

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ecología Marina**

**Patrones espacio-temporales de clorofila-*a* de imágenes
satelitales durante un florecimiento algal nocivo de
Gymnodinium catenatum en el norte del Golfo de
California en enero de 2015.**

Tesis
que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Aldo Rodríguez Hernández

Ensenada, Baja California, México

2018

Tesis defendida por
Aldo Rodríguez Hernández

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director de tesis

Dr. Ernesto García Mendoza

Dr. Jorge Torres Rodríguez

Dra. Clarissa Ruth Anderson



Dr. Jorge Adrián Rosales Casián
Coordinadora del Posgrado en Ecología Marina

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Aldo Rodríguez Hernández** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Patrones espacio-temporales de clorofila-*a* de imágenes satelitales durante un florecimiento algal nocivo de *Gymnodinium catenatum* en el norte del Golfo de California en enero de 2015.

Resumen aprobado por:

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director de tesis

Hablando en términos de percepción remota, un Florecimiento Algal Nocivo (FAN) es una anomalía espacio-temporal de la clorofila-*a* (chl-*a*) caracterizada por un aumento repentino en su concentración superficial en un lugar determinado. Se construyó una serie de tiempo con imágenes diarias de chl-*a* satelital del alto golfo de California de septiembre de 2014 a marzo de 2015 para localizar el origen y alcance de un FAN de *G. catenatum* ocurrido a principios de 2015. La técnica estadística de Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) se utilizó para aislar la señal asociada al FAN, la cual aparentemente quedó explicada por el modo 3 (10% de la varianza), que mostró anomalías positivas significativas a mediados de diciembre 2014 y enero 2015 en la zona afectada por el florecimiento (de Puertecitos a Bahía San Felipe, B.C.). Esta última anomalía coincidió con el pico observado en los datos de abundancia *in situ* (cel l⁻¹) de la zona. El análisis de las imágenes diarias demostró la influencia importante que tuvo la circulación local sobre la distribución de la chl-*a* en el alto golfo, ya que se observaron patrones congruentes con el campo de corrientes superficiales estimadas para la zona. El desarrollo del FAN se relacionó con el paso de dos huracanes categoría 3 (escala Saffir-Simpson) a lo largo del golfo de California, cuyos vientos pudieron haber eutrofizado el área de estudio al inducir la mezcla vertical de la columna de agua, propiciar el aporte de nutrientes terrígenos al océano, e intensificar las surgencias costeras y el transporte de nutrientes de sur a norte. Esta contribución de nutrientes en la parte norte del golfo junto con el comienzo de las condiciones invernales (aumento de las surgencias costeras, cambio en la temperatura superficial, aumento del espesor de la capa mezcla) podrían haber favorecido la proliferación de *G. catenatum* en las costas de San Felipe.

Palabras clave: FAN, clorofila-*a*, FEOs, percepción remota, norte del golfo de California, *Gymnodinium catenatum*.

Abstract of the thesis presented by **Aldo Rodríguez Hernández** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Spatio-temporal patterns of chlorophyll-*a* from satellite images during a *Gymnodinium catenatum* harmful bloom in the northern Gulf of California in January 2015.

Abstract approved by:

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Thesis Director

From the point of view of remote sensing, a Harmful Algal Bloom (HAB) is a spatio-temporal anomaly of chlorophyll-*a* (chl-*a*) characterized by a sudden increase of its surface concentration at a given location. To locate the origin and scope of a HAB of *G. catenatum* that occurred at the beginning of 2015, a time series was constructed with daily satellite images of the upper gulf of California from September 2014 to March 2015. The statistical technique of Empirical Orthogonal Functions (EOFs) was used to isolate the signal of the HAB, which apparently was explained by mode 3 (10% of the variance). This mode showed positive anomalies in mid-December 2014 and January 2015 in the area affected by the bloom (from Puertecitos to San Felipe Bay, B.C.). This last anomaly coincided with the peak observed in the *in situ* abundance data (cell l⁻¹) of the zone. The analysis of the daily images evidenced the influence of the local circulation on the distribution of chl-*a* in the upper gulf, which showed patterns consistent with the surface currents estimated for the zone. The development of the HAB was related to the passage of category-3 hurricanes (Saffir-Simpson scale) along the Gulf of California. These winds could have eutrophied the study area by inducing vertical mixing of the water column, propitiating the contribution of terrigenous nutrients to the ocean, and intensifying the coastal upwelling and nutrient transport from south to north. All this contribution of nutrients into the northern part of the gulf together with the beginning of winter conditions (intensification of coastal upwelling, change in surface temperature, increased the thickness of the mixed layer) could have favored the proliferation of *G. catenatum* on the shore of San Felipe.

Keywords: HAB, chlorophyll-*a*, EOFs, ocean color remote sensing, upper gulf of California, *Gymnodinium catenatum*.

Dedicatoria

A mis padres:

Por estar siempre conmigo incluso en la distancia, por creer en mí desde el principio hasta el final de mi carrera, y por transmitirme los principios y valores que me hacen una mejor persona cada día.

A mis hermanas:

Por ser un pilar fundamental en mi vida y una fuente de felicidad inagotable.

A mi tía Angela:

Por ser mi segunda madre y que a pesar de los años me sigue procurando como si fuera un niño.

Porque detrás de cada éxito en mi vida están ustedes, los amo con todo mi ser.

La idea no es vivir para siempre, la idea es crear algo que si lo haga.

Andy Warhol

Agradecimientos

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por la beca otorgada (591136) sin la cual hubiese sido imposible culminar esta etapa de mi desarrollo académico.

Al **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)** por aceptarme en el programa de posgrado en Ecología Marina y permitirme alcanzar el grado de Maestro en Ciencias.

A la **Red Temática sobre Florecimientos Algales Nocivos (RedFAN)** por admitirme en su curso “Introducción al Estudio de los Florecimientos Algales Nocivos, 2016”, el cual me ayudó a tener un mejor entendimiento acerca de los FANs. De igual manera les agradezco por el apoyo económico con el que fui beneficiado para asistir al “Eastern Pacific Ocean Conference 2017” (EPOC-2017), donde mi trabajo de investigación recibió una buena retroalimentación y me ayudó a enriquecer el contenido del mismo.

De igual forma, agradezco a los **miembros organizadores del EPOC-2017** por haberme ayudado con la inscripción al congreso.

A mi director de tesis **David Rivas** por su excelente guía y atención prestada a lo largo de la maestría, por su buena actitud en cada una de las asesorías, y por su dedicación e interés en los resultados de este trabajo, pero sobre todo, por ser un amigo dentro y fuera de la institución. Muchas gracias.

A los miembros del comité. Al **Dr. Ernesto** por sus correcciones y comentarios oportunos que ayudaron mucho a mejorar la estructura y contenido de la presente tesis. Al **Dr. Jorge** por sus acertados comentarios y correcciones en los avances y escrito final.

Y quiero dar un especial agradecimiento a la **Dra. Clarissa R. Anderson** por aceptar ser parte del comité sin conocerme, por su ayuda y atención brindada en el traslado al EPOC-2017, y por haber hecho un esfuerzo en revisar la versión final de mi escrito en

español y escuchar mi espanglish en cada reunión de avance. Por esto y más muchas gracias.

A **mi familia** por su apoyo y amor incondicional durante mi estancia en Ensenada, saben que esto es por y para ustedes.

A mis amigos matlaberos, **Anahí, Abel y Aldo Omar**, cuyos conocimientos y dominio del lenguaje de programación me ayudaron mucho para avanzar eficaz y rápidamente en la obtención de mis resultados.

A **Zury y Adán** por su gran ayuda en el entendimiento de la estadística en sus diferentes niveles.

A mi **hermana Kathia** que siempre estuvo dispuesta a revisar la versión en inglés de cada uno de mis trabajos de investigación.

A todos **mis amigos del posgrado** por la unión que nos caracterizó como generación, siempre viendo por el grupo antes que a uno mismo y por el apoyo mutuo en cada momento de dificultad.

Al grupo de las **vagabundas** cuya compañía y amistad fue una pieza clave para disfrutar cada momento de la carrera por muy desafiante que fuera.

A **Blanca**, por entregarme correcciones antes que mi comité y por estar conmigo en la salud y en la enfermedad, la maestría no hubiera sido lo mismo sin ti. Te quiero mucho.

A **José Manuel** por ser mi compañero en los deportes, viajes y fiestas, pero, sobre todo, un amigo con el que sé que puedo contar ahora y siempre.

A todas las personas que tuve la dicha de conocer, y que de alguna manera contribuyeron en mi crecimiento personal como académico... **¡muchas gracias!**

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Florecimientos Algales (FAs)	1
1.2 Imágenes satelitales de clorofila a	2
1.3 Especie causante del FAN de estudio.....	3
1.4 Antecedentes.....	4
1.4.1 Florecimientos algales nocivos en México	4
1.4.2 <i>Gymnodinium catenatum</i> en México.....	5
1.4.3 Imágenes satelitales en el estudio de florecimientos algales.	5
1.5 Justificación	6
1.6 Hipótesis	8
1.7 Objetivos.....	8
1.7.1 Objetivo General	8
1.7.2 Objetivos específicos.....	8
Capítulo 2. Metodología	9
2.1 Área de Estudio	9
2.2 Datos satelitales	11
2.3 Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs).....	12
2.4 Computación	13
Capítulo 3. Resultados	14
3.1 Análisis de imágenes del mes de diciembre 2014.....	14
3.2 Análisis de imágenes del mes de enero 2015	14
3.3 Funciones Empíricas Ortogonales ($chl-a$).....	16
3.4 FEOs de SST	21
Capítulo 4. Discusión	23
4.1 Hechos.....	23

4.2 Historia del FAN de <i>Gymnodinium catenatum</i>	25
4.3 Funciones Empíricas Ortogonales	28
4.4 Eventos posteriores.....	28
Capítulo 5. Conclusiones	30
5.1 Recomendaciones	30
Literatura citada	32
Anexo 1.....	40
Anexo 2.....	41
Anexo 3.....	42
Anexo 4.....	43

Lista de figuras

- Figura 1.** Mapa del golfo de California (a), NGC: Norte del Golfo de California. Viento estacional promedio obtenido del North American Regional Reanalysis (NARR) (Mesinger et al., 2006): (b) del sureste en condiciones de verano (junio-septiembre 2014) y (c) del noroeste en condiciones de invierno (noviembre 2014 - abril 2015).10
- Figura 2.** Norte del Golfo de California. GSC: Golfo de Santa Clara. PP: Puerto Peñasco, Sonora. BSF: Bahía de San Felipe, B.C. Prtcts: Puertecitos, B.C. Cuadro pequeño: zona de pequeñas islas. SLG: Bahía San Luis Gonzaga, B.C. CB: canal de ballenas. ZGI: zona de grandes islas. BA: Bahía de los Ángeles, B.C.10
- Figura 3.** Anomalías de chl-a del alto golfo (en el NGC) desde SLG hasta SF en diciembre 2014. Los recuadros a-c muestran la anomalía de chl-a originada en SLG, y los recuadros d-g su desplazamiento hacia el noreste de la bahía. Las isoclinas en el mapa marcan los sitios con valor a 0 mg m^{-3}15
- Figura 4.** Anomalías de chl-a frente a Punta Estrella (símbolo de estrella). Los recuadros a y b muestran la segunda gran anomalía del mes de diciembre (4.9 y 7.52 mg m^{-3} respectivamente). El recuadro c muestra el posible transporte de esta señal (6.61 mg m^{-3}).15
- Figura 5.** Altimetría y velocidad geostrofica para diciembre 2014. La altimetría y vectores de corrientes se obtuvieron por mapeo objetivo a partir de los datos de anomalías del nivel del mar (along track) de AVISO (puntos grises en el mapa).....16
- Figura 6.** Anomalías diarias de chl-a para enero 2015 de BSF a Puertecitos. Los recuadros a-c marcan el inicio de la señal del florecimiento visto el 17 y 18 de enero. Los recuadros c-e muestran una propagación hacia el norte y sur de BSF. Los recuadros f y g muestran su disipación.17
- Figura 7.** Modos resultantes del análisis de FEOs de la Serie GI. El primer y segundo modo cuentan con una V.E. del 38 y 10%, respectivamente. La mayor variabilidad de chl-a se observó en el canal de ballenas (a y b), y tiene sus picos mayores en los meses de noviembre y diciembre. El modo 3 explica un 7% de variabilidad y tiene su amplitud mayor en el mes de febrero en la entrada norte del canal de ballenas (c). Ninguno de los modos de esta serie logra captar una señal clara que pueda relacionarse al florecimiento.18
- Figura 8.** Modos 1 y 2 de la serie SLG. Tanto la parte espacial como la temporal son iguales a la de los modos 1 y 2 de la serie GI, con la diferencia de poseer un porcentaje de V.E. menor de 34 y 14%, respectivamente.19
- Figura 9.** Modos 3 y 4 de la serie SLG. El modo 3 explica un 9% de la varianza total y su mayor variabilidad se localiza desde la zona de Pequeñas Islas, hasta casi llegar a costas de Sonora cercanas al GSC (a), su mayor amplitud temporal se encuentra ubicada en el mes de marzo. El modo 4 se asoció a la extensión del florecimiento ocurrido en enero de 2015. Su parte espacial (b) presenta una alta variabilidad desde SLG hasta SF y presenta altas amplitudes en los meses de diciembre y enero, este modo explica un 6% de la varianza total.20
- Figura 10.** Modo 3 de la Serie SF asociado al florecimiento de estudio. Su extensión va de SF hasta Puertecitos y en la parte temporal se pueden observar anomalías positivas para el mes de diciembre, enero y febrero.21
- Figura 11.** Modos 1 y 2 de la SST para la serie de SLG. El primer modo no registra valores negativos en su parte espacial (a) por lo que todo el “mapa” varía de igual manera en el tiempo, la mayor variabilidad se localiza en la boca del río Colorado (V.E. 90%). El segundo modo (b) logra captar la presencia del remolino anticiclónico presente en el área, cuya mayor magnitud está registrada para el mes de enero (V.E. 4%).22
- Figura 12.** Comparación entre la abundancia relativa de *G. catenatum* (porcentaje de biomasa en una muestra de red) con los picos observados en el CP3 de la serie SF. El recuadro “a” corresponde al campo Minerva y el recuadro “b” al campo Gastelum.24

Figura 13. Trayectoria de los huracanes Norbert (a) y Odile (b). Imágenes modificadas de Avila (2014) y Cangialosi y Kimberlain (2014), respectivamente26

Figura 14. Comparación del (a) CP1 y (b) del CP2 de SST con el CP4 de chl-a asociado al florecimiento.27

Figura 15. Trayectoria del huracán Newton a su paso por el Golfo de California. Imagen modificada de Berg (2017).
.....29

Capítulo 1. Introducción

1.1 Florecimientos Algales (FAs)

Los florecimientos algales son fenómenos naturales que resultan de la proliferación del fitoplancton (microalgas) en la superficie o columna de agua (Paerl, 1997), tanto en aguas costeras como oceánicas (Quijano-Scheggia y Aké-Castillo, 2016). En ocasiones, la acumulación es tal (millones de cel l⁻¹) que el océano se torna de un color rojo o pardo (Smayda, 1997, Dierssen, 2006). Coloración que está asociada a la composición pigmentaria de las especies presentes, de ahí que se les conozca de manera coloquial como “mareas rojas” (García-Mendoza et al., 2016). Sin embargo, este término solo describe la parte visual de este fenómeno que dependiendo de la especie formadora y de su concentración puede ser de carácter nocivo o no (Aguirre et al., 1999; García-Mendoza et al., 2016).

Se les denomina Florecimientos Algales Nocivos (FANs) cuando la acumulación de microalgas afecta de forma negativa a la salud pública, intereses socioeconómicos o a ecosistemas acuáticos (Anderson et al., 2012). No obstante, es difícil definir una medida de cuántas células debe haber para que haya un efecto nocivo, ya que este y el tipo de impacto depende de cada especie (García-Mendoza et al., 2016). Esta acumulación puede causar daños físicos a peces por obstrucción de las branquias, fisiológicos por la liberación de toxinas en el medio, y degradación del ambiente por la reducción en la concentración de oxígeno (condiciones de hipoxia y anoxia), disminución de la luz solar disponible en los primeros 20 m de profundidad (Imai et al., 2006) y producción excesiva de espumas las cuales pueden causar una mortandad masiva en aves marinas al afectar la permeabilidad de sus plumas (Jessup et al., 2009). Se estima que 405 especies de microalgas son capaces de formar florecimientos masivos (Cortés-Altamirano et al., 2006).

En la mayoría de los casos, los FANs se desarrollan en aguas costeras ricas en nutrientes. Muchas veces, producto de escorrentías agrícolas y acuícolas, descargas de aguas residuales y aportes de aguas subterráneas que casi siempre están presentes en la mayoría de las costas del mundo (Anderson et al., 2012). De estos factores, el vertimiento de nutrientes de origen terrestre o antropogénicos a los cuerpos de agua suele ser el principal promotor del FAN (Herrera-Sepúlveda et al., 2008; Davidson et al., 2012). La dinámica de un florecimiento responde a las condiciones fisicoquímicas del ambiente (temperatura, irradiancia, salinidad, viento, estratificación, etc.) favorables para su desarrollo (Franks y Anderson, 1992; Pérez-Morales et al., 2015), al igual que a ciertas situaciones (e.g. eutrofización, surgencias, cambio climático, duración de la termoclina estacional) que definen en cierto grado su formación y duración

espacio-temporal (Anderson et al., 2002, 2008; Glibert y Burkholder, 2011). Sin embargo, los factores físicos como corrientes, vientos, mareas, etc. son los principales responsables de su acumulación y transporte (Franks y Anderson, 1992), así como de su disipación por dispersión a causa de la formación de ambientes inestables o de turbulencia, que a su vez causan daños físicos a las células, colonias o filamentos (Ruiz y Band-Schmidt, 2016; Anderson et al., 2012). Estos últimos influyen en el decaimiento de un FAN.

Desde la década de los 70s se ha reportado un aumento en la frecuencia, magnitud y extensión geográfica de FANs en diversas costas del mundo (Ahn y Shanmugam, 2006; Anderson et al., 2012). Anderson (1989) y Hallegraeff (1993) fueron los primeros en dar una perspectiva global acerca de esta tendencia, que se ve reflejada en el incremento de pérdidas económicas en ciudades costeras, el tipo de recursos pesqueros afectados, y los efectos deletéreos en el ambiente y salud humana (García-Mendoza et al., 2016; Anderson et al., 2012; Lewitus et al., 2012; Cortés-Altamirano et al., 2006; Hernández-Becerril et al., 2007). Existen varias explicaciones sobre las causas relacionadas a este incremento. Por ejemplo, el transporte natural de esporas y quistes en reposo de especies formadoras de FANs por corrientes oceánicas y huracanes, el transporte de mariscos portadores de células de resistencia y por la descarga de aguas de lastre, el aumento de actividades de acuicultura y agricultura en zonas costeras (eutrofización), e inclusive el cambio climático podría estar causando en cierta medida la aparición de los FANs (Sellner et al., 2003; Anderson, et al., 2012). Gracias al desarrollo de nuevos enfoques y tecnologías para la investigación y la gestión, el conocimiento y habilidad para entender y manejar estos fenómenos se ha expandido en las últimas décadas. Esto ha permitido un progreso rápido en muchas áreas, desde técnicas moleculares para la identificación de especies formadoras de FANs hasta el monitoreo casi en tiempo real de los florecimientos (Anderson et al., 2012).

En general, un florecimiento algal nocivo es producto de una interacción complicada de mecanismos físicos, químicos y biológicos que propicia el crecimiento y acumulación del fitoplancton en superficie. Esto afecta de forma negativa al ecosistema y ciertos recursos marinos explotados por el ser humano, y en consecuencia, su economía y salud pública (Alonso-Rodríguez y Ochoa, 2004; Anderson et al., 2002).

1.2 Imágenes satelitales de clorofila α

La clorofila- α (chl- α), es una variable biológica usada como proxy de la concentración de biomasa fitoplanctónica y para estimar la producción primaria en los océanos y cuerpos de agua interiores (Gregg

et al., 2003; Martínez et al., 2009). Por lo anterior, al utilizar información de percepción remota, se puede considerar que un florecimiento algal es una anomalía importante en la concentración de chl-*a* superficial que perdura en el tiempo y el espacio en un lugar determinado (Blondeau-Patissier et al., 2014).

La distribución y concentración de chl-*a* está estrechamente relacionada con el ambiente físico del océano, por lo que muchos trabajos se han enfocado en el estudio de la relación que guarda su variabilidad con ciertos factores físicos oceánicos y el cambio climático (McClain et al., 2002; Park et al., 2011; Radenac et al., 2012; Hou et al., 2016). La chl-*a* varía tanto espacial como temporalmente, por lo que es difícil medir sus cambios con métodos de muestreo convencionales. La toma de muestras mediante cruceros oceanográficos, muestreos desde embarcaciones pequeñas y colecta directa en playa, brindan información muy puntual de la concentración de chl-*a* (Kahru et al., 2004). Por lo anterior, la percepción remota del color oceánico ayuda a identificar la presencia de un florecimiento, sobre todo en zonas donde se presentan de manera frecuente y abarcan áreas muy grandes de superficie oceánica (Srokosz y Quartly, 2013). Además de la estimación de chl-*a* superficial, también se pueden utilizar otros productos satelitales como medición de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés), estimación de vectores de viento y corrientes oceánicas, que combinados constituyen una gran herramienta en programas de monitoreo proactivos que pueden ayudar a identificar las condiciones ambientales asociadas a la proliferación de algunas especies (Herrera-Sepúlveda et al., 2008).

1.3 Especie causante del FAN de estudio

En el presente trabajo se buscó entender la evolución espacio-temporal de un FAN de la microalga *Gymnodinium catenatum* ocurrido en las costas de San Felipe (SF) en enero de 2015. *G. catenatum* es un dinoflagelado desnudo que puede encontrarse en cadenas o en forma solitaria. Asimismo, forma quistes temporales y de resistencia. Es formador de FANs y produce neurotoxinas y es una especie cosmopolita que se distribuye en regiones cálidas y templadas. Los FANs de *G. catenatum* se caracterizan por la presencia de saxitoxinas en el medio, que pueden provocar intoxicación paralizante por moluscos (PSP, por sus siglas en inglés) en humanos y mortandad masiva de organismos marinos (Figueroa et al., 2008; Band-Schmidt et al., 2010).

1.4 Antecedentes

1.4.1 Florecimientos algales nocivos en México

Los FANs no son eventos raros en México, se reconocen cerca de setenta especies de microalgas capaces de formar FANs en costas mexicanas (García-Mendoza et al., 2016; Lewitus et al., 2012; Hernández-Becerril et al., 2007). En los últimos 20 años se ha documentado un aumento en su frecuencia de aparición, lo que ha impulsado un incremento en el número de instituciones e investigadores involucrados en el estudio de estos eventos, sin embargo, la mayoría de las actividades y programas de investigación han sido a corto plazo y enfocados a muestreos puntuales (Band-Schmidt et al., 2011). Gran parte de los estudios publicados están enfocados en la identificación y registro de las especies tóxicas formadoras de FANs (Ochoa et al., 1997; Herrera-Silveira, 1999; Hernández-Becerril et al., 2007; Cortés-Altamirano y Sierra-Beltrán, 2008), efectos sobre la maricultura (Alonso-Rodríguez y Páez-Osuna, 2003) y daño en organismos silvestres (Núñez-Vázquez et al., 2011). Esto ha dejado rezagado el conocimiento acerca de las condiciones ambientales (temperatura, radiación solar, turbidez, batimetría, entre otros) asociadas al crecimiento y reproducción de especies nocivas y los patrones espacio-temporales a los que están sujetos los FANs (Blondeau-Patissier et al., 2014). Band-Schmidt et al., (2011) menciona la falta de información que existe en ciertas líneas de investigación con respecto a los FANs, entre las cuales destacan el efecto del cambio climático y la utilización de imágenes de satélite en su monitoreo, coincidiendo con otros autores en la importancia de realizar estudios y programas de monitoreo multidisciplinario para comprender mejor la dinámica de dichos eventos.

1.4.1.1 Florecimientos algales en el golfo de California.

A partir de la década de los 80s, después de que ocurriera un FAN de *G. catenatum* que provocara una gran mortandad de invertebrados marinos e intoxicación en seres humanos en las costas Sinaloa (Mee et al., 1986), el golfo de California se convirtió en la zona costera más estudiada de México y una de las más estudiadas de América latina en cuanto a FANs se refiere (Pérez-Morales et al., 2015; Gárate-Lizárraga et al., 2016). Es común que los FANs se presenten de forma estacional y que resulten perjudiciales para la fauna marina y actividades económicas de las ciudades costeras (Herrera-Sepúlveda, 2008). Los primeros reportes de florecimientos algales en esta zona datan de 1878 (Streets, 1878).

En el Pacífico mexicano y el golfo de California han sido identificadas las microalgas dominantes y formadoras de FANs (Band-Schmidt et al., 2003). Se tiene un registro de 94 especies causantes de proliferaciones, de las cuales 36 son potencialmente nocivas. La información acerca de su temporalidad, distribución geográfica y potencial nocivo ha aumentado en las últimas décadas (Gárate-Lizárraga et al., 2001; Gárate-Lizárraga et al., 2016). Ejemplo de algunos lugares dentro del golfo de California con presencia frecuente de FANs son Bahía Concepción, Bahía de La Paz y Bahía de Mazatlán (Pérez-Morales et al., 2015), en los que el principal protagonista en la mayoría de los casos es el dinoflagelado *G. Catenatum* (Band-Schmidt et al., 2010).

1.4.2 *Gymnodinium catenatum* en México

Pérez-Morales et al. (2015) mencionan que en México los principales grupos del fitoplancton formadores de FANs son los dinoflagelados, diatomeas, cianobacterias, silicoflagelados, haptofitas y rafidoficeas. Los primeros son los más importantes por la diversidad de especies involucradas en la formación de FANs, la gran adaptación a distintos hábitats y por su capacidad de producir toxinas paralizantes (Cortés-Altamirano y Hernández-Becerril, 1998) que pueden alterar los procesos celulares de otros organismos, así como la salud de las personas por consumo de mariscos contaminados (Herrera-Sepúlveda et al., 2008). De los dinoflagelados productores de toxinas y formadores de FANs, *Gymnodinium catenatum* es uno de los más estudiados en México y con más proliferaciones registradas en el golfo de California (Hernández-Becerril et al., 2007; Band-Schmidt et al., 2010). Los registros palinológicos demuestran que los quistes de *G. catenatum* han estado presentes en el golfo de California desde 1483, en concentraciones altas desde 1888 hasta 1920 (Flores-Trujillo et al., 2009); sin embargo, no fue sino hasta 1939 que se reportó un florecimiento de *G. catenatum* ocurrido en la parte norte del golfo (Graham, 1943). Cuarenta años después, en 1979 se reportó otro FAN asociado a esta especie cuya extensión abarcó las costas de Nayarit, Jalisco y Sinaloa (De La Garza Aguilar, 1983; Mee et al., 1986). A partir de este año se observó un incremento en la presencia de esta especie a lo largo de las costas del Pacífico, así como el interés por su estudio a nivel nacional (Band-Schmidt et al., 2010; Hallegraeff et al., 2011).

1.4.3 Imágenes satelitales en el estudio de florecimientos algales.

Desde la década de los 80s se han usado imágenes superficiales de chl-*a* para estimar la biomasa fitoplanctónica en superficie y conocer sus escalas de variación estacional e interanual de esta variable

(Robinson, 2004; Doney, 2006). De igual manera, se han utilizado con éxito imágenes de SST para localizar y rastrear masas de agua, frentes oceánicos y otras características físicas donde se acumula el fitoplancton, permitiendo el estudio de su distribución sobre áreas más grandes y a escalas de tiempo más cortas en comparación con el monitoreo convencional (muestreo en barco) (Aguirre et al., 1999).

En la actualidad existe un incremento en el número de publicaciones por año acerca del uso de la teledetección aplicada a FANs, lo que refleja un aumento en el interés de la comunidad científica mundial en el estudio de estos fenómenos (Blondeau-Patissier et al., 2014). Esto es muy importante, ya que para un entendimiento completo de los mecanismos implicados en el desarrollo de un FAN y de su dinámica espacio-temporal, se necesitan estudios que combinen datos de productos satelitales, datos *in situ* y modelos numéricos físico-biológicos (Kahru et al., 2004; Blondeau-Patissier et al., 2014).

1.5 Justificación

El interés mundial en el estudio de los FANs se debe a que sus efectos resultan en la degradación significativa de ecosistemas marinos, costeros, salobres y de agua dulce (depende de donde se presente), lo que repercute en grandes pérdidas económicas en países donde la pesca y la acuicultura son importantes (Núñez-Vázquez et al., 2011). Los efectos de los FANs hacia estas industrias, en conjunto con la turística, puede traducirse en pérdidas de hasta varios millones de dólares (Kim, 1998), y al afectar a estas industrias, se perjudica indirectamente a la salud pública, donde las personas que hayan consumido mariscos frescos con exposición a las toxinas de un florecimiento pueden sufrir intoxicaciones agudas, y en algunos casos, dependiendo de la cantidad y del tipo de toxina, llegar a morir (Anderson et al., 2012).

La detección temprana de los FANs es una pieza clave en el manejo de recursos marinos y costeros y en la mitigación de sus efectos negativos hacia la población humana, sin embargo, actualmente es imposible controlar o predecir cuándo y dónde se presentarán (Blondeau-Patissier et al., 2014). De igual manera, se requiere de estudios básicos para establecer las causas probables que los originan; sin embargo, en México los recursos destinados al estudio y monitoreo sistemático de estos eventos son insuficientes, lo que ha dejado rezagado en cierto grado su investigación (Herrera-Sepúlveda et al., 2008).

En el Estado de B.C.S. y en el golfo de California se han registrado mortandades masivas de lobos marinos, pelícanos, moluscos, langostas y peces (entre otros organismos), en los que el agente causal ha sido

identificado como FAN (García-Mendoza et al., 2016). En enero del 2015, en la Bahía de San Felipe (BSF) ocurrió el FAN que hasta el momento ha sido el más dañino y de mayor duración que ha tenido México, provocado por el dinoflagelado *G. catenatum*. En el reporte de la campaña de muestreo en la BSF, a cargo del laboratorio de FICOTOX-CICESE en colaboración con personal de la UABC, realizado los días 17 y 18 de enero del 2015 se estimó que 190 mamíferos marinos y 11 mil 648 aves fueron afectadas por toxinas paralizantes (PSP, por sus siglas en inglés) en 80 km de costa. Asociado a este FAN, se aplicó una veda sanitaria por la presencia de toxinas paralizantes en almeja generosa del golfo de Santa Clara (GSC) y Puerto Peñasco (PP) (Mazon, 2015; Rodríguez, 2015). En marzo, en Bahía de los Ángeles se reportaron los primeros casos de personas intoxicadas por toxinas paralizantes en Baja California (Cruz, 2015). La presencia de moluscos con saxitoxina en Bahía de los Ángeles indica que el FAN se propagó a esta zona alcanzando una extensión muy importante (Figura 2). Este evento fue catalogado como el más intenso y perjudicial ocurrido en costas mexicanas por sus repercusiones ambientales, económicas y sociales (Cruz, 2015), superando al acontecido en 1997 también en el alto golfo. Durante este FAN la SEMARNAP-PROFEPA (1997) documentó la muerte de 766 aves y 181 de mamíferos marinos (168 delfines, 9 lobos marinos y 4 ballenas de aleta) por intoxicación por ácido domoico. El monitoreo en tiempo real en el lugar de ocurrencia, magnitud, evolución y desplazamiento de los FANs constituye un reto importante en la actualidad (Cracknell et al., 2001), y aunque ocurren de manera natural en el ambiente, no se puede pasar por alto su impacto en la economía, salud ambiental y pública (Franks, 1995; GEOHAB, 2006). Los FANs son fenómenos oceanográficos-biológicos complejos, por lo que su estudio debe ser abordado desde la biología molecular y mediante modelación numérica y monitoreo por percepción remota (Anderson et al., 2012), y con base en esto, tratar de implementar estrategias de monitoreo, prevención y mitigación sistemática de sus posibles efectos (Franks, 1995; GEOHAB, 2006).

1.6 Hipótesis

Las anomalías de chl-*a* estimada por satélite para el alto golfo de California en diciembre 2014 - febrero 2015 corresponden al florecimiento de *G. catenatum* en el área de estudio, el cual se originó en Bahía San Felipe y se desplazó hacia el sur por influencia de la circulación oceánica estacional del norte del golfo.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo General

- Ubicar los patrones espacio-temporales de chl-*a* estimada por satélite asociados con el florecimiento de *G. catenatum* e identificar variables físicas probablemente relacionadas con su origen y desarrollo.

1.7.2 Objetivos específicos

- Separar los patrones espacio-temporales de la chl-*a* mediante la técnica estadística de Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs).
- Comparar los patrones espacio-temporales seleccionados con datos de abundancia *in situ* de *G. catenatum* y reportes locales sobre la extensión y presencia del florecimiento.
- Identificar los modos de variación correspondientes a cada etapa de la evolución del florecimiento.
- Relacionar variables físicas como temperatura, viento y corrientes superficiales con el origen y dinámica del florecimiento.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Área de Estudio

2.1.1 Golfo de California

El golfo de California (Figura 1a) es un mar subtropical semi-cerrado caracterizado por una productividad primaria alta (Zeitzschel, 1969) como consecuencia de las surgencias costeras, procesos de mezcla dinámica (corrientes y mezcla vertical por marea) y eventos climáticos a gran escala (huracanes, tormentas tropicales, etc.) que provocan un transporte de aguas profundas ricas en nutriente a la zona eufótica (Valdéz-Holguín y Lara-Lara, 1987; Bray, 1988; Gaxiola-Castro et al., 1995). Toda esta productividad primaria hace del golfo un cuerpo de agua biológicamente fértil capaz de mantener numerosas pesquerías a lo largo de sus costas (Álvarez-Borrego, 1983).

En el interior del golfo de California se pueden diferenciar 2 estaciones al año con base en el patrón estacional del viento: verano, que va de junio a septiembre; e invierno, que va de noviembre a abril; con los meses de mayo y octubre de transición entre cada estación (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Cada estación presenta condiciones físicas diferentes. Por ejemplo, en invierno los vientos provienen del noroeste (Figura 1c) y hacen que las corrientes superficiales se muevan hacia la boca del golfo, mientras que en verano los vientos son del sureste (Figura 1b) y mueven las corrientes hacia el norte del golfo (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Estos patrones de viento estacional y la forma semi-cerrada del golfo, permiten que existan surgencias costeras durante todo el año. Sin embargo, como los vientos del noroeste son más fuertes en invierno que los vientos del sureste en verano (~ 5 y ~ 3 m s⁻¹, respectivamente), la surgencia de invierno en la costa continental es más fuerte que la surgencia de verano en la costa peninsular (Lluch-Cota, 2000).

2.1.2 Norte del golfo de California

El norte del golfo de California (Figura 2) se delimita entre las coordenadas geográficas: 29°-32°N y 112°-115°W. Abarca la región de las Grandes Islas al sur, el Delta del Río Colorado al norte, las costas de Baja California al oeste y las de Sonora al este. El clima es continental, existen variaciones diurnas y estacionales.

La influencia de agua dulce por parte del Río Colorado es de aportes nulos o reducidos (García, 2004; Pérez-Arvizu et al., 2009), la precipitación media anual es de 68 mm, la tasa de evaporación promedio estimada es de 900 mm año⁻¹. La distribución de salinidad y temperatura están determinados por los flujos estacionales de calor y humedad, y con la presencia de fuertes mezclas por marea con alturas de hasta 10 m de componentes diurnas y semidiurnas, y mezclas convectivas en invierno (Lavín y Organista, 1988). Es considerada la zona más somera del golfo de California, con corrientes de marea fuertes ($1.5 - 3 \text{ m s}^{-1}$) (Álvarez-Borrego, 1983), altas salinidades superficiales y temperaturas que oscilan entre los 10° y 30°C de invierno a verano (Sverdrup, 1941; Robinson, 1973).

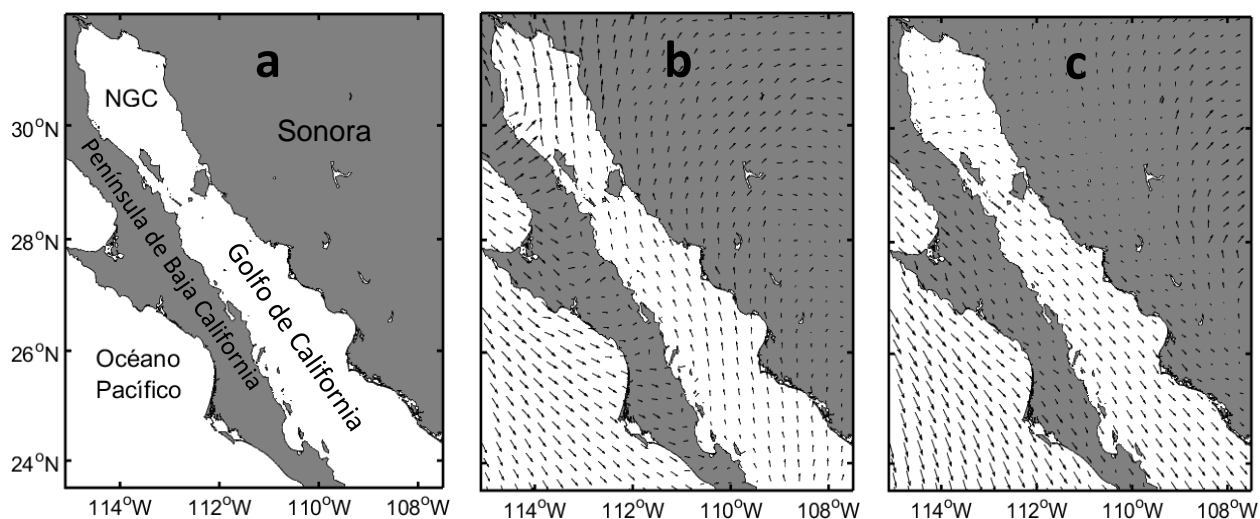


Figura 1. Mapa del golfo de California **(a)**, **NGC**: Norte del Golfo de California. Viento estacional promedio obtenido del North American Regional Reanalysis (NARR) (Mesinger et al., 2006): **(b)** del sureste en condiciones de verano (junio-septiembre 2014) y **(c)** del noroeste en condiciones de invierno (noviembre 2014 - abril 2015).

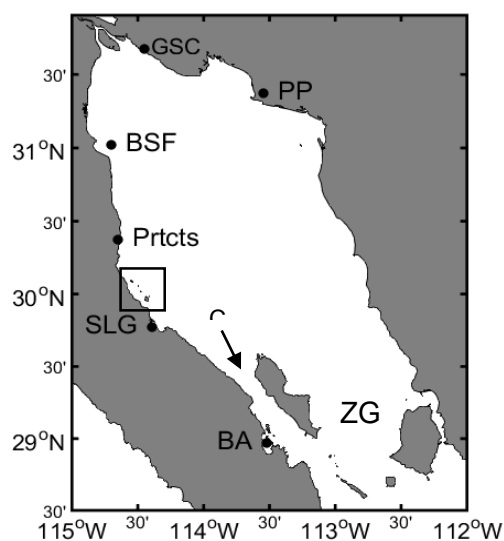


Figura 2. Norte del Golfo de California. **GSC**: Golfo de Santa Clara. **PP**: Puerto Peñasco, Sonora. **BSF**: Bahía de San Felipe, B.C. **Prtcts**: Puertecitos, B.C. **Cuadro pequeño**: zona de pequeñas islas. **SLG**: Bahía San Luis Gonzaga, B.C. **CB**: canal de ballenas. **ZGI**: zona de grandes islas. **BA**: Bahía de los Ángeles, B.C.

2.2 Datos satelitales

Se descargaron imágenes satelitales de chl-*a* y SST de 4km de resolución de la página en línea *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS). Cada imagen representa una matriz 2D ($m \times n$), donde las filas (m) corresponden a las longitudes, y las columnas (n) a las latitudes. Cada matriz se sobrepuso en orden cronológico como una sucesión de imágenes diarias y se creó una matriz 3D ($m \times n \times N$), donde N equivale al tiempo (número de días). A esta matriz de datos se le ajustó (mediante un criterio de cuadrados mínimos) y restó un armónico anual (periodo de 365 días) y semi-anual (periodo de 180 días) para obtener las anomalías con respecto al ciclo estacional (e.g., Venegas et al., 2008). Posteriormente, se aplicó una máscara espacial sobre el continente y la costa occidental de la península de Baja California en todos los mapas para garantizar que los resultados obtenidos por los análisis posteriores correspondieran únicamente al área de interés. Las especificaciones técnicas de los datos se pueden consultar en el anexo 1.

2.2.1 Datos auxiliares

Para conocer la circulación oceánica superficial del área de estudio durante el FAN, se descargaron datos de nivel del mar para un periodo comprendido entre el 15 de agosto de 2014 y el 15 de abril de 2015 desde el sitio web de Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data (AVISO) (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>). El sitio web de AVISO ofrece dos tipos de datos: los “gridded products”, que es la altimetría del nivel del mar de una región en específica sobre una malla espacial (mapas de anomalías del nivel del mar); y “along-track products” que, a diferencia del anterior, son los datos puntuales de nivel del mar que toma el satélite a lo largo de su trayectoria. Como los datos de altimetría en malla que se obtendrían para el golfo de California pueden incluir datos del océano Pacífico en su procesamiento, se optó en utilizar únicamente los datos *along-track* de las anomalías del nivel del mar ubicados dentro del golfo (Figura 5). Esto para evitar cualquier tipo de sesgo que pudiera ocasionar la presencia de datos del Pacífico al momento de calcular las velocidades geostroficadas de la zona de estudio. Las señales de baja frecuencia (períodos de 150 días) se eliminaron restando armónicos ajustados mediante un criterio de cuadrados mínimos. Las anomalías del nivel del mar resultantes para todo el golfo se interpolaron en una malla regular de 4km de resolución mediante un mapeo objetivo. Las

velocidades geostróficas se calcularon a partir de las anomalías del nivel del mar seleccionadas (e.g., Isern-Fontanet et al., 2003).

También se obtuvieron promedios diarios de viento del sitio web North American Regional Reanalysis (NARR) (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.html>), para graficar vectores de viento dentro del golfo.

2.3 Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs)

Dentro de la estadística multivariada, el análisis de FEOs, también conocido como Análisis de Componentes Principales (ACP), es un método útil que permite estudiar la variabilidad temporal y espacial de series de tiempo largas (Lynne, 2001; Naik y D'sa, 2010; Picado et al., 2014). Utilizado por primera vez para predecir las condiciones meteorológicas (Lorenz, 1956; Radiarta y Saitoh, 2008), el uso del análisis de FEOs se ha incrementado simultáneamente junto con la disponibilidad de datos de detección remota (Lynne, 2001). Actualmente, en la oceanografía es utilizado para interpretar las características espaciales y temporales de ciertas variables como el viento y nivel del mar (Hou et al., 2016), SST y chl-*a* (Yoder y Kennelly, 2003; García y García, 2008; Machado et al., 2013). Con la aplicación de FEOs sobre datos de chl-*a* se ha podido detectar con éxito la influencia de procesos oceanográficos ambientales sobre la variabilidad espacio-temporal de la biomasa del fitoplancton (González-Silvera et al., 2006; Navarro y Ruiz, 2006; Mauri et al., 2007; García y García 2008).

El análisis de FEOs divide la covarianza de los datos entre ubicaciones en una serie de modos ortogonales (independientes), cada uno de los cuales se describe por un patrón espacial (eigenvalores) asociado a una serie temporal de variabilidad (eigenvectores o CPs) en ese modo. Cada modo explica un porcentaje (en orden decreciente) de la varianza total presente en la serie temporal (Naik y D'sa, 2010). Si un píxel en la distribución de patrones espaciales y su amplitud de tiempo asociada tienen el mismo signo, significa una desviación positiva de la variable para ese sitio en ese momento, en relación con el valor promedio del mapa regional. Por el contrario, cuando el sitio en la parte espacial y la amplitud de eigenvectores asociados muestran signos opuestos, significa una desviación negativa de la media (Hou et al., 2016).

Existen dos formas diferentes de calcular los FEOs. En la primera se construye una matriz de covarianza de los datos para después calcular los eigenvalores y eigenvectores. En la segunda, se calcula la amplitud

temporal de los eigenvectores espaciales y de sus eigenvalores asociados por medio de la Descomposición de Valores Singulares (DVS), sin necesidad de la matriz de covarianza (Mancilla-Rojas, 2007). Este último se ha utilizado con éxito para interpretar las características espacio-temporales en imágenes de chl-*a* (Wilson y Adamec, 2001; Yoder y Kennelly, 2003; García y García, 2008). A la matriz de datos se le debe restar una media para que los modos resultantes cumplan con el supuesto de ortogonalidad, que dependiendo del objetivo del estudio, puede ser temporal (la media de cada píxel en todas las imágenes) o espacial (la media de cada imagen) (Lynne, 2001; Picado et al., 2014). El método de DVS requiere que las matrices iniciales estén completas, sin datos faltantes (imágenes sin huecos espaciales), razón por la que se optó por utilizar imágenes de nivel 4 del CMEMS, en cuyo nivel de procesamiento se hace un interpolado óptimo de píxeles con datos de diferentes sensores remotos (e.g. MODIS, VIRRS, MERIS, etc.) (Bertrand et al., 2016).

2.4 Computación

La serie de imágenes de chl-*a* y SST fueron analizadas utilizando FEOs para describir la evolución espacio-temporal probable del florecimiento de *G. catenatum* en el NGC. Para el cálculo de los FEOs, se utilizó el método 2 descrito en Mancilla-Rojas (2007), por lo que cada imagen de $m \times n$ se remodeló en una columna de tamaño $M \times 1$ ($M = m \times n$), para luego construir una nueva matriz T de dimensiones $M \times N$, donde M representa el número de puntos en el espacio y N el número de mapas temporales. A esta matriz (T) se le restó una media espacial (s) y posteriormente se dividió entre la raíz cuadrada del tiempo para realizar la descomposición de valores singulares.

Los FEOs se obtuvieron al multiplicar las matrices resultantes (del análisis DVS) U y S ; y los componentes principales al multiplicar la matriz V por la raíz cuadrada del tiempo (N). Todos los procedimientos antes mencionados, así como la lectura de las imágenes de chl-*a* fueron realizados a través del software de programación MATLAB versión 2015.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Análisis de imágenes del mes de diciembre 2014

Como se reportó fauna marina varada en las playas de SF a principios de enero 2015, el análisis espacio-temporal de imágenes de chl-*a* se inició en el mes de diciembre 2014 para ubicar señales que pudieran asociarse con el posible origen del florecimiento. La primera anomalía importante del mes se observó en el día 7 de diciembre de 2014 en bahía San Luis Gonzaga, con valores de hasta 7 mg m⁻³ (Figura 3a). Esta señal, se desplazó hacia el norte con una desviación repentina hacia el interior del golfo el día 10 (Figura 3d-g) debido probablemente a la influencia del giro anticiclónico estacional característico de esta área (Figura 5) (Lavín et al., 1997). Posteriormente, en los días 16 y 17 se observó la segunda gran anomalía (6.21 mg m⁻³) del mes frente a Punta Estrella (Figura 4a y b), sitio donde se encontró el número mayor de especímenes muertos durante la campaña de muestreo en SF el 17 y 18 de enero. Esta señal disminuyó al día siguiente. El 21 de enero se observó la última señal fuerte (6.65 mg m⁻³) que se extendió desde la costa hasta la parte central del alto golfo con una desviación hacia el sur (Figura 4c), describiendo una elongación y curvatura, producto del patrón de circulación dominante en esa área del golfo (Figura 5).

3.2 Análisis de imágenes del mes de enero 2015

En el mes de enero, se observó el desarrollo de una señal el día 14 (Figura 6a), se intensificó (8.37 mg m⁻³) al día siguiente y abarcó toda la BSF y Punta Estrella (Figura 6b). Posteriormente, el día 16 se dividió en 2 partes, una se propagó hacia el norte y la otra hacia el sur (Figura 6c-e). La extensión completa abarcó desde BSF hasta Puertecitos, donde se mantuvo dos días y se disipó el día 19 en ambas regiones (Figura 6f y g).

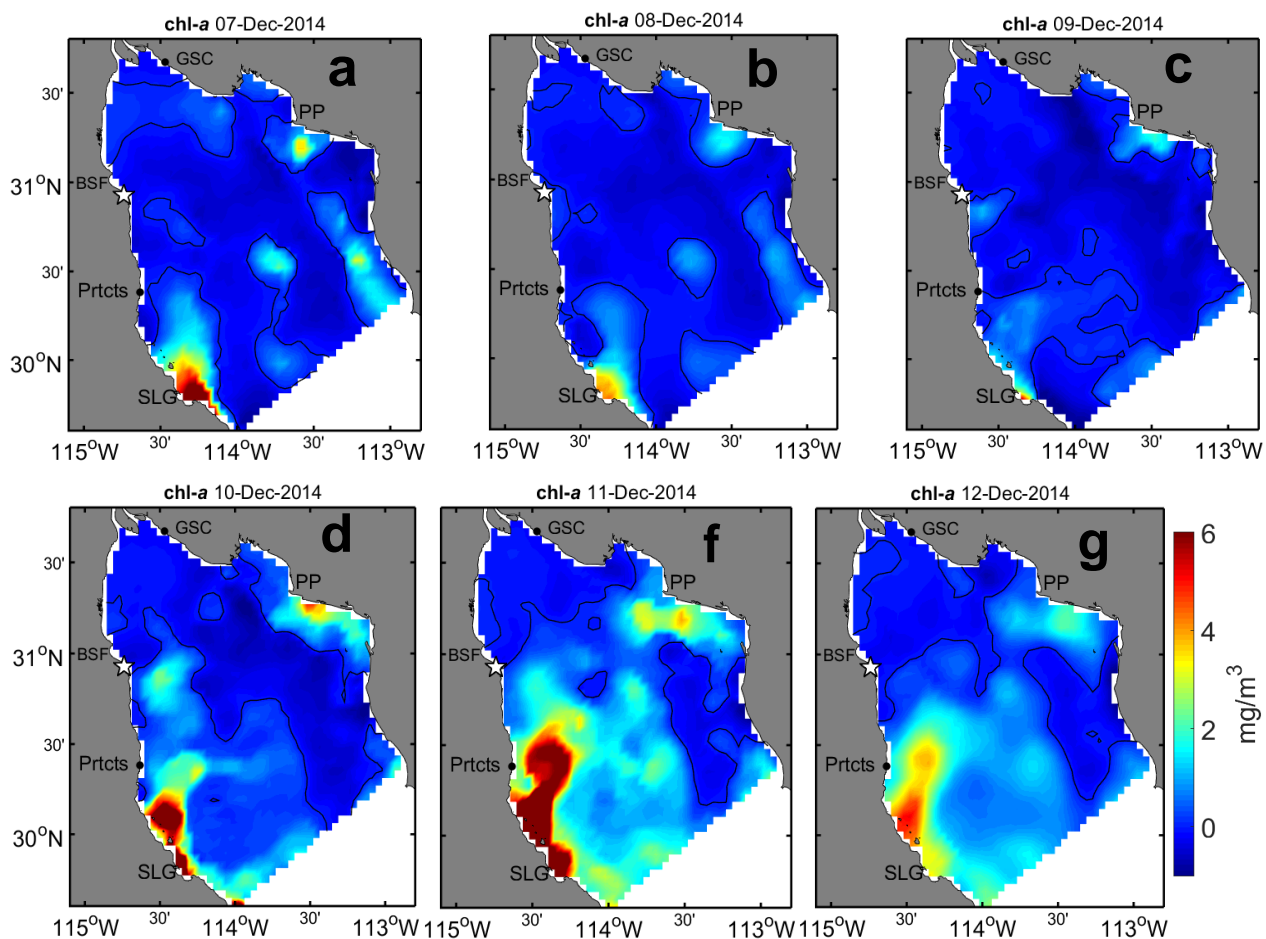


Figura 3. Anomalías de chl-*a* del alto golfo (en el NGC) desde SLG hasta SF en diciembre 2014. Los recuadros a-c muestran la anomalía de chl-*a* originada en SLG, y los recuadros d-g su desplazamiento hacia el noreste de la bahía. Las isolíneas en el mapa marcan los sitios con valor a 0 mg m^{-3} .

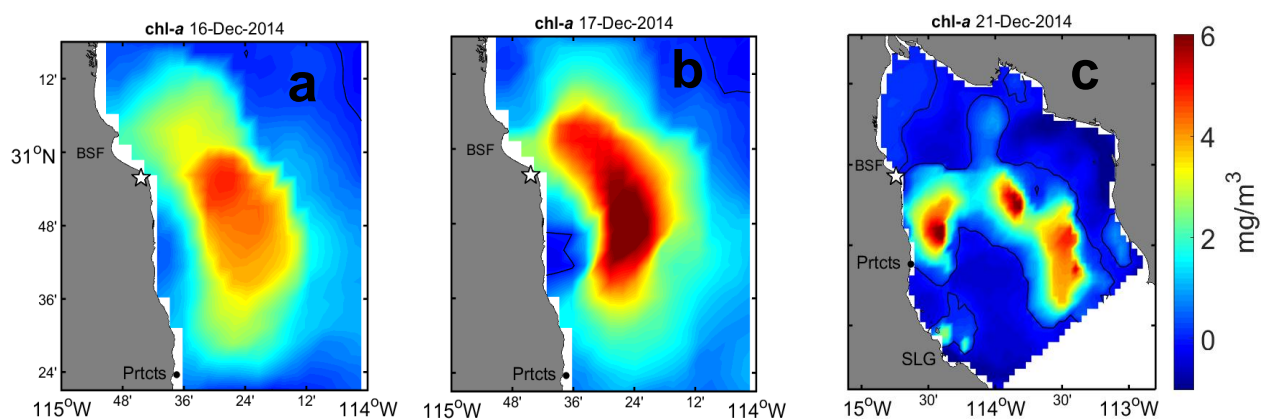


Figura 4. Anomalías de chl-*a* frente a Punta Estrella (símbolo de estrella). Los recuadros a y b muestran la segunda gran anomalía del mes de diciembre (4.9 y 7.52 mg m^{-3} respectivamente). El recuadro c muestra el posible transporte de esta señal (6.61 mg m^{-3}).

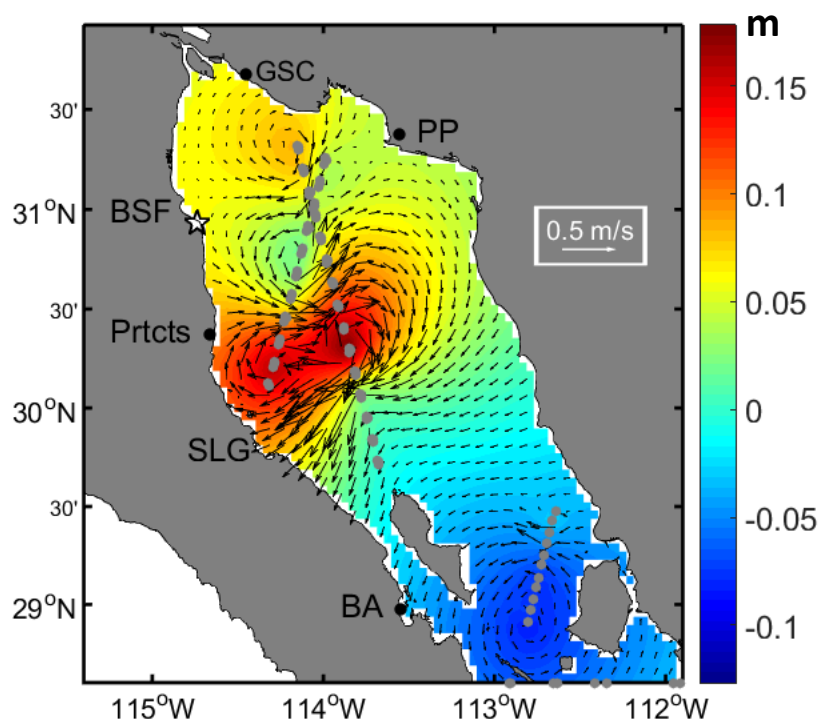


Figura 5. Altimetría y velocidad geostrofica para diciembre 2014. La altimetría y vectores de corrientes se obtuvieron por mapeo objetivo a partir de los datos de anomalías del nivel del mar (*along track*) de AVISO (puntos grises en el mapa).

3.3 Funciones Empíricas Ortogonales (*chl-a*)

En un inicio, se hizo el análisis de FEOs para la matriz de datos regionalizada a la zona de las grandes islas (Serie GI). Sin embargo, esta escala fue mucho mayor al área donde ocurrió el florecimiento y a lo largo del golfo de California existen numerosos procesos que influyen en la variabilidad de clorofila superficial, por lo que no se detectó señal alguna que pudiera relacionarse al florecimiento en ninguno de los modos (Figura 7). Por lo anterior, el dominio se redujo y se creó una nueva serie que abarcara desde la bahía SLG hasta el GSC (Serie SLG).

El primer y segundo modo de la serie SLG se comportaron igual que los modos resultantes de la Serie GI, compartiendo picos positivos similares en los meses de noviembre y diciembre en su parte temporal (Figura 7d y Figura 8c) y anomalías positivas en la costa oeste en su parte espacial (Figura 7a y b, Figura 8a y b), pero con un porcentaje de Varianza Explicada (V.E.) menor (34 y 14%, respectivamente) (Figura 8). En el modo 3 (V.E. 9%) se observó una variabilidad importante en el centro del alto golfo cuya mayor amplitud corresponde al mes de marzo (Figura 9a y c). Finalmente, el florecimiento de *G. catenatum* quedó aparentemente explicado en el modo 4 (Figura 9b y d) cuya extensión coincidió con el área cubierta por

los muestreos realizados el 17 y 18 de enero a lo largo de la costa desde SF a Puertecitos. Asimismo, la parte temporal del modo (CP4) corroboró lo observado en las imágenes satelitales al presentar dos picos en esa área en el mes de diciembre y enero (Figura 9c).

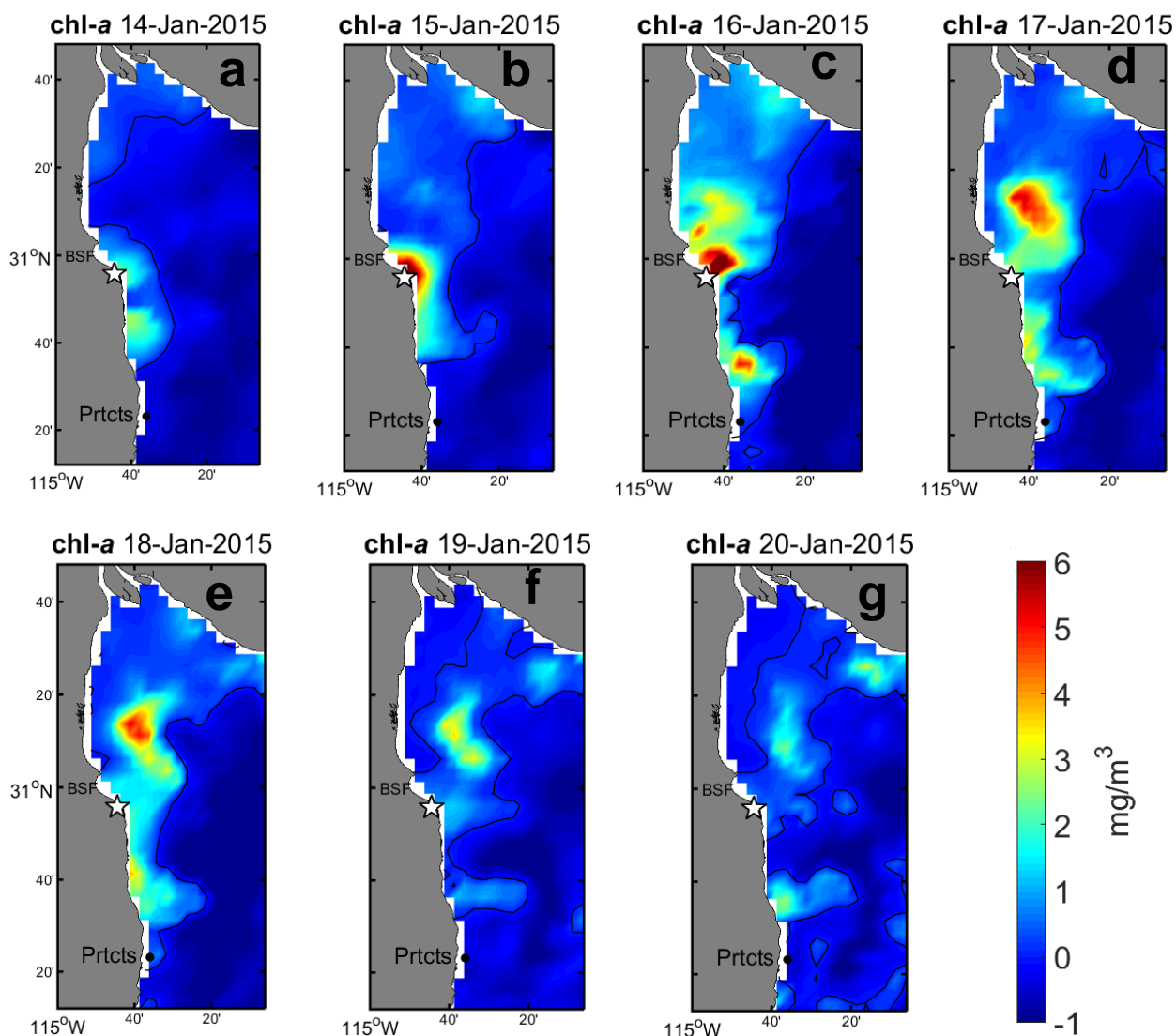


Figura 6. Anomalías diarias de chl-a para enero 2015 de BSF a Puertecitos. Los recuadros **a-c** marcan el inicio de la señal del florecimiento visto el 17 y 18 de enero. Los recuadros **c-e** muestran una propagación hacia el norte y sur de BSF. Los recuadros **f y g** muestran su disipación.

Si bien en la serie SLG se logró identificar una señal aparentemente asociada al florecimiento, se hizo una tercera prueba con la mitad del dominio de la serie SLG para evitar el ruido provocado por las anomalías altas que existen en la zona de PP. En esta última serie (Serie SF), el florecimiento quedó explicado en el modo 3 con una V.E. del 10% (Figura 10).

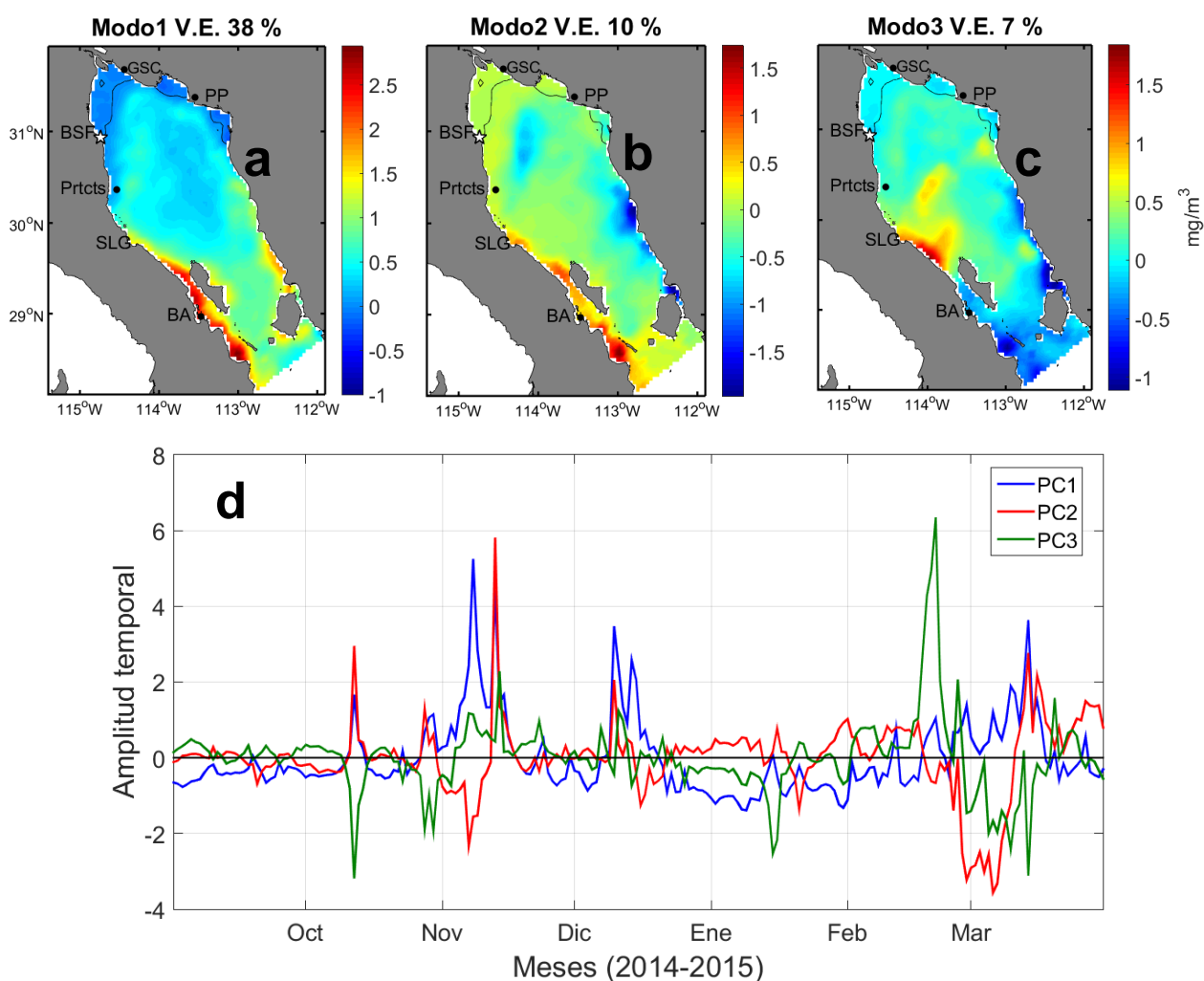


Figura 7. Modos resultantes del análisis de FEOs de la Serie GI. El primer y segundo modo cuentan con una V.E. del 38 y 10%, respectivamente. La mayor variabilidad de chl-*a* se observó en el canal de ballenas (**a** y **b**), y tiene sus picos mayores en los meses de noviembre y diciembre. El modo 3 explica un 7% de variabilidad y tiene su amplitud mayor en el mes de febrero en la entrada norte del canal de ballenas (**c**). Ninguno de los modos de esta serie logra captar una señal clara que pueda relacionarse al florecimiento.

3.3.1 Pruebas previas

Como se mencionó anteriormente, el primer análisis de FEOs se aplicó a la serie GI, que es una matriz de anomalías de chl-*a*. Antes de que se empezara a trabajar con esta serie, se realizaron algunas pruebas preliminares para corroborar la robustez de los picos observados en la Figura 7d. Para esto se construyó una matriz inicial de esta misma región, pero sin restar el ciclo estacional (armónico anual + semianual) (serie GI-r), esto es, con los valores totales de chl-*a* superficial de cada imagen. A partir de esta matriz se construyeron otras 2 nuevas matrices. A la primera matriz se le aplicó un filtro pasa-bajas de 10 días (serie GI-f) para disminuir el ruido provocado por las frecuencias altas observadas en los CPs. La segunda matriz se normalizó (resta de la media de la matriz entre su desviación estándar) (serie GI-n). El análisis de FEOs

se aplicó a estas 3 matrices para ver cómo se comportaban los modos de variación resultantes. En las tres pruebas se obtuvieron modos similares tanto en su parte espacial como en la temporal (Anexo 2). La diferencia más clara fue la suavización de los picos observados en los CPs de la serie GI-f y que su magnitud fue menor que la de las series GI-r y GI-n (Anexo 2d). Sin embargo, su modo resultante fue el que mayor V.E. obtuvo. En vista de que no se encontraron diferencias significativas entre los modos, y que los picos observados en los CPs correspondientes prevalecieron a pesar de las pruebas aplicadas, se decidió trabajar con la serie GI sin climatología ya que mostró una mejor visualización de las anomalías de chl-*a* en su parte espacial (Figura 7a).

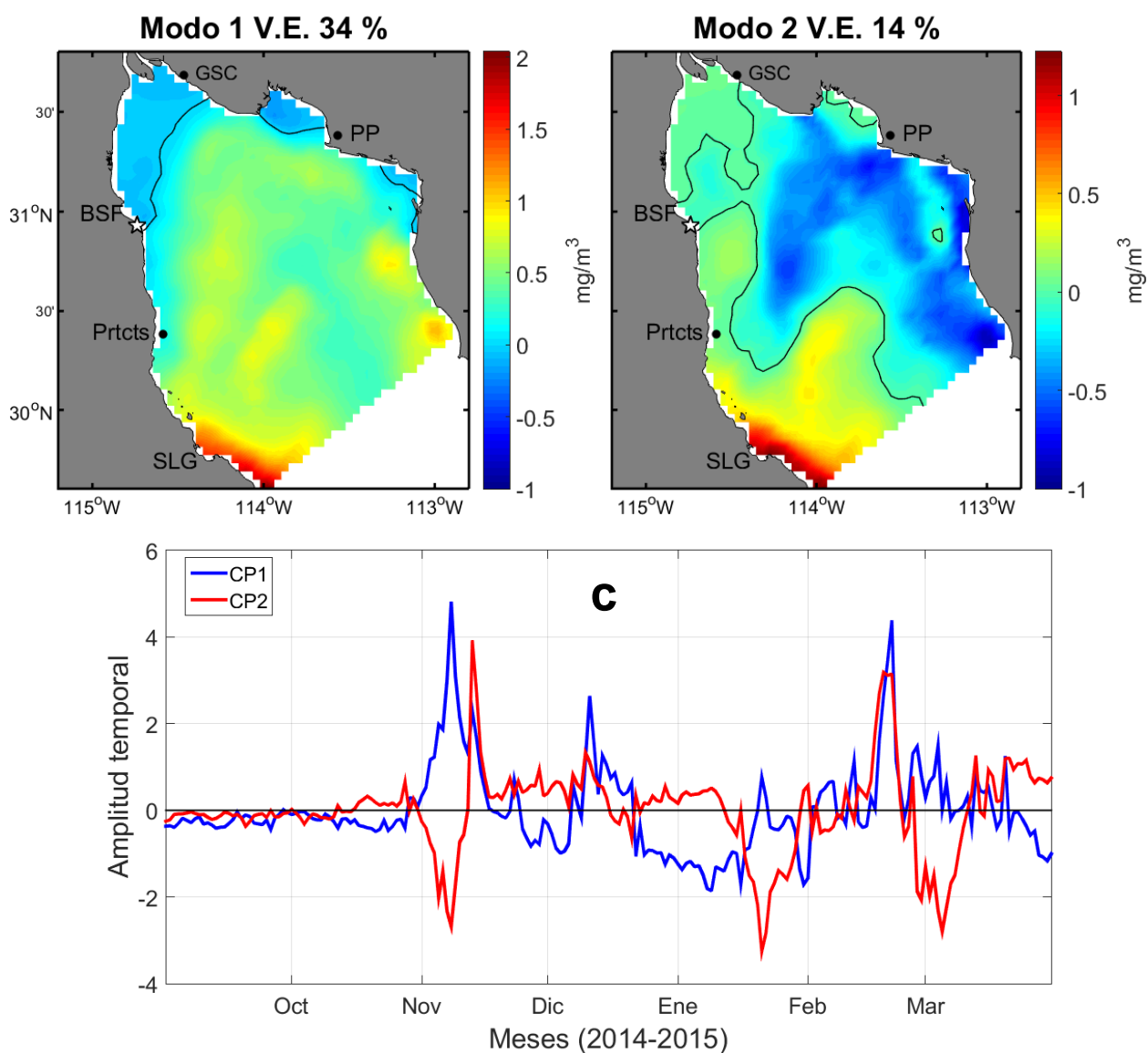


Figura 8. Modos 1 y 2 de la serie SLG. Tanto la parte espacial como la temporal son iguales a la de los modos 1 y 2 de la serie GI, con la diferencia de poseer un porcentaje de V.E. menor de 34 y 14%, respectivamente.

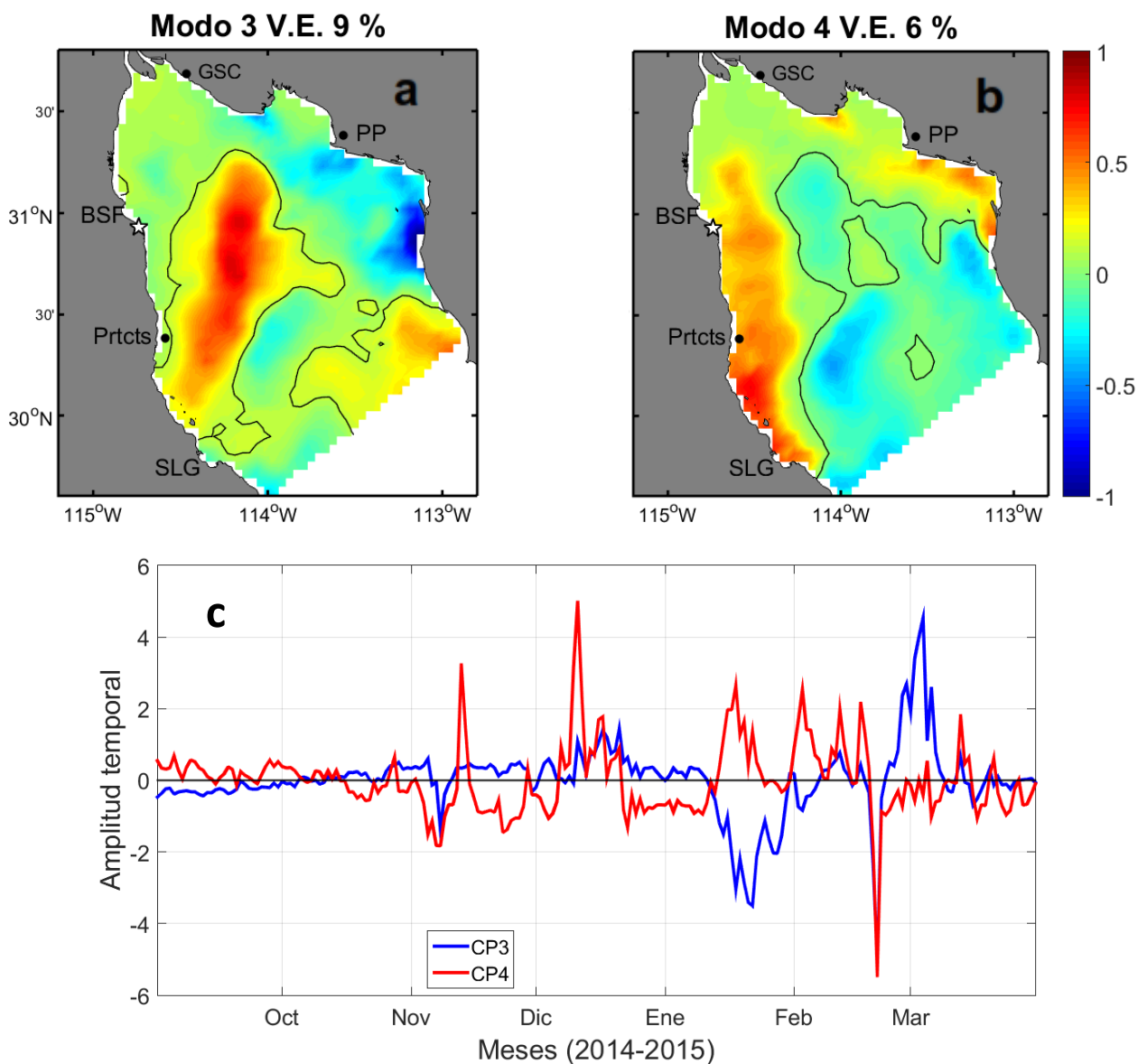


Figura 1. Modos 3 y 4 de la serie SLG. El modo 3 explica un 9% de la varianza total y su mayor variabilidad se localiza desde la zona de Pequeñas Islas, hasta casi llegar a costas de Sonora cercanas al GSC (**a**), su mayor amplitud temporal se encuentra ubicada en el mes de marzo. El modo 4 se asoció a la extensión del florecimiento ocurrido en enero de 2015. Su parte espacial (**b**) presenta una alta variabilidad desde SLG hasta SF y presenta altas amplitudes en los meses de diciembre y enero, este modo explica un 6% de la varianza total.

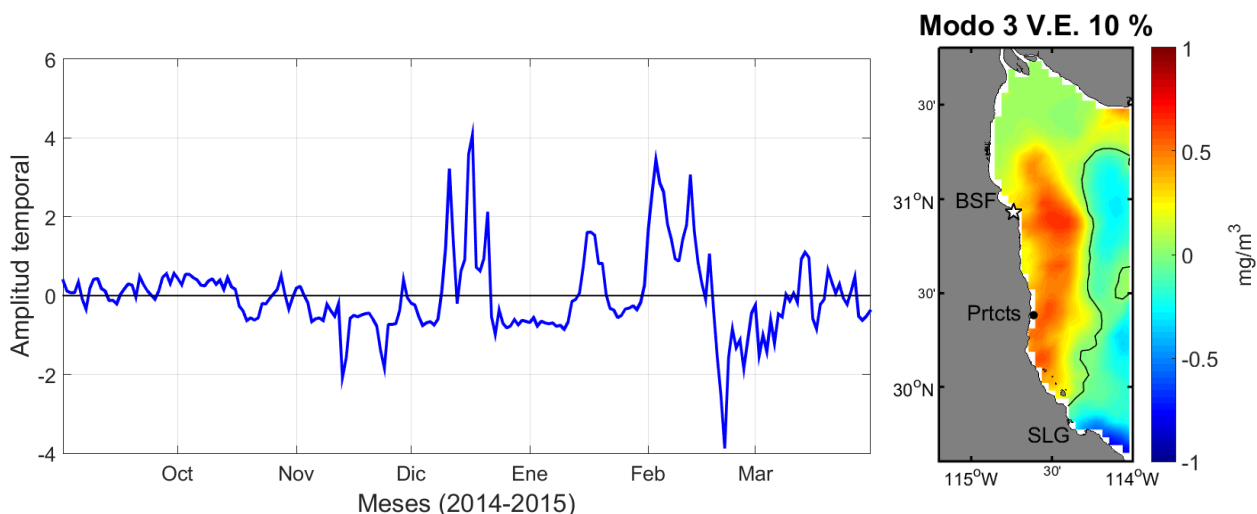


Figura 10. Modo 3 de la Serie SF asociado al florecimiento de estudio. Su extensión va de SF hasta Puertecitos y en la parte temporal se pueden observar anomalías positivas para el mes de diciembre, enero y febrero.

3.4 FEOs de SST

El mismo análisis de FEOs se realizó con datos de SST para la serie SLG. El primer modo explicó el 90% de la varianza y la variabilidad mayor se concentró en el delta del río Colorado. No presentó ningún valor negativo en su parte espacial (Figura 11a), lo que indica que la temperatura varió de forma similar temporalmente en esa parte del alto golfo. El segundo modo (V.E. de 4%) presentó una anomalía espacial positiva muy puntual (Figura 11b) que se asoció al giro anticiclónico presente en esta área (Figura 5). Debido a la cantidad limitada de datos *along-track* (puntos grises en el mapa de la Figura 5) utilizados en el cálculo de las velocidades geostróficas, dicho giro no está bien resuelto como lo sugiere la forma elongada de la anomalía. Sin embargo, al aplicar el Sistema de Modelación Oceánica Regional (ROMS, por sus siglas en inglés) en el alto golfo (Bermúdez Romero, 2017), se encontró una congruencia mayor entre las formas del remolino y la anomalía, pero con un ligero desfase hacia el sur en su ubicación con respecto a ésta (Anexo 3). A partir de esta comparación, se puede deducir que la mayor amplitud observada en la parte espacial del modo 2 está localizada en lo que sería el centro del giro anticiclónico. Entonces esta anomalía podría ser producto del apilamiento característico de aguas (que pueden ser frías o cálidas) en este tipo de giros por causa de un balance geostrófico. Aunque los CPs compartieron picos en determinados momentos, cada uno tuvo una anomalía importante a finales de diciembre y parte de enero (Figura 11c), fechas en las que se presentó el florecimiento.

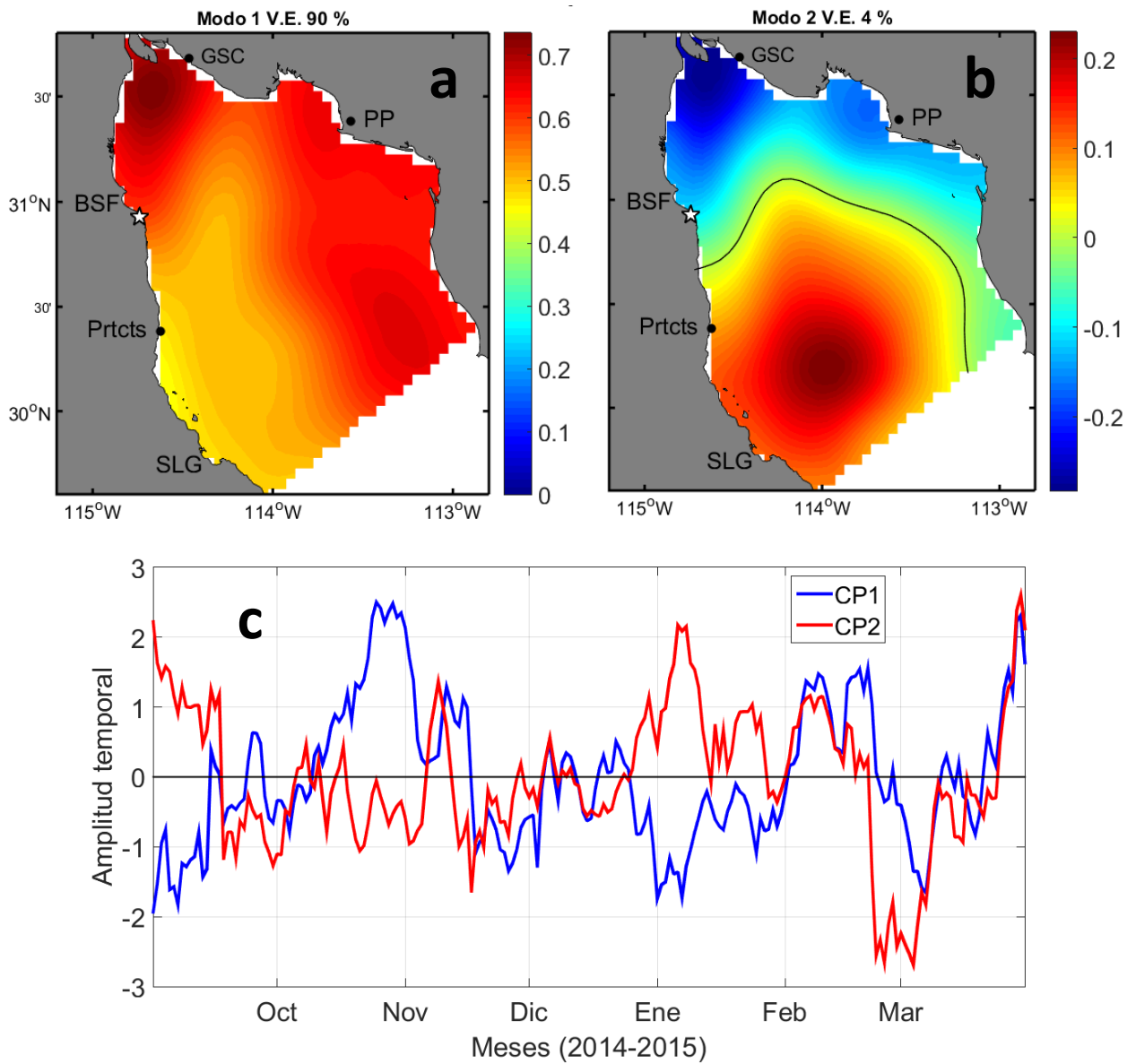


Figura 11. Modos 1 y 2 de la SST para la serie de SLG. El primer modo no registra valores negativos en su parte espacial **(a)** por lo que todo el “mapa” varía de igual manera en el tiempo, la mayor variabilidad se localiza en la boca del río colorado (V.E. 90%). El segundo modo **(b)** logra captar la presencia del remolino anticiclónico presente en el área, cuya mayor magnitud está registrada para el mes de enero (V.E. 4%).

Capítulo 4. Discusión

4.1 Hechos

La presencia de *Gymnodinium catenatum* se detectó en una muestra de agua superficial del área de San Felipe colectada el 14 de enero de 2015. El muestreo extensivo se realizó hasta los días 17 y 18 de enero. Al entrevistar a personas locales acerca del FAN, declararon haber notado fauna marina varada en la playa desde el día 3, lo que da una idea de cuándo pudo haber comenzado el florecimiento. Cortés-Altamirano et al. (2006) mencionan que “el FAN y la mortandad no se presentan al mismo tiempo, son eventos desfasados; primero la concentración de la microalga formadora del FAN, segundo la ingestión y su paso por la trama trófica: microalga, zooplancton, pez planctófago (sardinias); y finalmente la ingesta por el ave o mamífero y el consecuente tiempo para su intoxicación”. Por esta razón, es probable que el florecimiento se haya originado en el mes de diciembre los días 16 y 17, cuando se observó una gran anomalía de chl-*a* que cubrió toda la BSF y se extendió 70 km hacia el sur de la bahía (Figura 4a y b). Probablemente la fauna marina que se observó a principios de enero y que se encontró en estado de descomposición avanzado los días del muestreo se intoxicaron durante estos días.

Con base en lo anterior, se podrían deducir dos posibilidades: 1) que existieron dos florecimientos consecutivos de *G. catenatum* en la zona de BSF, uno en diciembre y el otro en enero; y 2) que se trató de un sólo FAN que se mantuvo en la columna de agua en esta zona por más de dos meses, con picos a mediados de diciembre y enero. Cualquiera de las 2 posibilidades es interesante y resaltan dos principales desventajas que tienen las imágenes satelitales en cuanto al estudio de un FAN. En vista de que todas las especies de fitoplancton tienen como principal pigmento la clorofila-*a* (Hernández et al., 2011) la primera desventaja es que es difícil asegurar si todas las anomalías observadas de diciembre 2014 a enero 2015 corresponden a la concentración de *G. catenatum* o saber en qué momento la señal observada dejó de ser principalmente *G. catenatum*.

Para relacionar las anomalías observadas del mes de enero con *G. catenatum*, se compararon los picos del CP asociado al FAN (CP3-SF) con datos de abundancia relativa (%) obtenidos de muestreos periódicos *in situ* de *G. catenatum* en dos campos pesqueros de la zona de San Felipe donde tuvo presencia el FAN (Figura 12). En esta comparación, se observó que las mayores abundancias de *G. catenatum* coincidieron con los picos de enero y febrero del CP3-SF. Desafortunadamente, solo se contó con un dato de abundancia para el mes de diciembre, por lo que la comparación para el pico de este mes (que fue el mayor) no se realizó.

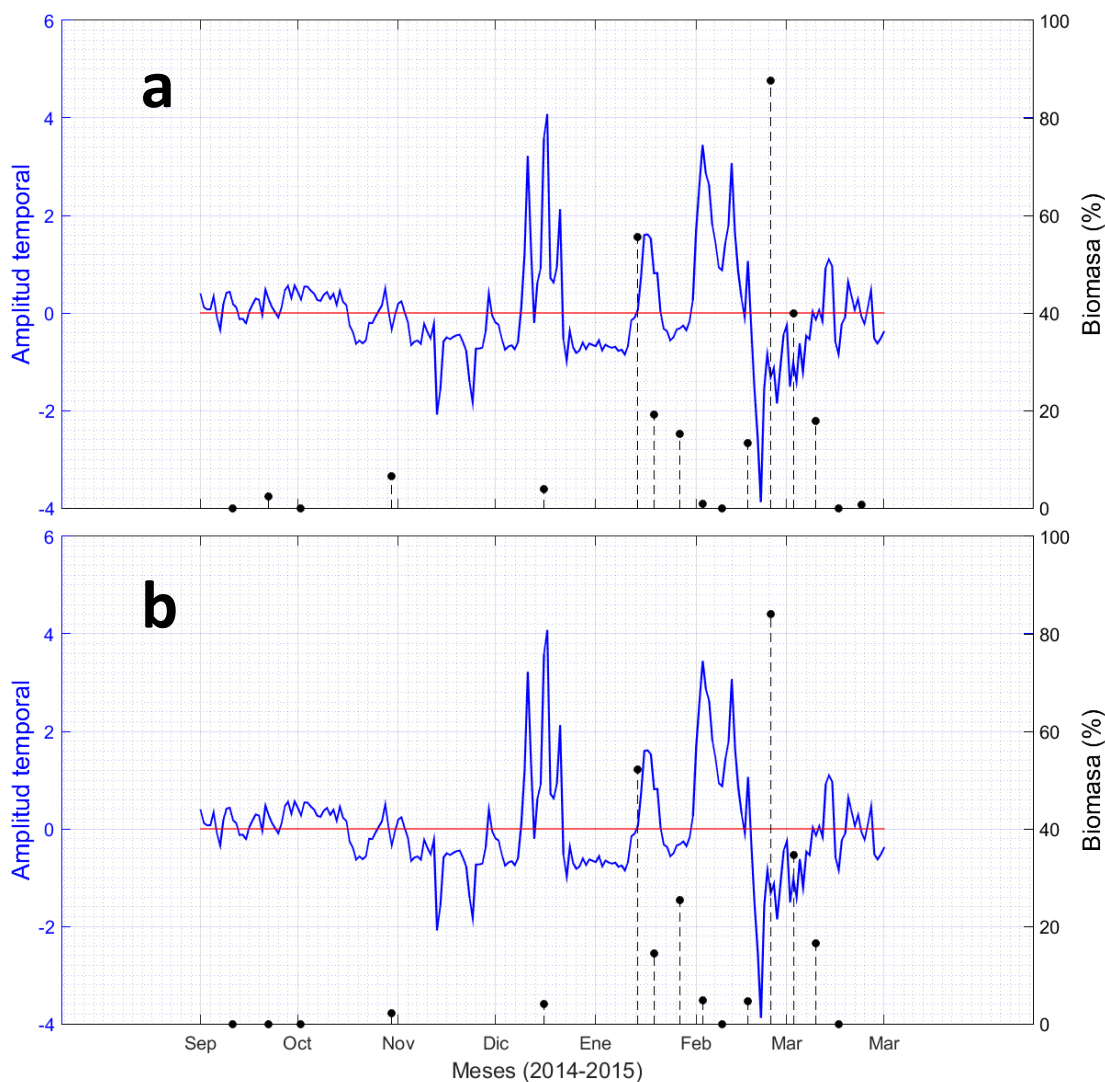


Figura 12. Comparación entre la abundancia relativa de *G. catenatum* (porcentaje de biomasa en una muestra de red) con los picos observados en el CP3 de la serie SF. El recuadro “a” corresponde al campo Minerva y el recuadro “b” al campo Gastelum.

La segunda desventaja es que el sensor remoto únicamente mide la radiancia ascendente de la primera profundidad óptica del océano (Sathyendranath y Platt, 1988), la cual no es constante, ya que depende de los componentes ópticos disueltos en el agua de mar (fitoplancton, detritos, materia orgánica disuelta de color, entre otros) en un momento dado (Morel, 1974). Por esto, si un FAN se encuentra por debajo de esta profundidad al momento de realizarse el barrido de la zona, en superficie no se percibirá alguna señal de su presencia. *G. catenatum* puede desplazarse verticalmente en la columna de agua, y tiene conductas migratorias diurnas dónde puede obtener los nutrientes por debajo de la zona eufótica en sitios no muy profundos, como lo es el alto golfo de California (Aguirre et al., 1999; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Lo que refuerza la idea de que posiblemente este FAN prevaleció en la columna de agua en la zona de BSF por más de dos meses, pero por la capacidad natatoria de la microalga o estratificación en la columna de

agua, se mantuvo fuera del rango de medición de profundidad del sensor durante un intervalo de 25 días desde la última señal fuerte vista el 21 de diciembre hasta la siguiente señal asociada al florecimiento registrada el 15 de enero.

Esta desventaja a su vez puede superarse si al momento de identificarse un FAN, se realizan conteos continuos de cel l^{-1} a diferentes profundidades en sitios específicos del área afectada para verificar si el FAN se disipó o simplemente se hundió y no puede ser percibido por el sensor. Además, la implementación de ambas técnicas permitiría conocer los movimientos verticales del FAN o, en caso de contar con información suficiente de la circulación local dominante (sobre todo en la vertical), un modelo de distribución y transporte de partículas podría ser de gran ayuda para conocer los movimientos espaciales en tres dimensiones de un florecimiento (Pinto et al., 2016).

4.2 Historia del FAN de *Gymnodinium catenatum*

4.2.1 Antes del florecimiento.

Para que ocurra un florecimiento algal se deben presentar ciertas condiciones fisicoquímicas óptimas en el ecosistema acuático (temperatura, salinidad, estratificación, irradiancia, y disponibilidad de nutrientes) para el crecimiento del fitoplancton (Smayda, 2000; Anderson et al., 2012). En la mayoría de los casos, la frecuencia de estos eventos, así como su duración, están determinados por el nivel de eutrofización de la columna de agua (Heisler et al., 2008). Como se dijo anteriormente, la productividad primaria en el golfo de California está controlada por los vientos estacionales, surgencias y eventos climáticos a gran escala (Kahru et al., 2004). Esto resulta interesante puesto que 3 meses antes de que se produjera el florecimiento de *G. catenatum* en BSF, el golfo de California experimentó el paso de 2 huracanes categoría 3 en la escala Saffir-Simpson. El huracán Norbert del 3 al 6 de septiembre (Figura 13a) y el huracán Odile, del 14 al 17 de septiembre (Figura 13b), cuyos vientos de $\sim 44 \text{ m s}^{-1}$ tuvieron presencia hasta el extremo norte del golfo. En verano, la intensidad del viento es de aproximadamente $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$ (Lluch-Cota, 2000). Estos vientos estacionales, al provenir del sureste, son responsables de las surgencias costeras a lo largo de la costa oeste del golfo durante los meses de junio a septiembre (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). La intensidad del viento durante los huracanes pudo haber provocado un aumento de la mezcla vertical en la columna de agua, intensificación de las surgencias costeras, mayor transporte de nutrientes por circulación oceánica del sur al norte del golfo y la incorporación de nutrientes terrígenos del continente al océano, generando las condiciones para el desarrollo del fitoplancton marino, no sólo de *G. catenatum*.

Sin embargo, la asimilación de nutrientes por parte del fitoplancton se ve perjudicada en condiciones de turbulencia alta (Sigee, 2005), por lo que su velocidad de respuesta ante el aumento en la disponibilidad de nutrientes ocasionada por los vientos fuertes pudo haberse retrasado. Esto se vio reflejado en el aumento repentino de la chl-*a* satelital en la ZGI dos meses después del paso del huracán Odile el 8 de noviembre en el canal de ballenas (Figura 7a y b). Zona que se caracteriza por su intensa mezcla vertical por mareas (Badan-Dangon et al., 1991). Fue hasta el mes de noviembre que el golfo de California experimentó el cambio con dirección sur de los vientos y comenzó a presentar las condiciones de invierno, por lo que puede que el FAN de *G. catenatum* haya comenzado a desarrollarse una vez las condiciones físicas regresaron a la “normalidad”, probablemente en el mes de diciembre.

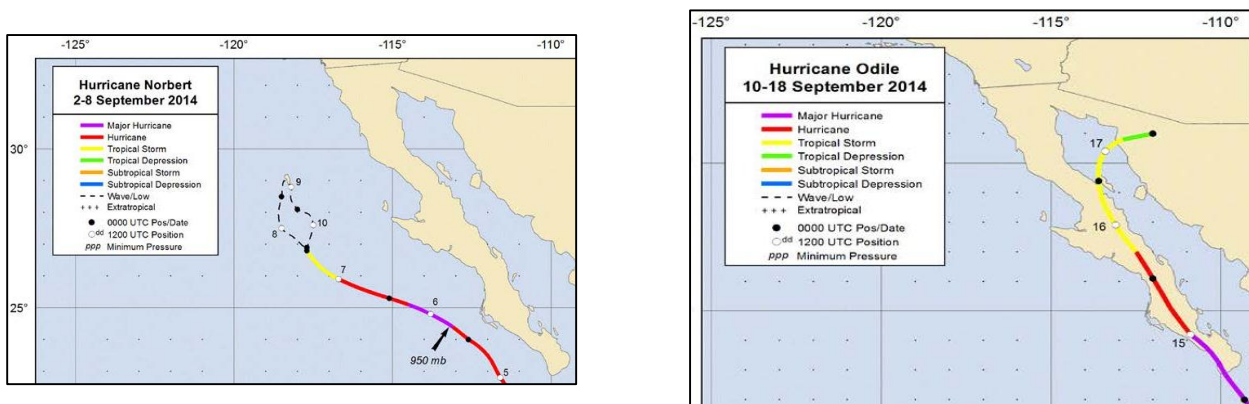


Figura 13. Trayectoria de los huracanes Norbert (a) y Odile (b). Imágenes modificadas de Avila (2014) y Cangialosi y Kimberlain (2014), respectivamente.

Al comparar el CP1 de la SST (Figura 14a), asociado a una variación general de temperatura en el área, y el CP4 de chl-*a* (asociado al FAN) se observó que antes de los picos de chl-*a* de diciembre y enero ocurrió una disminución en el valor de SST, que progresivamente aumenta junto con la chl-*a*. Por el contrario, el CP2 de SST (Figura 14b) asociado al giro anticiclónico, presenta picos positivos justo antes de los picos de chl-*a* de noviembre y enero, lo que indica un aumento en la magnitud de la anomalía espacial ubicada en el centro del giro (Figura 11b). Dicha anomalía aumentaría la estratificación de la columna de agua, haciendo la termoclina más profunda. Lo que apoya la hipótesis 2 de un sólo FAN, cuya profundidad pudo haberse visto afectada por la estructura vertical del giro anticiclónico y los cambios en la estratificación de la columna de agua. Esto sugiere que, si bien el principal factor al que se le atribuye el crecimiento de *G. catenatum* fue el aporte y mezcla vertical de nutrientes generado por los fuertes vientos de semanas anteriores, puede que los cambios repentinos observados en los CPs de SST hayan jugado un papel sustancial en su desarrollo y mantenimiento. La razón es que la temperatura también es un factor importante en los florecimientos de esta especie, y un cambio abrupto de esta variable puede desaparecer ciertos grupos algales y permitir que otras especies con rango de temperatura amplio (cómo lo es *G. catenatum*) se desarrollen sin ningún tipo de competencia (Aguirre et al., 1999; Gárate-Lizárraga et al., 2016).

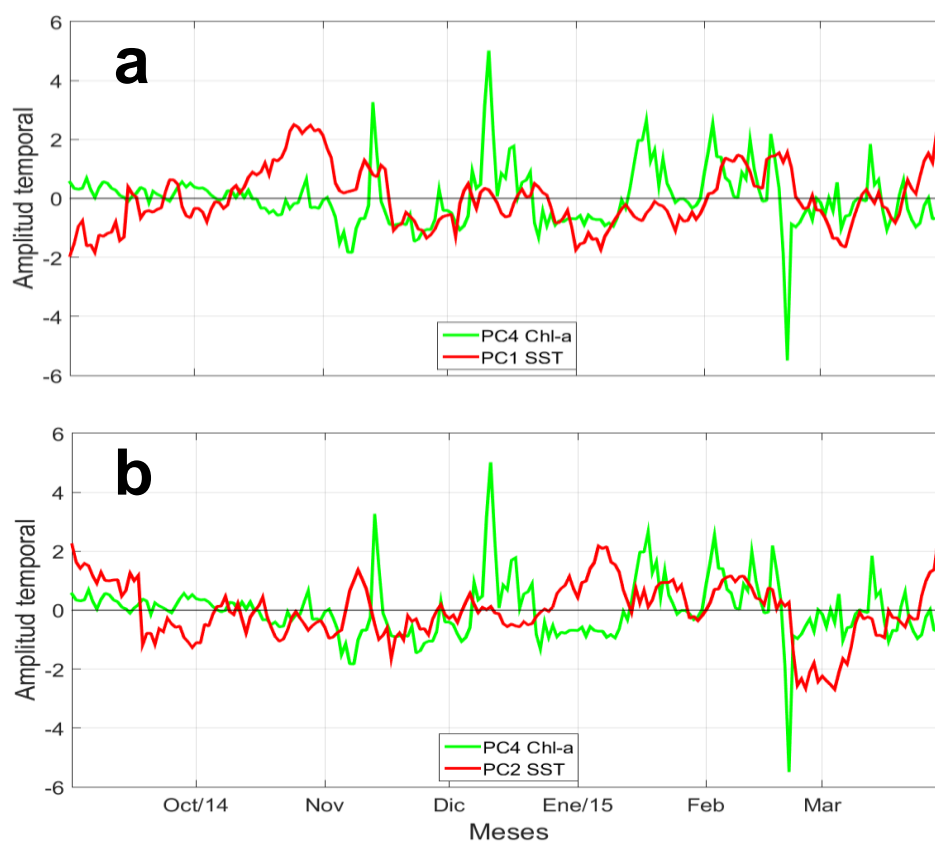


Figura 14. Comparación del (a) CP1 y (b) del CP2 de SST con el CP4 de chl-*a* asociado al florecimiento.

4.3 Funciones Empíricas Ortogonales

En las pruebas a gran escala (golfo completo y GI) no se encontró alguna señal de la presencia del florecimiento, pero al reducir la escala (SLG y SF) el florecimiento quedó expresado en los modos 4 y 3, respectivamente (Figura 9b y Figura 10). La señal asociada al FAN nunca quedó en los dos primeros modos aunque se redujo la escala espacial a la zona donde más tuvo presencia (costa de SF a Puertecitos). Esto es debido a que un FAN es un fenómeno biológico que depende de la combinación de ciertas condiciones ambientales para su desarrollo, y aunque represente un aumento repentino en la concentración de chl-*a* satelital, suelen ser esporádicos, sin tiempo de repetición definido. Al contrario de otros procesos oceanográficos que perduran más en el tiempo o se repiten de manera continua a escalas pequeñas, influyendo en la variabilidad de chl-*a*. Estos procesos, al dominar la forma en que varía la chl-*a* en el área de estudio, son los que obtuvieron el porcentaje mayor de varianza explicada en el análisis de FEOs (modos 1 y 2), al contrario de un FAN que sólo se presenta en circunstancias muy específicas.

4.4 Eventos posteriores

Después de enero de 2015 y en todo el año 2016 no se reportaron FANs para la Bahía de San Felipe, sin embargo, en enero de 2017 ocurrió nuevamente un FAN de *G. catenatum* de igual o mayor magnitud que el descrito en este estudio. Aún no se puede decir que San Felipe es una zona recurrente de FANs con una frecuencia de aparición de 2 años, sobre todo porque no hay reportes de FANs importantes en esta área para antes del 2015. Al igual que en el 2014, en el 2016 se presentó un huracán en septiembre. El huracán Newton (Figura 15). Ambos huracanes presentaron una trayectoria que cruzó la península y entraron al golfo cruzando la zona de las grandes islas en el caso de Odile, Newton cruzó más al sur. Los huracanes continuaron su recorrido hacia el norte, disminuyendo su intensidad al adentrarse al estado de Sonora y Arizona, E.U.A., respectivamente. Aunque fueron de escalas diferentes (3 y 1, escala Saffir-Simpson) ambos sucesos representaron una anomalía importante en cuanto a la intensidad del viento que normalmente está presente en el norte del golfo.

Analizando estos hechos, pareciera existir una relación causa-efecto entre un fenómeno físico y uno biológico, con intervalo de 3 a 4 meses entre cada uno, donde los efectos provocados por un huracán (vientos, corrientes, mezcla vertical, aporte de nutrientes, etc.) favorecen en cierto grado el florecimiento de *Gymnodinium catenatum* al norte de las grandes islas. Además, si se analiza la temporada de huracanes del Pacífico del año 2015 y otros años (2013, 2012, 2011), ninguno tuvo un huracán que se adentrara al

golfo como los del 2014 y 2016, y tampoco se tienen reportes de FANs que ocurrieran en la parte más al norte del golfo en su año siguiente. Aunque no se ha calculado una probabilidad o correlación que demuestre esto objetivamente, los hechos no se pueden pasar por alto y lo que pareciera ser una coincidencia entre dos fenómenos consecutivos, podría resultar en un indicador de cuándo es más probable que se presente un FAN de *G. catenatum* en el área de San Felipe, y de ser así, este indicador ayudaría a las autoridades locales a tomar las precauciones necesarias para tratar de mitigar sus efectos en la medida de lo posible sobre las pesquerías, granjas acuícolas y salud pública de ciudades aledañas a las costas afectadas.

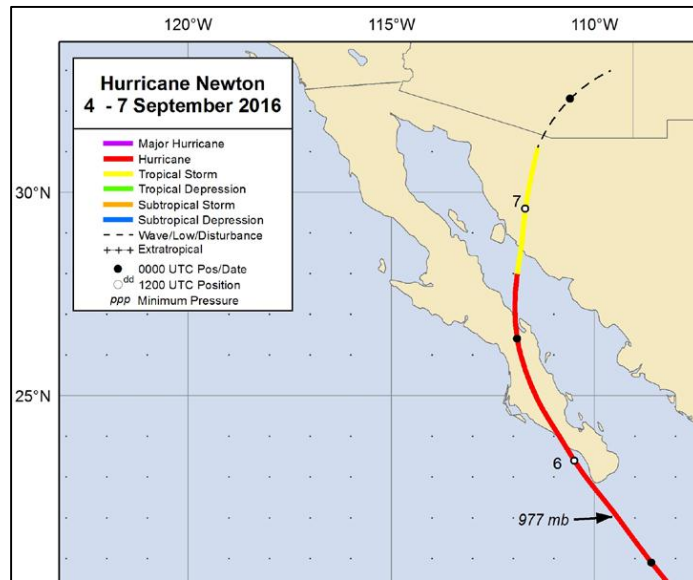


Figura 15. Trayectoria del huracán Newton a su paso por el Golfo de California. Imagen modificada de Berg (2017).

Capítulo 5. Conclusiones

El análisis de imágenes de satélite de chl-*a*, en conjunto con el análisis de FEOs, constituyeron una herramienta eficiente para describir la evolución espacio-temporal de un FAN de *G. catenatum*, lográndose identificar su origen, extensión y posible transporte en el norte del golfo de California.

Los primeros modos del análisis de FEOs permitieron conocer la forma en que varía la chl-*a* en el área de estudio para el tiempo seleccionado, incluso, si se observan los patrones descritos en la parte espacial de cada modo, se pueden inferir los procesos oceanográficos que influyen en su variación.

Aunque en la parte espacial de los modos se observan ciertos patrones espaciales, es necesario compararlos con vectores de viento y corrientes superficiales para inferir la dirección de su posible transporte. En el caso de la señal asociada al FAN, aparentemente siempre describió la forma de la circulación dominante superficial del norte del golfo, transportándose desde San Felipe hasta Puerto Peñasco, pasando por el golfo de Santa Clara.

Al observar los mapas de viento sobre las imágenes de chl-*a* del golfo de California completo, se corroboró el transporte de partículas que hubo del sur al norte al paso del huracán Odile (Anexo 4). Este evento extremo generó probablemente las condiciones para el desarrollo del florecimiento de *G. catenatum*.

5.1 Recomendaciones

Debido a la aparente naturaleza estocástica que poseen los FANs en cuanto a su ocurrencia, extensión y magnitud, es muy difícil obtener datos puntuales adecuados para su estudio. La mayoría de los muestreos *in situ* no se realizan cuando ocurre el suceso, sino un par de días después cuando se avista una cantidad considerable de fauna marina varada en las playas o flotando a la deriva, o cuando hay reportes de intoxicación por consumo de moluscos. Por esto la velocidad de respuesta de las instituciones a cargo de realizar dichos muestreos a veces no es muy rápida y la obtención de datos *in situ* se hace un poco a destiempo cuando la concentración de toxinas y células han disminuido y la circulación oceánica ha dispersado el FAN o lo ha transportado a otro lugar.

El Puerto de San Felipe se ha visto afectado dos veces por FANs de la misma especie y en periodos similares (diciembre-enero) bajo circunstancias previas similares (el paso de un huracán por la zona de las grandes islas), esto da un indicador de cuándo es más probable que se presenten estos eventos. Como parte de un monitoreo proactivo de la zona, se recomienda:

- Observar la trayectoria de los huracanes que se reporten para el Pacífico mexicano. Se necesita conocer la asociación entre estos 2 fenómenos.
- A partir de la concentración de chl-*a* mostrada en las imágenes satelitales, definir un estado “bloom” y “no bloom”. Esto es, comparar los valores de chl-*a* en una determinada zona en presencia y ausencia de un florecimiento y así diferenciar de una forma más rápida cuáles son las concentraciones “normales” de chl-*a* registradas para un sitio y cuáles serían las anómalas que estarían provocando el florecimiento.
- Si ya se presentó un huracán cuya trayectoria logró alcanzar el norte del golfo de California, se deben efectuar muestreos *in situ* continuos en las zonas afectadas anteriormente por FANs para llevar un registro del crecimiento del fitoplancton (de *G. catenatum* principalmente) en la columna de agua. De igual manera, se recomienda el monitoreo diario, a partir de una fecha específica, del valor de la chl-*a* satelital por si se presentaran anomalías relacionadas con estados “bloom”. En caso de presentarse un FAN, se debe tratar de ubicar los puntos de mayor concentración de chl-*a* en las imágenes de satélite para realizar los muestreos *in situ*, y disminuir los esfuerzos de muestreo en lugares donde probablemente no hay una cantidad importante de células de fitoplancton.
- Al definirse un estado “bloom”, o cuando se dé la señal de alarma de la presencia de un florecimiento de *G. catenatum*, se debe tratar de obtener la mayor cantidad de datos posibles de las zonas afectadas por el FAN. Esto ayudará a crear un registro de las condiciones en las que se presentan los florecimientos de *G. catenatum* al norte del golfo de California y si estas condiciones se ven modificadas abruptamente por un huracán.

Si bien la mortandad de fauna marina es algo que no se puede evitar, es necesario tomar medidas para disminuir las pérdidas económicas que representan estos eventos para las pesquerías y granjas acuícolas al norte del golfo de California. El monitoreo continuo de imágenes satelitales de chl-*a*, en combinación con un programa de muestreo en “zonas de riesgo”, podría ser la pieza clave para predecir estos sucesos y por consiguiente disminuir las afectaciones a la economía y salud pública.

Literatura citada

- Aguirre, G.R., Alvarez, R., Salmerón G.O. 1999. Red tide evolution in the Mazatlán Bay area from remotely sensed sea surface temperatures. *Geofísica Internacional*. (38) 2, 63-71
- Ahn, Y.H., Shanmugam, P. 2006. Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal waters. *Remote Sensing of Environment*. 103(4), 419–437.
- Alonso-Rodríguez, R., Ochoa J.L. 2004. Hydrology of winter-spring “red tides” in Bahía de Mazatlán, Sinaloa, México. *Harmful Algae*. (3), 163–171.
- Alonso-Rodríguez, R., 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.
- Álvarez-Borrego, S. 1983. Gulf of California. En: Ketchum B.H. (Ed.) *Estuaries and Enclosed Seas*. Elsevier.
- Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, J.R. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. (47), 555–567.
- Anderson, D.M. 1989. Toxic algal blooms and red tides: a global perspective. En: Okaichi T., Anderson, D.M., Nemoto, T. (eds) *Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology*, New York: Elsevier. pp. 11–16.
- Anderson, D.M., Burkholder, J.M., Cochlan, W.P., Glibert, P.M., Gobler, C.J., Heil, C.A., Kudela, R.M., Parsons, M.L., Rensel, J.E.J., Townsend, D.W., Trainer, V.L., Vargo, G.A. 2008. Harmful algal blooms and eutrophication: Examining linkages from selected coastal regions of the United States. *Harmful Algae*. (8), 39-53.
- Anderson, D.M., Cembella, A.D., Hallegraeff, G.M. 2012. Progress in Understanding Harmful Algal Blooms: Paradigm Shifts and New Technologies for Research, Monitoring, and Management. *Annual Review of Marine Science*. 4(1), 143–176.
- Anderson, D.M., Glibert, P.M., Burkholder, J.M. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrients sources, composition, and consequences. *Estuaries*. 25(4b), 704-726.
- Avila, L.A. 2014. HURRICANE NORBERT (EP142014), 2-8 September 2014. NATIONAL HURRICANE CENTER TROPICAL CYCLONE REPORT. pp. 1-18.
- Badan-Dangon, A., Hendershott, M.C., Lavín, M.F. 1991. Underway Doppler current profiles in the Gulf of California. *Eos Trans. AGU* 72: 209-218.
- Band-Schmidt, C.J., Bustillos-Guzmán, J.J., López-Cortés, D.J., Gárate-Lizárraga, I., Núñez-Vázquez, E.J., Hernández-Sandoval, F.E. 2010. Ecological and physiological studies of *Gymnodinium catenatum* in the Mexican Pacific. *Marine Drugs*. (8), 1935-1961.
- Band-Schmidt, C.J., Lechuga-Devéze, C.H., Kulis, D.M., Anderson, D.M. 2003. Culture studies of *Alexandrium affine* (Dinophyceae), a non-toxic cyst forming dinoflagellate from Bahía Concepción, Gulf of California. *Botanica Marina*, 46(1), 44–54.

- Band-Schmidt, C.J., Bustillos-Guzmán, J.J., López-Cortés, D.J., Núñez-Vázquez, E., Hernández-Sandoval, F.E. 2011. El estado actual de los florecimientos algales nocivos en México. *Hidrobiológica*. 21(3): 381-413.
- Berg, R. 2016. HURRICANE NEWTON (EP152016), 4-6 September 2016. NATIONAL HURRICANE CENTER TROPICAL CYCLONE REPORT. pp. 1-25.
- Bermúdez Romero, A. 2017. Modelación numérica de los efectos de aportes de nutrientes costeros en la abundancia del fitoplancton en el Golfo de California. Tesis de maestría en ciencias: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 54 pp.
- Bertrand, S., Garnesson, P., Gohin, F. 2016, agosto 4. QUALITY INFORMATION DOCUMENT. For Ocean Colour Global and Atlantic daily Optimal Interpolation of merged fields of Chlorophyll-a. Consultado el 11 de junio del 2017 de http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=OCEANCOLOUR_GLO_CHL_L4_REP_OBSERVATIONS_009_082.
- Blondeau-Patissier, D., Gower, J.F.R., Dekker, A.G., Phinn, S.R., y Brando, V.E. 2014. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. *Progress in Oceanography*. (123) 23–144.
- Bray, N.A. 1988. Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 93(C5), 4993–5020.
- Cangialosi, J.P., Kimberlain, T.B. 2014. HURRICANE ODILE (EP152014), 10-18 September 2014. NATIONAL HURRICANE CENTER TROPICAL CYCLONE REPORT. pp. 1-26
- Cortés-Altamirano, R. C., Sierra-Beltrán, A. P. 2008. Biotoxins from freshwater and marine harmful algal blooms occurring in Mexico. *Toxin Reviews*. 27(1): 27-77.
- Cortés-Altamirano, R. y Hernández-Becerril, D. U. 1998. Especies responsables y probables de mareas rojas. En: Cortés-Altamirano, R. ed. *Las mareas rojas en México*. pp. 43-79. México, D. F., México: AGT Editores.
- Cortés-Altamirano, R., Sierra, A., Barraza-Guardado, R. 2006. Mortandad de peces debido a microalgas nocivas y tóxicas: Cinco casos de marea roja en la costa continental del golfo de California (2003-2004). pp. 79-90. En: Salas, S., Cabrera, M.A., Ramos, J., Flores D., Sánchez, J. (eds). *Memorias Primera Conferencia de Pesquerías Costeras en América Latina y el Caribe. Evaluando, Manejando y Balanceando Acciones*. Mérida, Yucatán, México. Octubre 4-8, 2004.
- Cracknell, A. P., Newcombe, S. K., Black, A. F., Kirby, N. E. 2001. The ABDMAP (Algal Bloom Detection, Monitoring and Prediction) concerted action. *International Journal of Remote Sensing*. 22(2–3), 205–247.
- Cruz, A.R.U., enero 2015. El florecimiento algal nocivo de enero de este año, el más impactante ocurrido en México. *TODOs @ CICESE*. Consultado el 03 de julio de 2017, de http://todos.cicese.mx/sitio/noticia.php?stat=Vin&n=617#.WVrIj4g1_IV
- Davidson, K., Gowen, R.J., Tett, P., Bresnan, E., Harrison, P.J., McKinney, A., Crooks, A.M. 2012. Harmful algal blooms: How strong is the evidence that nutrient ratios and forms influence their occurrence? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. (115), 399–413.

- De la Garza Aguilar, J. (1983). Intoxicación alimentaria por ingestión de mariscos contaminados. *Salud Pública de México*. (25), 145-150.
- Dierssen, H. M., Kudela, R. M., Ryan, J. P., Zimmerman, R. C. (2006). Red and black tides: Quantitative analysis of water-leaving for phytoplankton, colored dissolved organic matter, and suspended sediments. *Limnology and Oceanography*. 51(6), 2646–2659.
- Doney, S.C. 2006. Plankton in warmer world. *Nature*. (444), 659-696.
- Figueroa, R.I., Bravo, I., Ramilo, I., Pazos, Y., Moroño, A. 2008. New life-cycle stages of *Gymnodinium catenatum* (Dinophyceae): Laboratory and field observations. *Aquatic Microbial Ecology*. 52(1), 13–23.
- Flores-Trujillo, J.G., Helenes, J., Herguera, J.C., Orellana-Cepeda, E. 2009. Palynological record (1483-1994) of *Gymnodinium catenatum* in Pescadero Basin, southern Gulf of California, Mexico. *Marine Micropaleontology*. 73(1–2), 80–89.
- Franks, P. J. S. 1995. Sampling techniques and strategies for coastal Phytoplankton blooms. En: Hallegraeff, G. M., D. M. Anderson y A. D. Cembella (Eds.). IOC manual on harmful marine microalgae manual and guides. No. 33, UNESCO, Paris, pp. 25-43.
- Franks, P.J.S., Anderson, D.M. 1992. Alongshore transport of a toxic phytoplankton bloom in a buoyancy current: *Alexandrium tamarensis* in the Gulf of Maine. *Marine Biology*. (112), 153–64.
- Gárate-Lizárraga, I., Hernández-Orozco, M.L., Band-Schmidt, C.J., Casillas-Serrano, G. 2001. Red tides along the coasts of Baja California Sur, México (1984 to 2001). *CICIMAR, Océánides*. (16), 127–134.
- Gárate-Lizárraga, I., Okolodkov, Y.B., Cortés-Altamirano, R. 2016. Microalgas formadoras de florecimientos algales en el golfo de California. En: García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S. I., Olivos-Ortiz, A. y Núñez-Vázquez, E. J. (eds.). *Imprecolor del Noroeste, Ensenada, BC*. pp (130-145).
- García, C.A.E., García, V.M.T. 2008. Variability of chlorophyll-a from ocean color images in the La Plata continental shelf region. *Continental Shelf Research*. 28(13), 1568–1578.
- García, E (Ed). 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana), 6, Instituto de Geografía UNAM, México. pp. 90.
- García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S.I., Olivos-Ortiz, A., Núñez-Vázquez, E.J. (eds.) 2016. *Florecimientos Algales Nocivos en México*. Ensenada, México. CICESE. 438 p.
- Gaxiola-Castro, G., García-Córdova, J., Valdéz-Holguin, J.E., Botello-Ruvalcaba, M. 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.
- GEOHAB. 2006. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms. HABS in Eutrophic Systems. En: Glibert, M.P. (Ed.), IOC and SCOR, Paris and Baltimore. pp.74.
- Glibert, P.M., Burkholder, J.M. 2011. Harmful algal blooms and eutrophication: “strategies” for nutrient uptake and growth outside the Redfield comfort zone. *Chinese Journal of Oceanography and Limnology*. 29(4), 724-738.

- Gregg, W.W., Conkright, M.E., Ginoux, P., O'Reilly, J.E., Casey, N.W. 2003. Ocean primary production and climate: global decadal changes. *Geophysical Research Letters*. 30 (15), 1809.
- Hallegraeff, G.M. 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*. (32), 79–99.
- Hallegraeff, G.M., Blackburn, S.I., Doblin, M.A. Bolch, C.J.S. 2011. Global toxicology, ecophysiology and population relationships of the chain forming PST dinoflagellate *Gymnodinium catenatum*. *Harmful Algae Blooms*. (14), 130-143.
- Heisler, J., Gilbert, P.M., Burkholder, J.M., Anderson, D.M., Cochlan, W., Dennison, W.C., Dortch, A., Gobler, C.J., Heil, C.A., Humphries, E., Lewitus, A., Magnien, R., Marshall, H.G., Sellner, K., Stockwell, D.A., Stoecker, D.K., Suddleson, M. 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus. *Harmful Algae*. (8), 3–13.
- Hernández, E., Aguirre, N.J., Palacio, J.A. 2011. Relación entre la determinación del pigmento Clorofila a y el Biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdoba, Colombia). *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*. (60), 159–169.
- Hernández-Becerril, D.U., Bravo-Sierra, E., Ake-Castillo, J.A. 2007. Phytoplankton on the western coasts of Baja California in two different seasons in 1998. *Scientia Marina*. 71(4), 735–743.
- Herrera-Sepúlveda, A., Sierra-Beltrán, A., Hernández-Saavedra, N. 2008. Floraciones Algales Nocivas: Perspectivas y Estrategias Biotecnológicas Para Su Detección. *BioTecnología*. 12(1), 23–40.
- Herrera-Silveira, J. 1999. Las Mareas Rojas. *Biodiversitas, CONABIO, Mexico*. 5, pp. 711.
- Hou, X., Dong, Q., Xue, C., Wu, S. 2016. Seasonal and interannual variability of chlorophyll- a and associated physical synchronous variability in the western tropical Pacific. *Journal of Marine Systems*. (158), 59–71.
- Imai, I., Yamaguchi, M., Hori, Y., 2006. Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan. *Plankton & Benthos Research*. 1 (2), 71-84.
- Isern-Fontanet, J., García-Ladona, E., Font, J. 2003. Identification marine eddies from altimetric maps. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 20(5), 772–778.
- Jessup, D. A., Miller, M. A., Ryan, J. P., Nevins, H. M., Kerkering, H. A., Mekebri, A., Crane, D. B., Jhonson, T. A., Kudela, R. M. 2009. Mass Stranding of Marine Birds Caused by a Surfactant-Producing Red Tide. *PLoS ONE*. 4(2), e4550.
- Kahru, M., Greg B.M., Diaz, A., Miura, M. 2004. MODIS detects a devastating algal bloom in paracas bay, Peru. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*. (85), 465–472.
- Kim, H.G. 1998. Harmful algal blooms in Korean coastal waters focused on three fish killing dinoflagellates. En: H.G. Lee, S.G. Lee, y C.K. Lee (Eds.), *In harmful algal blooms in Korea and China*. Pusan, Korea: NFRDI.
- Kirk, J.T.O. (Ed). 1994. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems* (2da Ed). Cambridge University Press, Camberra, Australia. pp. 491.

- Lavín, M.F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M.L., Carrillo, L. 1997. Lagrangian Observations of the Circulation in the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*. 27(10), 2298–2305.
- Lavín, M.F., Organista, S. 1988. Surface heat flux in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. (93), 14033-14038.
- Lewitus, A.J., Horner, R.A., Caron, D.A., Garcia-Mendoza, E., Hickey, B.M., Hunter, M., Huppert, D.D., Kudela, R.M., Langlois, G.W., Largier, J.L., Lessard, E.J., RaLonde, R., Rensel, J.E.J., Strutton, P.G., Trainer, V.L., Tweddle, J.F. (2012). Harmful algal blooms along the North American west coast region: History, trends, causes, and impacts. *Harmful Algae*. (19), 133–159.
- Lluch-Cota, S. 2000. Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanol. Acta*. (23), 731-740.
- Lorenz, E.N. 1956. Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction. Technical Report Statistical Forecast Project, Report 1, Department of Meteorology, MIT 49.
- Lynne, K.R. 2001. SEASONAL CHLOROPHYLL VARIABILITY OFF BAJA CALIFORNIA FROM SEA WIFS SATELLITE IMAGERY. Master science thesis: California State University, Hayward. 100 pp.
- Machado, I., Barreiro, M., Calliari, D. 2013. Variability of chlorophyll-a in the Southwestern Atlantic from satellite images: Seasonal cycle and ENSO influences. *Continental Shelf Research*. (53), 102–109.
- Mancilla-Rojas, M.R. 2007. VALIDACIÓN DE UNA SIMULACIÓN DEL MODELO ROMS EN EL GOLFO DE MÉXICO Y MAR CARIBE. Tesis de maestría en ciencias: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 97 pp.
- Martínez, E., Antoine, D., D’Ortenzio, F., Gentili, B., 2009. Climate-driven basin-scale decadal oscillations of oceanic phytoplankton. *Science*. 326 (5957), 1253–1256.
- Mauri, E., Poulain, P. M., Južnič-Zonta, Ž. 2007. MODIS chlorophyll variability in the northern Adriatic Sea and relationship with forcing parameters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 112(3).
- Mazon, A., enero2015. Establecen veda sanitaria por la presencia de marea roja. *ROCKY POINT 360*. Consultado el 08 de septiembre de 2017 de <http://rockypoint360.com/establecen-veda-sanitaria-por-la-presencia-de-marea-roja/>.
- McClain, C.R., Christian, J.R., Signorini, S.R., Marlon R. L., Asanuma I. Turk, D., Dupouy-Douchement, C. 2002. Satellite ocean-color observations of the tropical Pacific Ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 49 (13–14), 2533–2560.
- Mee, L.D., Espinosa, M., Díaz, G. 1986. Paralytic shellfish poisoning with a *Gymnodinium catenatum* red tide on the Pacific coast of Mexico. *Marine Environmental Research*. (19), 77-92.
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P.C., Ebisuzaki, W., Jovic, D., Woollen, J., Rogers, E., Berbery, E.H., Ek, M.B., Fan, Y., Grumbine, R., Higgins, W., Li, H., Lin, Y., Manikin, G., Parrish, D., Shi, W. 2006. North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. (87), 343-360.
- Morel, A. 1974. Optical properties of pure water and pure seawater. En: Jerlov, N.G., Steemann-Nielsen, E. (eds.), *Optical aspects of oceanography*. Academic Press, London. pp. 1-24.

- Naik, P., D'sa, E.J. 2010. Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis of sea-surface temperature and chlorophyll in the eastern Bering Sea. *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions*. (7825), 1–8.
- Navarro, G., Ruiz, J. 2006. Spatial and temporal variability of phytoplankton in the Gulf of Cádiz through remote sensing images. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 53(11–13), 1241–1260.
- Núñez-Vázquez, E. J., Gárate-Lizárraga, I., Band-Schmidt, C.J., Cordero-Tapia, A., López-Cortés, D.J., Sandoval, F.E.H., Bustillos-Guzmán, J.J. 2011. Impact of Harmful Algal Blooms on wild and cultured animals in the Gulf of California. *Journal of Environmental Biology*. 32(4), 413–423.
- Ochoa, J.L., Lluch-Cota, S., Sierra-Beltrán, A.P. 1997a. Mortandad de mamíferos marinos en el alto golfo de California en febrero de 1997. Reporte Técnico final. Secretaría de Ecología Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAP)-Procuraduría Federal de Protección al Medio Ambiente (PROFEPA), México.
- Paerl, H.W. 1997. Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and groundwater as new nitrogen and other nutrient sources. *Limnology and Oceanography*. 42(5 part 2), 1154–1165.
- Park, J.Y., Kug, J.S., Park, J., Yeh, S.W., Jang, C.J. 2011. Variability of chlorophyll associated with El Niño Southern Oscillation and its possible biological feedback in the equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*. 116, C10001.
- Pérez-Arvizu, E.M., Aragon-Noriega, E.A., Espinosa-Carreón, T.L. 2009. Response of the shrimp population in the upper gulf of California to fluctuations in discharges of the Colorado River. *Crustaceana* 82(5), 615-625.
- Pérez-Morales, A., Aké-Castillo, J. A., Okolodkov, Y. B., Campos-Bautista, G. 2015. Florecimientos algales nocivos y eutrofización frente a la costa del Puerto de Veracruz, suroeste del golfo de México. *E-Bios*. 2(8), 21–33.
- Picado, A., Álvarez, I., Vaz, N., Varela, R., Gómez-Gesteira, M., Días, J. M. 2014. Assessment of chlorophyll variability along the northwestern coast of Iberian Peninsula. *Journal of Sea Research*. (93), 2–11.
- Pinto, L., Mateus, M., Silva, A. 2016. Modeling the transport pathways of harmful algal blooms in the Iberian coast. *Harmful Algae*. (53), 8–16.
- Quijano-Scheggia, S., Aké-Castillo J.A. 2016. Especies formadoras de florecimientos algales en México. En: Angulo L. (Ed.), *Florecimientos algales nocivos*. La Jornada ecológica, número 207, agosto del 2016. pp. (5-6).
- Radenac, M., Leger, F., Singh, A., Delcroix, T., 2012. Sea surface chlorophyll signature in the tropical Pacific during eastern and central pacific ENSO events. *Journal of Geophysical Research*. 117 (C4), C04007.
- Radiarta, I.N., Saitoh, S.I. 2008. Satellite-derived measurements of spatial and temporal chlorophyll-a variability in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 79(3), 400–408.

- Robinson, I.S. 2004. *Measuring the Oceans from Space: The Principle and Methods of Satellite Oceanography*. Springer – Praxis, Chichester, UK.
- Robinson, M.K. 1973. *Atlas of monthly mean sea subsurface in the Gulf of California, México*. San Diego Society of Natural History. *Memoir*. (5), 1-97.
- Rodríguez, G., enero 2015. Marea roja afecta almeja del golfo de Santa clara. LA CRONICA.COM., Consultado el 08 de septiembre de 2017 de <http://www.lacronica.com/Movil/EdicionEnLinea/Sonora/Notas/942669.html>
- Ruiz de la T.M.C. y Band-Schmidt, C.J., 2016. Ecología de especies formadoras de florecimientos algales nocivos. En: Angulo L. (Ed.), *Florecimientos algales nocivos*. La Jornada ecológica, número 207, agosto del 2016. pp. (3-4).
- Sathyendranath, S., Platt, T. 1988. The spectral irradiance field at the Surface and in the interior of The ocean: A model for applications in oceanography and remote sensing. *Journal of Geophysical Research*. (93), 9270-9280.
- Sellner, K.G., Doucette, G.J., Kirkpatrick, G.J. 2003. Harmful algal blooms: Causes, impacts and detection. *Journal of the Society for Industrial Microbiology and Biotechnology*. (30), 383–406.
- SEMARNAP-PROFEPA. 1997. *Mortandad de mamíferos marinos cuyos cadáveres arribaron a las costas de Sinaloa*. Informe Técnico. México.
- Sierra-Beltrán, A., Lluch-Cota, D., Lluch-Cota, S., Cortés-Altamirano, R., Cortés-Lara, M., Castillo-Chávez, M., Castillo, L., Pacas, L., Víquez, R., García-Hansen, I. 2004. Dinámica espacio-temporal de organismos precursores de marea roja en la costa Pacífica de América del Norte y Centroamérica. *Revista de Biología Tropical*. 52(1), 99-107.
- Sigee, D.C. 2005. *Freshwater Microbiology Biodiversity and Dynamic Interactions of Microorganisms in the Aquatic Environment*. John Wiley & Sons Ltd.
- Smayda, T.J. 1997. What is a bloom? A commentary. *Limnology and Oceanography*. (42), 1132-1136.
- Smayda, T.J. 2000. Ecological features of harmful algal blooms in coastal upwelling ecosystems. *South African Journal of Marine Science*. 22(1), 219–253.
- Srokosz, M.A., Quartly, G.D. 2013. The madagascar bloom: A serendipitous study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 118(1), 14–25.
- Streets, T.H. 1878. The discolored waters of the Gulf of California. *American Naturalist*. 12(2), 85-90.
- Sverdrup, H.U. 1941. The Gulf of California: Preliminary discussion on the cruise of the E. W. Scripps in February and March 1939. *Proceedings of the Sixth Pacific Science Congress, held at Berkeley, Stanford, and San Francisco, July 24 to August 12, 1939*, (3) 161-166.
- Valdéz-Holguín, J.E., Lara-Lara J.R. 1987. Primary productivity in the Gulf of California: Effects of El Niño 1982–1983 event. *Ciencias Marinas*. 13(2), 34–50.
- Venegas, R.M., Strub, P.T., Beier, E., Letelier, R., Thomas, A.C., Cowies, T., Cabrera, C. 2008. Satellite-derived variability in chlorophyll, wind stress, sea surface height, and temperature in the northern California current system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 113(3), 1–18.

- Wilson, C., Adamec, D. 2001. Correlations between surface chlorophyll and sea surface height in the tropical Pacific during the 1997–1999 El Niño-Southern Oscillation event. *Journal of Geophysical Research*. 106(C12), 31175.
- Yoder, J.A., Kennelly, M.A. 2003. Seasonal and ENSO variability in global ocean phytoplankton chlorophyll derived from 4 years of SeaWiFS measurements. *Global Biogeochemical Cycles*. 17(4), n/a-n/a.
- Zeitzschel, B., 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology*. (3), 201–207.

Anexo 1

Características de las imágenes satelitales de chl-*a* y temperatura del CMEMS.

chl-<i>a</i>	
OBSERVACIÓN MODELOS	observación por satélite
SENSOR	SeaWiFS, MODIS-Aqua, MERIS, VIIRS
ALGORITMO UTILIZADO	OC4Me
TIPO de PRODUCTO	multi anual
NIVEL de PROCESAMIENTO	L4
ASIMILACIÓN de DATOS	indefinido
VARIABLES	concentración de masa de clorofila en agua de mar (CHL)
RESOLUCIÓN ESPACIAL	4km x 4km
COBERTURA VERTICAL	Superficie
SISTEMA de COORDENADAS de REFERENCIA	WGS 84 / Plate Carree (EPSG 32662)
CARACTERÍSTICA TIPO	Cuadrícula
COBERTURA TEMPORAL	desde 1997-09-04T00:00:00Z a 2016-08-31T00:00:00Z
RESOLUCIÓN TEMPORAL	media diaria
FRECUENCIA de ACTUALIZACIÓN	anual
UNIDAD DE PRODUCCIÓN	OC-ACRI-NICE-FR

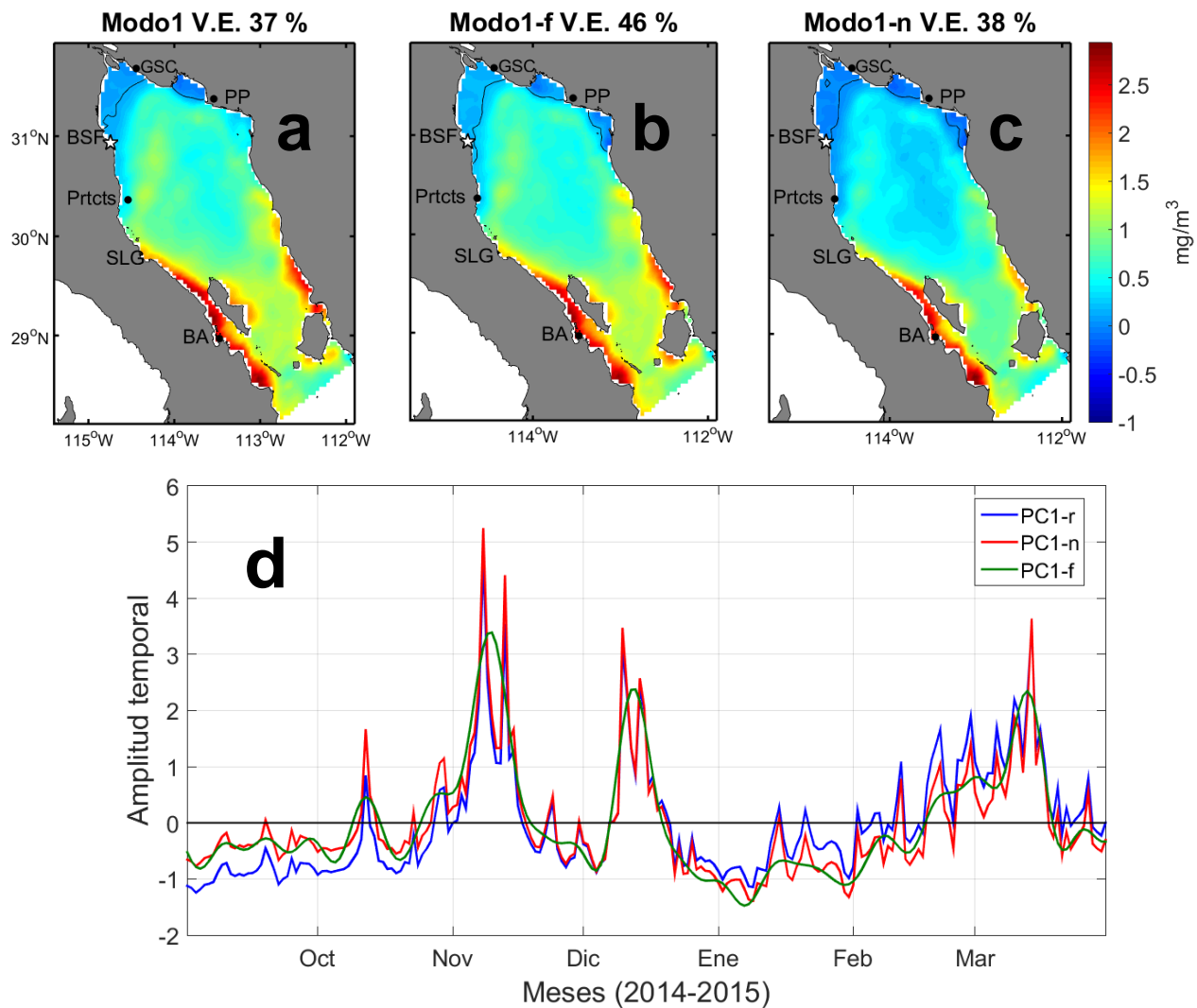
SST	
OBSERVACIÓN MODELOS	observación por satélite
SENSOR	TMI, SEVIRI, GOES-East, AVHRR entre otros
TIPO de PRODUCTO	casi en tiempo real
NIVEL de PROCESAMIENTO	L4
ASIMILACIÓN de DATOS	indefinido
VARIABLES	temperatura superficial del Mar (SST, por sus siglas en inglés)
RESOLUCIÓN ESPACIAL	4km x 4km
COBERTURA ESPACIAL	0.05° x 0.05°
COBERTURA VERTICAL	Superficie
SISTEMA de COORDENADAS de REFERENCIA	WGS 84 (EPSG 4326)
CARACTERÍSTICA TIPO	Cuadrícula
COBERTURA TEMPORAL	desde 2007-01-01T00:00:00Z al presente
RESOLUCIÓN TEMPORAL	media diaria
FRECUENCIA de ACTUALIZACIÓN	diaria
UNIDAD DE PRODUCCIÓN	SST-METOFFICE-XTER-UK

chl-*a*: http://marine.copernicus.eu/web/69-interactive-catalogue.php?option=com_csw&view=details&product_id=OCEANCOLOUR_GLO_CHL_L4_REP_OBSERVATIONS_009_082.

SST: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001

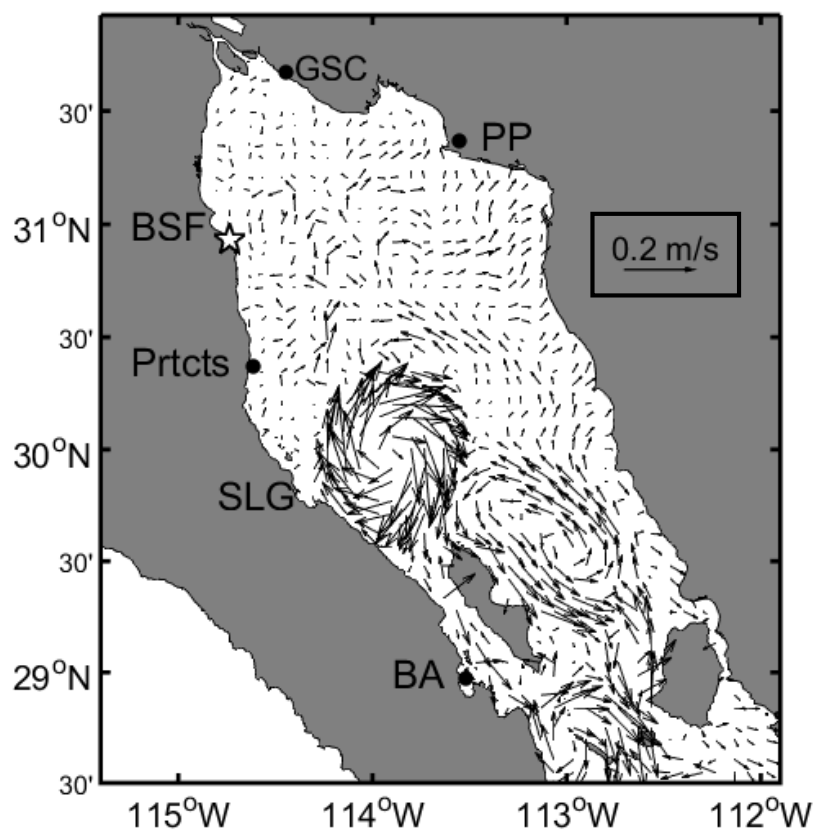
Anexo 2

Modos resultantes para las pruebas de la serie GI-r **(a)**, serie GI-n **(b)** y la serie GI-f **(c)** con sus respectivos CPs **(d)**.



Anexo 3

Velocidades geostróficas obtenidas a partir de la aplicación del modelo de circulación oceánica ROMS utilizado en Bermúdez Romero (2017).



Anexo 4

Evidencia del transporte de sur a norte al paso del huracán Odile por el golfo de California. En las imágenes, se observa cómo se forma una pluma de chl-*a* que viaja desde Bahía Concepción hasta la zona de las grandes islas.

