio. A los departamentos de BCA Y CAMA del ITSON, por las prestaciones brindadas; DICTUS, DIFUS y Matemáticas de la UNISON, en particular al ACARUS, por los recursos de hardware y software facilitados. Al CRIP-Guaymas del INAPESCA, por sus contribuciones.

REFERENCIAS

- Alonso-Rodríguez, R. y Páez-Osuna, F. 2003. Nutrients, phytoplankton and harmful algal blooms in shrimp ponds: a review with special reference to the situation in the Gulf of California. *Aquaculture* 219, 317-336.
- Aragón-Noriega, E.A. 2007. Coupling the reproductive period of blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* Stimpson, 1874 (Decapoda: Penaeidae) and sea surface temperature in the Gulf of California. *Biología Marina y Oceanografía* 42(2): 167-175.
- Alvarez-Borrego, S. 1983. Gulf of California. B. H. Ketchum (ed) *Estuaries and enclosed seas*. Elsevier Amsterdam, 427-449.
- Arias-Aréchiga, J.P. 1998. Regionalización del Golfo de California: Una propuesta a partir de concentración de pigmentos fotosintéticos. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur. 57p.
- Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Siegel, D.A., McClain, C.R., Sarmiento, J.L., Feldman, G.C., Milligan, A.J., Falkowski, P.G., Letelier, R.M. y Boss, E.S. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* 444:752-755, doi:10.1038/nature05317.
- Beman, M., Arrigo, K.R. y Matson, P.A. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature* 434, 211-214, doi:10.1038/nature03370.
- Bernal, G., Ripa, P. y Herguera, J.C. 2001. Variabilidad oceanográfica y climática en el bajo Golfo de California: influencias del trópico y Pacífico Norte. *Ciencias Marinas*, 27 (4): 595-617.
- Castro, R., Lavín, M. y Ripa, P. 1994. Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 99, 3249-3261.
- Escalante-Almazán, F.I., Valdez-Holguín, J.E., Alvarez-Borrego, S. y Lara-Lara, J.R. 2013. Temporal and spatial variation of sea surface temperature, chlorophyll, and primary productivity in the Gulf of California. *Revista de Ciencias Marinas*, 39 (2): 85-97.
- García-Morales, R., López-Martínez, J., Valdez-Holguín, E., Herrera-Cervantes, H. y Espinoza-Chaurand, L.D. 2017a. Environmental variability and oceanographic dynamics of the central and southern coastal zone of Sonora in the Gulf of California. *Remote Sensing* 9, 925; doi:10.3390/rs9090925.
- García-Morales, R., Pérez-Lezama, E.L., Shirasago-Germán, B. 2017b. Influence of environmental variability on distribution

- and relative abundance of baleen whales (suborder Mysticeti) in the Gulf of California. *Marine Ecology* e12479. <https://doi.org/10.1111/maec.12479>.
- Gutiérrez, M.O., López, M., Candela, J., Castro, R., Mascarenhas, A., y Collins, C.A. 2014. Effect of coastal-trapped waves and wind on currents and transport in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 5123–5139, <http://doi.org/10.1002/2013JC009538>.
- Idrisi-TerrSet, 18.09, 2015. Idrisi-TerrSet user manual. Clark Labs, Clark University, www.clarklabs.org
- Kahru, M., Marinone, S.G., Lluch-Cota, S.E., Parés-Sierra, A. y Mitchell, G.B. 2004. Ocean-color variability in the Gulf of California: Scales from days to ENSO. *Deep-Sea Research II* (51): 139-146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.04.001>.
- Lavín, M.F. y Marinone S.G. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gul of California. En: *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. O.U. Velasco Fuentes, O.U. J. Sheinbaum y J. Ochoa (ed.), pp 173-204. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Lavín, M. F., Palacios-Hernández, E., y Cabrera, C. 2003. Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. *Geofísica Internacional*, 42: 363-375.
- Lavín, M. F., Castro, R., Beier, E., Cabrera, C., Godínez, V.M. y Amador-Buenrostro, A. 2014. Surface circulation in the Gulf of California in summer from surface drifters and satellite images (2004-2006). *Journal of Geophysical Research*, 119, 4278-4290.
- Longhurst, A., Sathyendranath, S., Platt, T. y Caverhill, C. 1995. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal of Plankton Research*, 17 (6):1245-1271.
- Lluch-Cota, S.E. 2000. Coastal upwelling in the Eastern Gulf of California. *Oceanológica Acta* 23, no. 6. DOI: 10.1016/S0399-1784(00)00121-3.
- Lluch- Cota, S. E. y Arias-Aréchiga, J. P. (2000). Sobre la importancia de considerar la existencia de centros actividad biológica para la regionalización del océano: El caso del Golfo de California. En: D. Lluch-Belda, J. Elorduy-Garay, S. E. Lluch-Cota y G. Ponce-Díaz (Eds.), *BAC Centros de Actividad Biológica del Pacífico Mexicano* (pp. 255–263). La Paz, México: CIB, CICIMAR y CONACYT.
- Lluch-Cota, S. E. 2004. Gulf of California. En R. I. Perry y S. M. McKinnell (Eds.), *Marine ecosystems of the North Pacific*, Vol. 1 (p. 1280). Mexico: PICES Special Publications.
- Lluch-Cota, S.E., Aragón-Noriega, E.A., Arreguín-Sánchez, F., Aurióles-Gamboa, D., Bautista- Romero, J., Brusca, R.C., Cervantes-Duarte, R., Cortéz-Altamirano, R., Del-Monte-Luna, P., Esquivel-Herrera, A., Fernández, G., Hendrickx, M.E., Hernandez-Vázquez, S., Herrera-Cervantes, H., Kahru, M., Lavin, M., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D., Lopez-Martínez, J., Marinone, S.G., Nevárez-Martínez, M.O., Ortega-García, S., Palacios-Castro, E., Parés-Sierra, A., Ponce-Díaz, G., Ramírez-Rodríguez, M., Salinas-Zavala, C.A., Schwartzlose, R.A. y Sierra-Beltrán, A.P. 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography* 73 (1): 1-26. doi: 10.1016/j. pocean. 2007.01.013.
- Lluch-Cota, S.E., Tripp-Valdéz, M., Lluch-Cota, D., Chan-Belda, D., Verbesselt, J., Herrera-Cervantes, H. y Bautista-Romero, J. 2013. Recent trends in sea surface temperature of Mexico. *Atmosfera*, 26, 537–546.
- Mascarenhas Jr., A.S., Castro, R., Collins, C.A. y Durazo, R. 2004. Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 109 (C7): 1-9.
- Morel, A. y Berthon, J.F. 1989. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnol. Oceanogr.* 34: 1545-1562.
- Pérez-Arvizu, E.M., Aragón-Noriega, E.A. y Espinosa Carreón, T.L. 2013. Variabilidad estacional de la clorofila a y su respuesta a condiciones El Niño y La Niña en el Norte del Golfo de California. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 48(1): 131-141.
- Reygondeau, G., Longhurst, A., Martinez, E., Beaugrand, G., Antoine, D., y Maury, O. 2013. Dynamic biogeochemical provinces in the global ocean. *Global Biogeochemical Cycles*. 27: 1–13. doi:10.1002/gbc.20089.
- Richards, J. A y Jia, X. 2006. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany.
- Ripa, P. 1997. Toward a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*. 27: 597-614.
- Roden, G. I. 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California. En: Tj. H. van Andel y G. G. Shor Jr. (eds.), *Marine geology of the Gulf of California: A symposium*. Am Assoc. Pet. Geol., Mem. 3: 30-58.
- Round, F.E. 1967. The phytoplankton on the Gulf of California. Part I. Its composition, distribution and contribution to the sediments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1 (1): 76-97. North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Santamaría del Ángel, E.M., Alvarez-Borrego, S. y Muller Karger, F.E. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on Coastal Zone Color Scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*, 99 (C4): 7411-7421.
- Soto-Mardones, L., Marinone, S. G. y Parés-Sierra, A. 1999. Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* 25 (1): 1-30.