



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**



**“Regionalización dinámica de la Bahía de
Todos Santos con base en imágenes
satelitales”**

TESIS

Que para obtener el título de
OCEANOLOGO

Presenta:

Martha Elena Betancourt Aguirre

Ensenada, B.C., Junio 2017

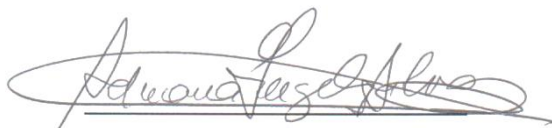
“Regionalización dinámica de la Bahía de Todos Santos con base en imágenes satelitales”

TESIS

QUE PRESENTA:

MARTHA ELENA BETANCOURT AGUIRRE

APROBADA POR:



Dra. Adriana G. González Silvera
PRESIDENTE DEL JURADO.



Dr. Eduardo Santamaría del Ángel
SINODAL



M.C. Jesús Aguilar Maldonado
SINODAL

DEDICATORIA

*A mis abuelos Martha, Ignacio, Salvador y Carmen,
aunque los primeros tres no estén aquí,
siempre me enseñaron muchísimo,
gracias por enseñarme a perseguir mis sueños.*

AGRADECIMIENTOS

A mis papas por siempre estar conmigo, con un apoyo incondicional, por motivarme cada día a ser una mejor persona y profesionista. ¡Lo logre papás, ya soy una oceanóloga!

A mi hermano, por todas las veces que nos hemos apoyado, soy súper afortunada de tenerte como mi familia. Gracias por todas las risas.

Un agradecimiento enorme a Adriana González, por haber estado en cada momento de la tesis, apoyándome con tanta dedicación y por todas las ganas con las que siempre me ayudaste.

A mis sinodales, Eduardo y Jesús. Eduardo gracias por la paciencia y más que nada por tu tiempo, me has enseñado muchísimo. Jesús Aguilar, muchísimas gracias por ayudarme amigo. Sin ti mis imágenes no hubieran salido tan bonitas, prometo ya no molestarte tanto.

A mis amigos que siempre me han apoyado, por todos los momentos que hemos pasado, sin ustedes no sería la persona que soy ahorita. Pancho gracias por todas tus enseñanzas, durante ésta etapa de mi vida.

A la Facultad de Ciencias Marinas, por ser mi segunda casa durante estos añitos. En especial a los maestros que tanto nos han enseñado y al personal administrativo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido.

Gracias a todos ustedes por el apoyo para este trabajo de investigación.

RESUMEN

Las imágenes de satélite de color del océano o de la reflectancia marina son una herramienta indispensable para caracterizar y monitorear ecosistemas marinos. Tienen una alta resolución temporal y son muy útiles en los procesos de regionalización. La regionalización consiste en organizar áreas o regiones con características homogéneas o similares dentro de una misma escala. Es fundamental la caracterización de una determinada región para tener un mejor entendimiento de su dinámica oceanográfica y del manejo de los recursos de un área específica. El objetivo de este trabajo fue identificar regiones dentro de la Bahía de Todos Santos (Ensenada, Baja California) con un patrón de variabilidad similar, de forma a dar elementos para entender su relación con procesos físicos y antropogénicos. Las imágenes se obtuvieron del sensor MODIS-Aqua (NASA) a una resolución espacial de 250 a 500 m (Bandas 1, 3 y 4) del año 2002 al 2015. Con base en un año promedio se calcularon anomalías espaciales estandarizadas y se identificaron seis regiones con base en la turbidez del agua. Se observó una región de influencia oceánica y una central que se caracterizaron por reflectancias bajas (baja turbidez), mientras que las regiones costeras, presentaron valores más altos (mayor turbidez). Por otro lado, se pudo detectar que el área cubierta por cada región presenta una variabilidad estacional e interanual importante que puede ser relacionada a los procesos de circulación superficial dentro de la bahía y/o a el ingreso de aguas continentales. Series de tiempo de reflectancia y de concentración de clorofila *a* de algunos sitios de cada región permitieron observar la variabilidad estacional e interanual dentro de cada región y su relación con procesos interanuales que afectan el Océano Pacífico Norte. Estos resultados dan elementos para entender la variabilidad oceanográfica dentro de la Bahía de Todos Santos.

Palabras clave: MODIS, Regionalización marina, Bahía de Todos Santos, Imágenes RGB

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tablas.....	vii
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Área de estudio.....	7
2. Objetivo.....	11
3. Hipótesis.....	11
4. Metodología.....	12
4.1 Construcción del RGB.....	13
4.2 Análisis estadístico.....	15
4.3 Identificación de Regiones y análisis de su variabilidad.....	16
5. Resultados.....	19
6. Discusiones.....	35
7. Conclusiones.....	44
Bibliografía.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la Bahía de Todos Santos.....	9
Figura 2. Proceso repetitivo para obtener las (3) imágenes finales por cada mes, para utilizar en la regionalización.	14
Figura 3. Ejemplo de histograma de frecuencias obtenido del promedio de todos los meses de enero del periodo de estudio (2002 a 2015).....	17
Figura 4. Anomalías espaciales estandarizadas de cada mes promedio. a) Enero promedio b) Febrero promedio c) Marzo promedio d) Abril promedio e) Mayo promedio f) Junio promedio g) Julio promedio h) Agosto promedio i) Septiembre promedio j) Octubre promedio k) Noviembre promedio l) Diciembre promedio.....	21
Figura 5. Anomalías espaciales estandarizadas del mes de enero.....	24
Figura 6. Anomalías espaciales estandarizadas del mes de mayo.....	25
Figura 7. Anomalías espaciales estandarizadas del mes de agosto.....	26
Figura 8. Series de tiempo de los valores de brillo de los tres transectos seleccionados (Fig. 1). Transecto 1: a) Enero b) Mayo c) Agosto, Transecto 2: d) Enero e) Mayo f) Agosto, Transecto 3: g) Enero h) Mayo i) Agosto.....	28
Figura 9.1. Series de tiempo de anomalías de clorofila: 9a) Estación 1, 9b) Estación 2, 9c) Estación 3.....	32
Figura 9.2. Series de tiempo de anomalías de clorofila: 9d) Estación 4, 9e) Estación 5, 9f) Estación 6.....	33
Figura 10. a) Índice PDO, b) Índice de anomalías de precipitación.....	34

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Sensores históricos y actuales del color del océano con cobertura global.....	3
Tabla II. . Bandas de MODIS y principales áreas de aplicación, recuadros rojos son las bandas utilizadas para las imágenes.....	4
Tabla III. Ejemplo de los cuatro archivos MODIS utilizados por pase al día.....	12
Tabla IV. Clasificación de las regiones respecto a su estandarización Z, donde la columna “intervalo” indica los intervalos de desviación estándar.....	18

1. Introducción

Las imágenes de satélites son una herramienta que da información continua a alta resolución espacial y temporal, con una cobertura global, y se considera en la actualidad como indispensable para monitorear y caracterizar ecosistemas marinos (Wilson *et al.*, 2010).

El procesamiento digital de imágenes de satélite equivale a realizar operaciones sobre un conjunto de datos con el fin de extraer algún tipo de información de ella para alguna aplicación en particular.

Es por ello que el uso de sensores remotos, es una alternativa para realizar estudios con mayor cobertura espacio-temporal. Permite un panorama a meso y macro escala en el estudio de la dinámica del océano, evita problemas de espacialidad entre datos y costos elevados, lo cual da un nuevo horizonte hacia el estudio multi-temporal de diferentes escenarios (Doraxan *et al.*, 2009).

Existen varios tipos de sensores remotos, los cuales presentan diferentes características, las cuales determinan su aplicación en estudios oceanográficos. Estas características pueden ser definidas por la resolución del sensor, la cual se define en: (a) resolución espacial (m a km), la cual consiste en el tamaño de pixel en la imagen, (b) resolución espectral (nm a μm), que se refiere a las longitudes de onda que utiliza el sensor para medir la reflectancia marina y (c) resolución temporal (horas a días), la cual se refiere a la frecuencia de obtención de datos de un mismo punto. En general, una mayor resolución espacial conlleva una menor resolución temporal y espectral (Chivieco, 2000 en: Mejía, 2003).

El monitoreo de los océanos por medio de sensores remotos se ha realizado en gran parte con base en sensores que utilizan una resolución espectral que comprende las longitudes de onda entre los 400 y 1100 nm, esto es el visible y el infrarrojo del espectro electromagnético. En especial las longitudes de onda en el visible son las que han permitido la detección remota de la concentración de la clorofila-a del fitoplancton (Chla) desde el lanzamiento del sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS/NASA), en el año de 1978 (IOCCG, 2009).

A este le siguieron otros (Tabla I) de los cuales en la actualidad se encuentran generando información el MODIS o MODerate Resolution Image Spectroradiometer (NASA), cuyos datos han sido utilizados en diferentes estudios de la dinámica oceánica, biogeoquímica y cambio climático global (McClain *et al.*, 2002; Gregg *et al.*, 2003; Behrenfeld *et al.*, 2005, entre otros).

Los sensores MODIS se lanzaron inicialmente a bordo del satélite TERRA (año 2000) y posteriormente (Noviembre del 2002) a bordo del satélite Aqua, ambos desarrollados por la agencia espacial NASA. Presentan una resolución temporal alta, ya que pueden contar con hasta 2 pases por día sobre el mismo punto. MODIS-Aqua cuenta con 32 bandas o longitudes de onda de detección (Tabla I), las cuales se usan para diferentes finalidades o para la observación de diferentes parámetros.

Tabla I. Sensores históricos y actuales del color del océano con cobertura global.

Sensor	Agencia	Años de operación	Resolución espacial (m)	# Bandas
CZCS	NASA (USA)	1978-1986	825	6
MERIS	ESA (Europa)	2002-2012	300/1200	15
SeaWiFS	NASA (USA)	1997-2011	1100	8
MODIS-Aqua	NASA (USA)	2002-Presente	250/500/1000	36
MODIS-Terra	NASA (USA)	1999-Presente	250/500/1000	36
VIIRS	NOAA(USA)	2011-Presente	375/750	22

Tabla II. Bandas de MODIS y principales áreas de aplicación, recuadros rojos son las bandas utilizadas para las imágenes de anomalías espaciales estandarizadas.

Uso principal	Banda	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Tamaño de Pixel (m)	
Limites o frontera: Tierra/Nubes/Aerosoles	1	620-670	645.5	250	
	2	841-876	856.5	250	
	Propiedades: Tierra/Nubes/Aerosoles	3	459-479	465.6	500
		4	545-565	553.6	500
	5	1230-1250	1241.6	500	
	6	1628-1652	1629.1	500	
	7	2105-2155	2114.1	500	
Color del océano	8	405-420	411.3	500	
Fitoplancton	9	438-448	442.0	1000	
Biogeoquímica	10	483-493	486.9	1000	
	11	526-536	529.6	1000	
	12	546-556	546.8	1000	

Así mismo, cada banda puede tener una diferente resolución espacial. Por ejemplo, en las bandas 1 y 2 esta es de 250m, y las bandas 3 a 7 de 500m (denominadas “sharpening bands”), las cuales son utilizadas para la delimitación y para definir propiedades de nubes, tierra y aerosoles. Las bandas 8 a 16 tienen una resolución espacial de 1000m, y son las que se utilizan para poder determinar la concentración de clorofila *a* (Chl_a) (IOCCG, 2009). Por último las bandas 17 a 36 (1km), se enfocan en evaluar propiedades atmosféricas. (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>).

Entretanto, las bandas 1 a 7 también se han usado para aplicaciones marinas, cuando su procesamiento se realiza con base a la construcción de imágenes de “Falso Color” o RGB (de bandas Red, Green, Blue), lo que ha permitido la detección de plumas de turbidez, manchas de petróleo y florecimientos fitoplanctónicos. Una imagen RGB es aquella que se basa en la combinación de tres bandas en el visible (Tabla II), una que representa el azul (Banda 3, 500m), otra el verde (Banda 4, 500m) y la última en el rojo (Banda 1, 250m) (Karhu *et al.*, 2004). Como cada banda del RGB presenta una resolución espacial diferente es necesario realizar un procedimiento de interpolación para poder construir el RGB a la menor resolución espacial posible (250m), lo que promueve una mejor definición de los procesos oceanográficos en aguas costeras y bahías.

1.1 Antecedentes

La división de los océanos en zonas con características similares se ha propuesto con diferentes objetivos, entre ellos como medio de facilitar la modelación de la producción primaria por el fitoplancton, el estudio de procesos ecológicos y biogeoquímicos, y como forma de definir zonas de alto potencial pesquero (IOCCG, 2009).

Los procesos de regionalización pueden ser llevados a cabo con base en datos de campo (*in situ*) o con base en imágenes de satélite (Callejas-Jiménez *et al.*, 2012).

Estudios de regionalización con base en imágenes de satélite también se han utilizado para establecer criterios que permiten evaluar dispersión de aguas contaminadas por turbidez y desechos urbanos, lo que a su vez se han asociado a la evaluación de zonas de cultivos de peces y moluscos (Chamberlain *et al.*, 2001; Pitta *et al.*, 2005).

Callejas-Jiménez *et al.* (2012) realizaron una regionalización dinámica con base a las irradiancias normalizadas del MODIS-Aqua, considerando la variabilidad estacional del Golfo de México (temporadas de huracanes y no huracanes). El golfo se dividió en dos grandes provincias, oceánicas y costeras. En la provincia oceánica se encontraron tres regiones con condiciones oligotróficas. La provincia costera se dividió en dos sub-provincias (parte norte y sur del golfo de México) en las cuales se localizaron ocho regiones. La mayoría de las regiones se asoció con patrones generales de circulación y/o influencia de descargas del río. La aproximación presentada en el trabajo permitió la regionalización dinámica del

Golfo de México, ya que mostró diferencias en la cobertura de las regiones en las diferentes épocas del año consideradas.

Más recientemente se realizó una regionalización en el Golfo de Urabá, Colombia, donde se evaluaron las variaciones en la cobertura espacial de la pluma del Río Atrato, por medio de los sensores MODIS-Aqua y MODIS-Terra. Se pudo relacionar directamente la minería de oro y platino con la variabilidad interanual del área total y el área de la zona media de la pluma turbia en época seca, en contraste con la época de lluvia donde no hubo ninguna relación (Mejía, 2013).

Las aproximaciones matemáticas utilizadas en los trabajos arriba mencionados se han basado en análisis estadísticos multivariados donde su variante han sido los datos de entrada, como radiancias normalizadas en Callejas-Jiménez *et al.* (2012), o por medio de un análisis de grupos por variables (cluster) en Mejía (2013).

En el presente trabajo, se propone describir la variabilidad espacio-temporal dentro de la Bahía Todos Santos, por medio de anomalías espaciales estandarizadas de brillo en imágenes de falso color y la generación de regiones o bioregiones con base en imágenes del sensor MODIS-Aqua. El estudio se realiza con una serie de datos del año 2000 al 2016, desarrollando una técnica específica para la zona. La finalidad es dar elementos para apoyar al conocimiento y manejo de la dinámica general de la bahía con un carácter estacional e interanual.

1.2 Área de estudio

La Bahía Todos Santos (BTS) se localiza en la costa noroeste de la península de Baja California (Fig. 1), entre los 31° 40' y los 31° 56' de latitud norte, y 116° 36' a 116° 50' de longitud oeste. Se limita al norte con Punta San Miguel, al sur con Punta Banda, al oeste con las Islas de Todos Santos y al este con la ciudad de Ensenada. Cuenta con un área aproximada de 116 km², de los cuales un 80 % del fondo está a menos de 50 m de profundidad y el resto forma parte del angosto cañón submarino de Todos Santos y Punta Banda (Castro y Hammann, 1989).

La BTS es una bahía semicerrada que tiene contacto con el océano Pacífico adyacente mediante dos entradas o conexiones a mar abierto que están separadas por las Isla de Todos Santos. La circulación dentro de la Bahía se ve muy influenciada por el flujo del Sistema de la Corriente de California (SCC), por lo cual, cambios ligeros en el SCC provocan grandes cambios dentro de la BTS (Mateos *et al.*, 2009).

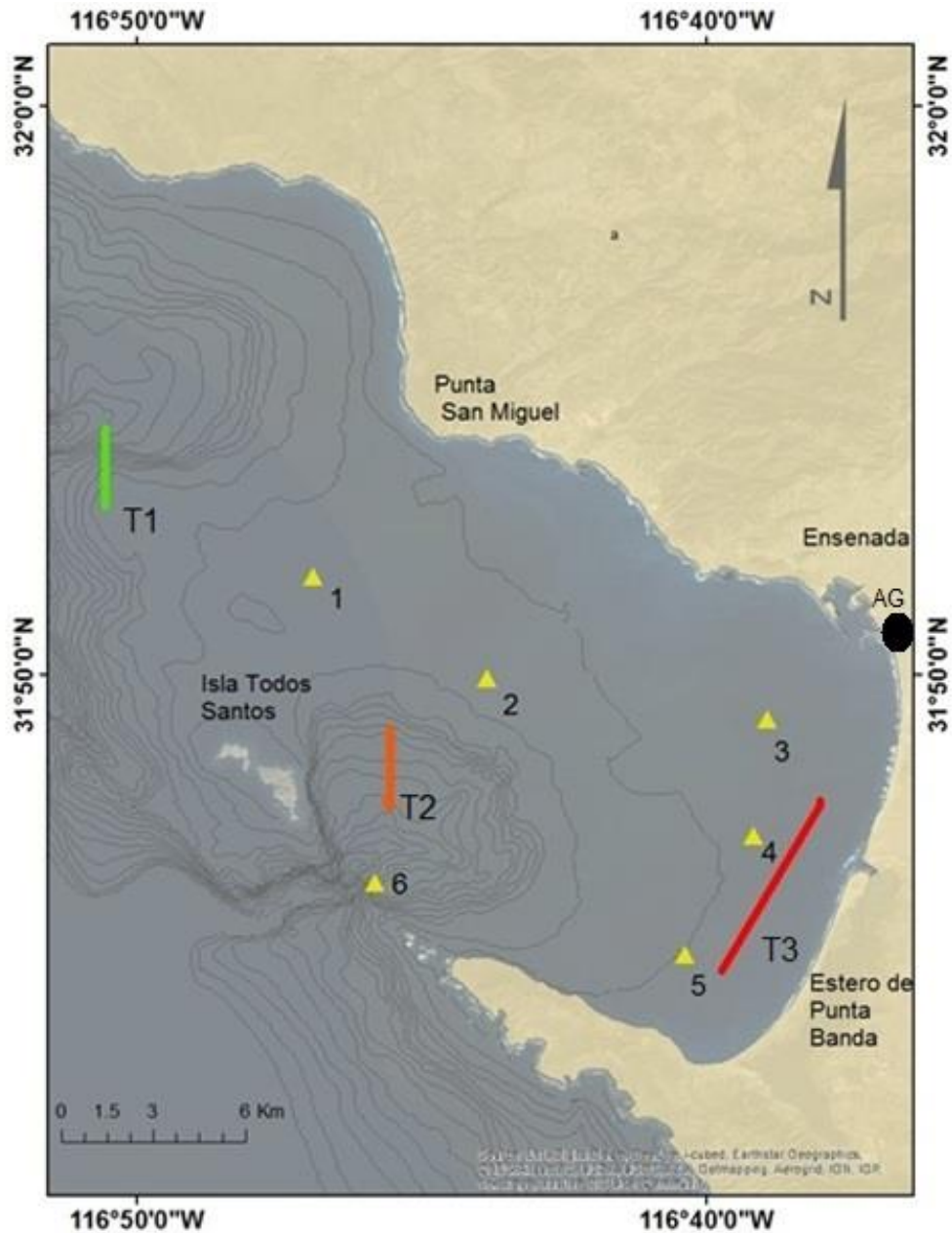


Figura 1. Mapa de la Bahía de Todos Santos. Los contornos muestran la batimetría del área de estudio. Las líneas indican transectos de los cuales se obtuvieron series de tiempo. (a)Transecto 1: zona oceánica, (b) Transecto 2: zona del canal, (c) Transecto 3: zona Estero de Punta Banda. Los triángulos amarillos son las estaciones de donde se extrajeron las series de tiempo de Chla. Punto negro (AG) es la desembocadura del arroyo del Gallo.

La Bahía Todos Santos depende principalmente del comercio marítimo y el turismo. Actividades como cultivo de peces y moluscos se llevan a cabo dentro de la bahía. La dinámica física de la BTS responde a los patrones de circulación por viento, marea y la interacción con la Corriente de California (Larrañaga-Fu, 2013) la cual fluye a lo largo de costa cercana a la superficie transportando agua subártica fría con dirección sur

Por otra parte, se ha observado (Larrañaga-Fú, 2013) que las corrientes superficiales de la Corriente de California muestran un flujo predominante hacia el interior de la bahía, con corrientes intensas hacia el oeste y más débiles hacia el este. Así mismo, los máximos valores de temperatura superficial dentro de la BTS se encuentran en la región este, en zonas cercanas al Puerto de Ensenada. Además, el autor observó que existe un flujo que entra por la región NW de la bahía, con dirección al SE, el cual cambia hacia el NE y propicia la formación de un remolino ciclónico en la región NE de la bahía. Esto lleva a que las regiones este y noreste se hayan considerado como las regiones donde el agua tiene un mayor tiempo de permanencia.

La variabilidad estacional de los procesos de circulación superficial han sido evidenciados en varios trabajos, donde se observan corrientes de mayor intensidad en primavera y verano, mientras que lo contrario sucede en invierno y otoño (Cervantes-Audelo, 2013; Larrañaga-Fú, 2013). Así mismo, la bahía se ve afectada por eventos más extraordinarios como vientos Santana (Sosa-Ávalos *et al.*, 2004; Castro *et al.*, 2006) que también llevan a cambios significativos en los patrones de circulación superficial (Cervantes-Audelo, 2013).

2. Objetivos

- Identificar regiones dentro de la Bahía de Todos Santos de acuerdo a la variabilidad espacial y temporal del brillo en imágenes RGB.
- Identificar la variabilidad estacional e interanual de cada región identificada.
- Evaluar la variabilidad espacial y temporal de la concentración de Chla satelital dentro de cada región.

3. Hipótesis

La Bahía de Todos Santos puede dividirse en regiones que presentan un comportamiento similar con respecto a la variabilidad espacial y temporal del brillo en imágenes RGB, derivado de imágenes MODIS interpoladas a 250 m.

4. Metodología

Se seleccionaron las imágenes disponibles del sensor MODIS-Aqua (NASA) del periodo entre noviembre de 2002 a diciembre de 2015. Se seleccionaron aquellas imágenes sin nubes o de baja nubosidad y sin ningún tipo de reflejo o señal de ruido. Estas se descargaron de la página de la NASA (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>) de acuerdo a las longitudes y latitudes que comprenden a la Bahía Todos Santos (32° y 31.7° N y -116.91° y -116.5°W), en cuatro archivos diferentes de las bandas nativas (suponiendo un pase por día) (Tabla III).

Tabla III. Ejemplo de los cuatro archivos MODIS utilizados por pase al día.

Nombre Corto	Nombre Largo	Canales de Bandas	Lat-lon
MYD021KM	MODIS/AQUA Calibrado Radiancia calibrada 5-min Nivel 1B Banda 1Km	1-36 @1 km	5km
MYD02HKM	MODIS/AQUA Calibrado Radiancia calibrada 5-min Nivel 1B Banda 500m	1-7 @ 500m	1km
MYD02QKM	MODIS/AQUA Calibrado Radiancia calibrada 5-min Nivel 1B Banda 250m	1-2 @250 m	1km
MYD03	MODIS/AQUA Geocaliazación Campo 5-min Nivel 1A Banda 1Km	ninguna	1km

4.1 Construcción del RGB

Se basó en un algoritmo de corrección atmosférica simplificado de Jaques Descloitres empleado en el proyecto de la NASA, MODIS Rapid Response Project (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov> en Karhu, *et al.*, 2005). Este algoritmo utiliza datos de radiancia por arriba de la atmosfera del nivel 1B, para calcular una primera aproximación a la reflectancia de la superficie eliminando los efectos de la geometría del sensor, del Sol, del camino molecular de la reflectancia y absorción por O₂, O₃ y H₂O. Se crearon los códigos o scripts de corrección por pase para el programa C++.

Las imágenes satelitales consisten en un orden de pixeles de filas y columnas. Cada pixel tiene un numero digital (DN), que representa la intensidad de la señal reflejada recibida o emitida por un área determinada de la superficie de la tierra. Como observado anteriormente, el tamaño del área que le pertenece a cada pixel se denomina resolución espacial. Todos los pixeles tienen que medir lo mismo en la malla definida (por ejemplo 250x250m). Una imagen consiste de muchas capas o bandas, cada banda es creada por el sensor, el cual colecta energía en longitudes de onda específica del espectro electromagnético (ITC-ILWIS, 2001).

Los valores digitales de cada imagen de satélite van de 0 (negro) hasta 255 (blanco), lo cual indica la reflectancia de los objetos que se encuentran sobre una determinada superficie. De esta manera, mediante la combinación espectral y las reflectancias corregidas de las tres bandas individuales 1 (620-670µm), 3 (459-479 µm) y la 4 (545-565µm), se realizaron las imágenes del falso color en el sistema

RGB. La combinación de píxeles con sus valores del DN de las tres intensidades R, G y B definen en conjunto el color final dependiendo de la contribución específica de cada uno (ITC-ILWIS, 2001).

Debido a que las bandas no se encuentran a la misma resolución espacial (archivo de geolocalización a 1km, bandas 3 y 4 a 500m y bandas 1 y 20 a 250m), se interpolaron las bandas de 1km (geolocalización), generando imágenes a 500m (bandas 3 y 4) se repitió el proceso de interpolación a 250m (Karhu *et al.*, 2004). Esto se realizó por medio del comando `wam_rgb_modis` y se obtuvo una imagen RGB por cada pase.

Después de realizar este proceso para todas las imágenes por cada año, se escogieron las 3 mejores imágenes con menor cobertura de nubes por cada mes de todos los años de muestreo, sumando un total de 504 imágenes (Fig. 2). La selección del número de imágenes se realiza tomando en cuenta el número promedio de imágenes disponibles por mes.

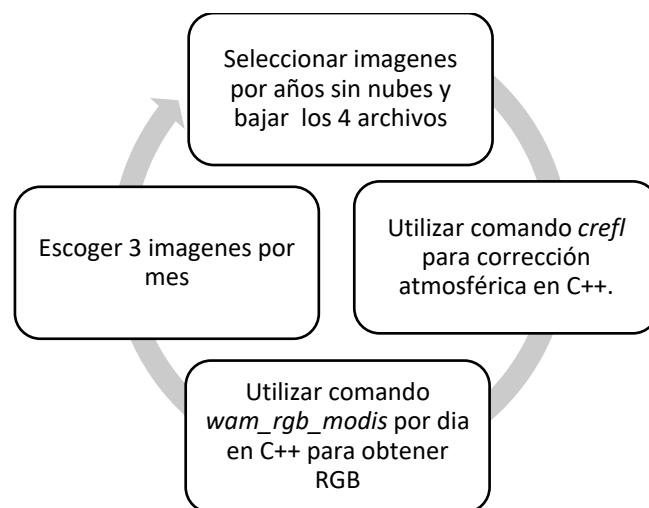


Figura 2. Proceso para obtener las tres imágenes finales por cada mes, para utilizar en la regionalización.

4.2 Análisis estadístico

Para realizar los mapas y obtener las regiones, la información de las imágenes se almacenó en archivos con formato HDF (Hierarchical Data Format), se eliminaron los píxeles correspondientes a la tierra y se consideraron únicamente los valores de reflectancia del cuerpo de agua.

Para poder evaluar variables en términos de su variabilidad en relación al promedio, es necesario normalizar los valores originales a la misma escala. Este procedimiento se realiza mediante transformaciones que deben respetar la integridad de la distribución original de los datos. Una de las transformaciones que cumple con estos requerimientos es la transformación Z (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011). En este trabajo, a los datos de brillo de la imagen RGB se les aplica una transformación Z para poder evaluar los patrones de variabilidad espacial por imagen y así identificar aquellas áreas con un patrón de variabilidad similar.

A esta transformación se le denominó como anomalía espacial estandarizada y se aplicó a cada píxel en la imagen. La anomalía tiene unidades de desviación estándar y se define por la siguiente ecuación.

$$Z = \frac{(x_i - \bar{x})}{SD_x} \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde: Z = Anomalía estandarizada del brillo
 x_i = Cada uno de los datos de brillo
 \bar{x} = Promedio aritmético espacial de los valores de brillo de toda la imagen
 SD_x = Desviación estándar de brillo de toda la imagen

La transformación indica el número de las desviaciones estándar en el cual la mayoría de los datos promedios se presentan. Si el valor es negativo, indica que el valor de la variable es esa región es debajo del promedio. Cuando el valor es positivo, indica que el valor se encuentra por encima del promedio (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011). Con base en la estandarización Z, se clasifico el nivel de brillo de cada pixel y se definieron intervalos de variabilidad los cuales se usaron para delimitar las regiones dentro de la BTS. Aquí es importante considerar que el nivel de brillo de una imagen RGB puede ser usado como indicador de turbidez del agua (Kahru *et al.*, 2004).

4.3 Identificación de Regiones y análisis de su variabilidad

A partir de los histogramas de frecuencia de los datos de las anomalías (ó Z) por imagen se pudieron definir intervalos que definen diferentes regiones en el área de estudio. Un ejemplo de la distribución de frecuencias se puede observar en la figura 2. Se observaron los histogramas de cada mes, para escoger los intervalos de manera que se delimiten las regiones correctamente y se ubiquen de mejor manera el mayor número de datos posibles. Se observó que el mayor número de datos se encuentra en los intervalos bajos, medio bajos y medio altos, los cuales se denominaron como Regiones 2, 3 y 4. Esto indica que estas regiones son las que tienen una mayor representatividad en términos de cobertura espacial dentro de la BTS.

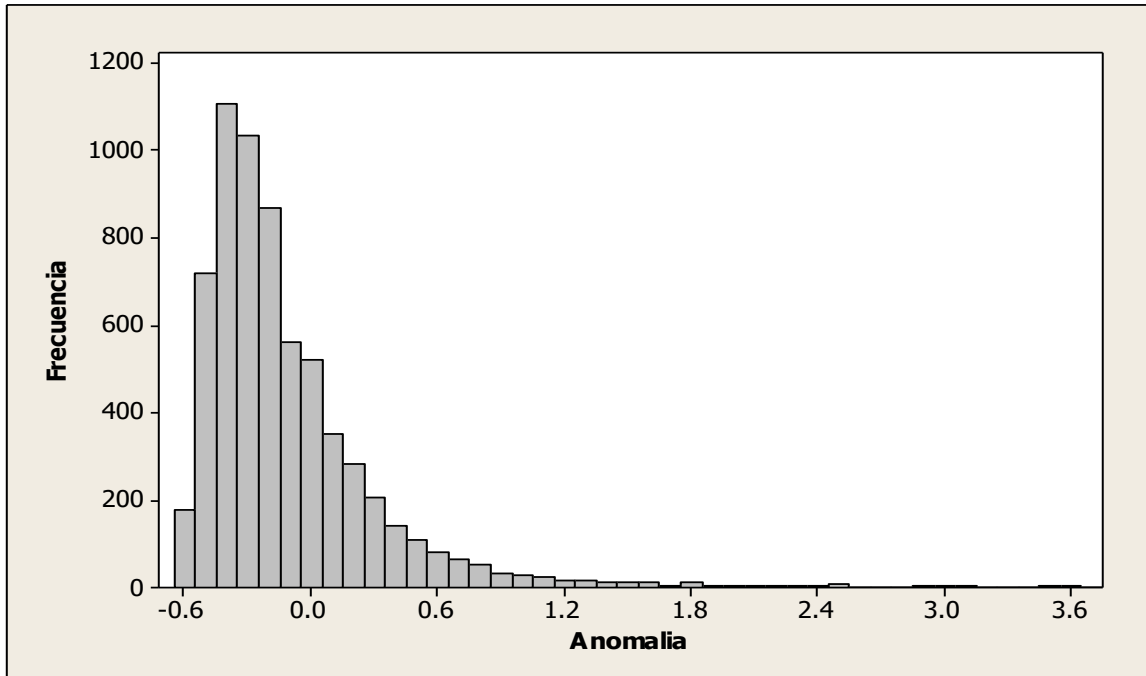


Figura 3. Ejemplo de histograma de frecuencias obtenido del promedio de todos los meses de enero del periodo de estudio (2002 a 2015).

Una vez definidas las regiones, se seleccionaron tres transectos y seis estaciones distribuidas dentro de la BTS y de forma a representar diferentes regiones (Fig. 1). A partir de los tres transectos, se graficaron series de tiempo de los promedios de los valores del brillo, para los meses de enero, mayo y agosto (Fig. 1). Estos meses fueron seleccionados para observar la variabilidad invierno-verano (enero y agosto). El mes de mayo fue escogido ya que en los meses de abril a junio, los vientos del noroeste contribuyen al fortalecimiento de la Corriente de California y a la intensificación de surgencias a lo largo de la costa (Lynn *et al.*, 2003), de tal manera que se escogió el mes de mayo para analizar un mes donde se intensifican las surgencias.

Se determinó una climatología anual de las imágenes RGB de todo el periodo de estudio y se determinaron las anomalías espaciales estandarizadas para observar los cambios en la distribución de las regiones durante cada mes.

Con la finalidad de evaluar la variabilidad en la cobertura espacial de las regiones de forma interanual, se analizaron los mismos meses mencionados anteriormente (enero, mayo y agosto) tomando todos los años considerados en este estudio (2002 al 2015).

Finalmente, se obtuvieron imágenes mensuales de la concentración de Chla del MODIS/Aqua a 1 km de resolución espacial, las cuales se procesaron usando el programa SeaDAS 5.1. Se obtuvieron las series de tiempo de Chla de las seis estaciones mencionadas anteriormente, y se calcularon las anomalías determinadas a partir de la diferencia entre el valor por mes y el promedio de todo el periodo de estudio.

Se graficó el índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) obtenido de la página de la NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>) y las anomalías anuales del índice de precipitación de la región obtenido de la página (<http://sdcwa.org/annual-rainfall-lindbergh-field>) para relacionar con los datos de Chla.

5 Resultados

La evaluación de los intervalos de variación en las anomalías estandarizadas de niveles de brillo permitió definir seis regiones, indicadas en la Tabla IV.

Tabla IV. Clasificación de las regiones respecto a su estandarización Z, donde la columna "Intervalo" indica los intervalos de desviaciones estándar.

	Intervalo	Región
Muy Bajo	-3.7 a -1	1
Bajo	-1 a -0.5	2
Medio Bajo	-0.5 a 0	3
Medio Alto	0 a 1	4
Alto	1 a 3	5
Muy Alto	3 a 50	6

5.1 Climatología

La primera evaluación de la distribución espacial de las regiones y de su variabilidad temporal se realizó con base en el año promedio o climatología anual. Las regiones observadas presentan una importante variabilidad en términos de su cobertura espacial en el transcurso del año (Fig. 4). En especial se debe observar que la Región 1 no se detecta. La región 2 tiene su mayor extensión en los meses de abril y agosto, va desde la región oceánica hacia la región central de la bahía. A partir de septiembre (Fig. 4i) la región 2 disminuye notablemente y en diciembre (Fig. 4l) ya no se observó. La Región 3 se observa principalmente en la zona central de la bahía, especialmente en los meses de septiembre a diciembre (Fig. 4i-4l). La región 4 es costera y observada especialmente hacia el este de la bahía, en los meses de enero a abril perdura la región aproximadamente del mismo tamaño; en junio se observa un incremento en la región 4. Las regiones 3 y 4 son las de mayor cobertura espacial. De manera general las regiones de mayor variabilidad (Regiones 5 y 6) son aquellas ubicadas más cercanas a la costa. En especial la región 5 extiende su cobertura en los meses de enero y febrero en la zona del Puerto de Ensenada. Por otro lado, durante mayo y julio su extensión aumenta hacia el norte de la bahía (Punta San Miguel y zona oceánica adyacente).

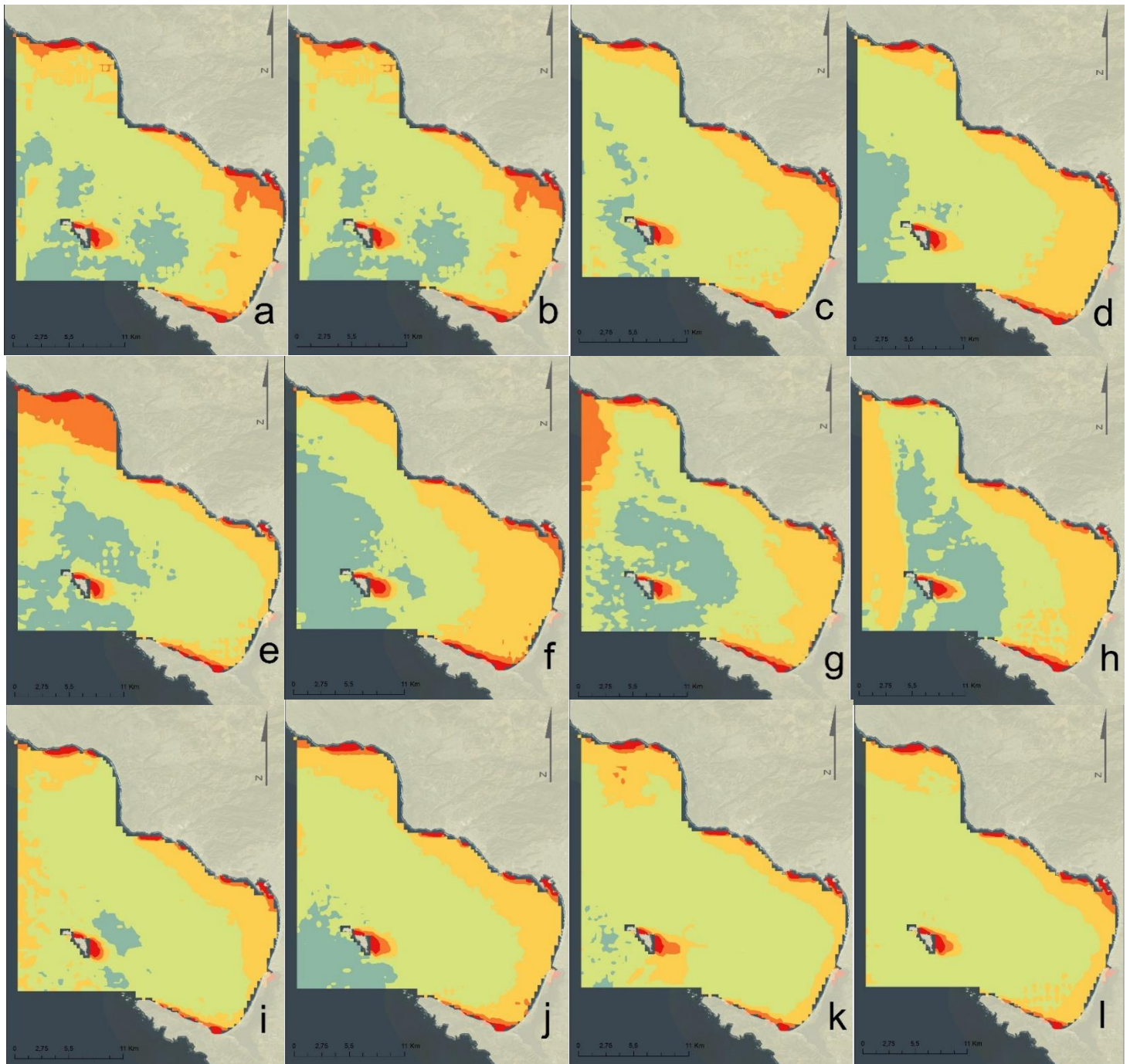


Figura 4. Anomalías espaciales estandarizadas de cada mes promedio. a) Enero promedio b) Febrero promedio c) Marzo promedio d) Abril promedio e) Mayo promedio f) Junio promedio g) Julio promedio h) Agosto promedio i) Septiembre promedio j) Octubre promedio k) Noviembre promedio l) Diciembre promedio.

5.2 Interanualidad

Los procesos interanuales son de gran importancia en los océanos, y pueden alterar significativamente procesos de menor escala temporal como la estacionalidad (Durazo, 2009). Para poder describir y observar de mejor manera este tipo de influencia se analizó la variabilidad en la distribución de las regiones durante el periodo de estudio para los meses de enero, mayo y agosto.

En el mes de enero (Fig. 5), los tres primeros años (2003 a 2005) se caracterizan por un dominio de las regiones 3 y 4, a pesar de que en el 2005 la región 5 aumenta su área de cobertura en la zona del puerto de Ensenada. A partir del 2006 se observa que la región 2 predomina en la zona oceánica, y en el 2007 esta se observa al sur de la Isla Todos Santos. La región 2 se observa en los años 2008, 2010 y 2011 al sur de la zona oceánica. Sin embargo, en el año 2015 se observa frente al estero de Punta Banda y en ese año se observa una región 6 de mayor tamaño frente a San Miguel. El año 2014 es el año donde la región 2 presente un comportamiento inusual, abarcando la mayoría de la región oceánica. Las región 3 es la que predomina a lo largo de los años y la región 1 no se observó en ningún año.

Durante el mes de mayo (Fig. 6) se observó en el año 2003 la región 1 en una zona espacialmente pequeña al sur de la Isla de Todos Santos. En los siguientes años dicha región no se volvió a presentar. La región 2 se presentó en la mayoría de los años, siendo en el 2003 con mayor tamaño, mientras en el año 2007 se presentó hacia el norte de la bahía. La región 3 fue la de mayor extensión en la

mayoría de los años sin embargo, en el año 2003 se vio reducida espacialmente. La extensión de la región 4 fue muy pequeña, siempre muy cercana a la costa, a pesar de que en el 2009 se observó hacia la zona oceánica norte. En el año 2012 se extendió la cobertura de la región 5 y 6 al norte de San Miguel, mientras que la 4 fue muy delgada y cercana a la costa. En el 2009 y 2015, la región se vio en una zona más central, a comparación de los otros años que se presentó en la zona oceánica. La región 6 se observó poco, en el 2006 fue mayor así como en el 2009 y en el 2012.

En las imágenes del mes de agosto (Fig. 7) se observó gran variabilidad a comparación de los meses de enero y mayo. Las regiones que tuvieron mayor extensión fueron las regiones 3 y 4. La región que tuvo la menor extensión fue la región 1, sin embargo, fue en el mes donde más se observó esta región. El año 2002 fue el único cuando se observó la región 1 al norte de la bahía, mientras que en los años 2003-2005 se presentó hacia el sur. En el año 2010 dicha región se presentó en mayor extensión al sur de la Isla de Todos Santos y en el año 2012 en una muy pequeña zona alrededor de Punta Banda. La región 2 se presentó en todos los años, siendo aquellos donde la región fue más grande el 2003, 2004, 2005 y 2012. La predominante región 3 se observó en todos los años, en menor extensión en el año 2003. La región 4 de igual manera se observó en todos los años, regularmente costera, en el año 2002 se presentó hacia el sur. La región 5 y 6 tuvieron menor extensión que las demás regiones. En el año 2012 se observó la región 5, hacia el lado oceánico, en ningún otro mes se había observado la región 5 en esa localización.

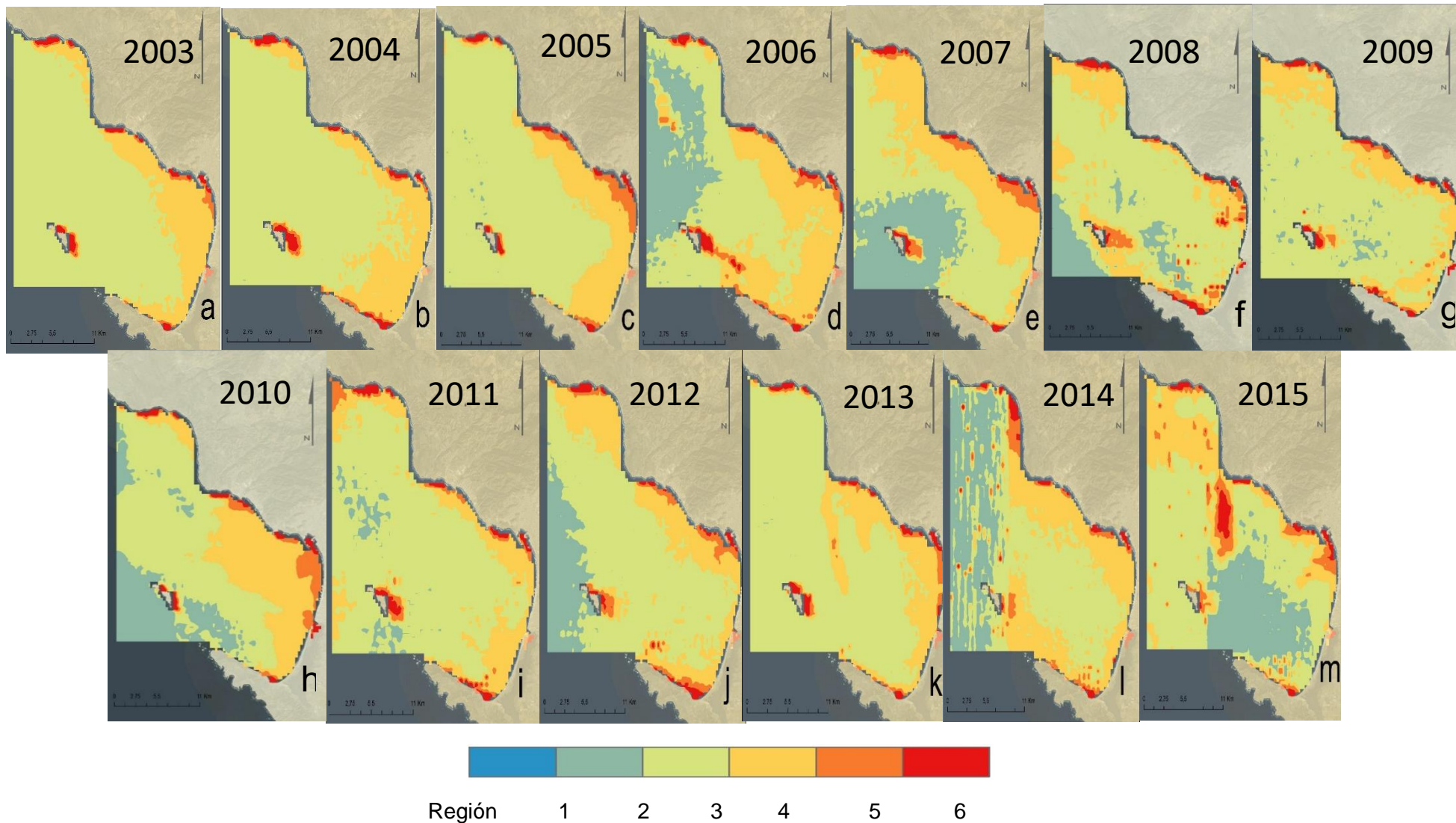


Figura 5. Anomalías espaciales estandarizadas del mes de enero.

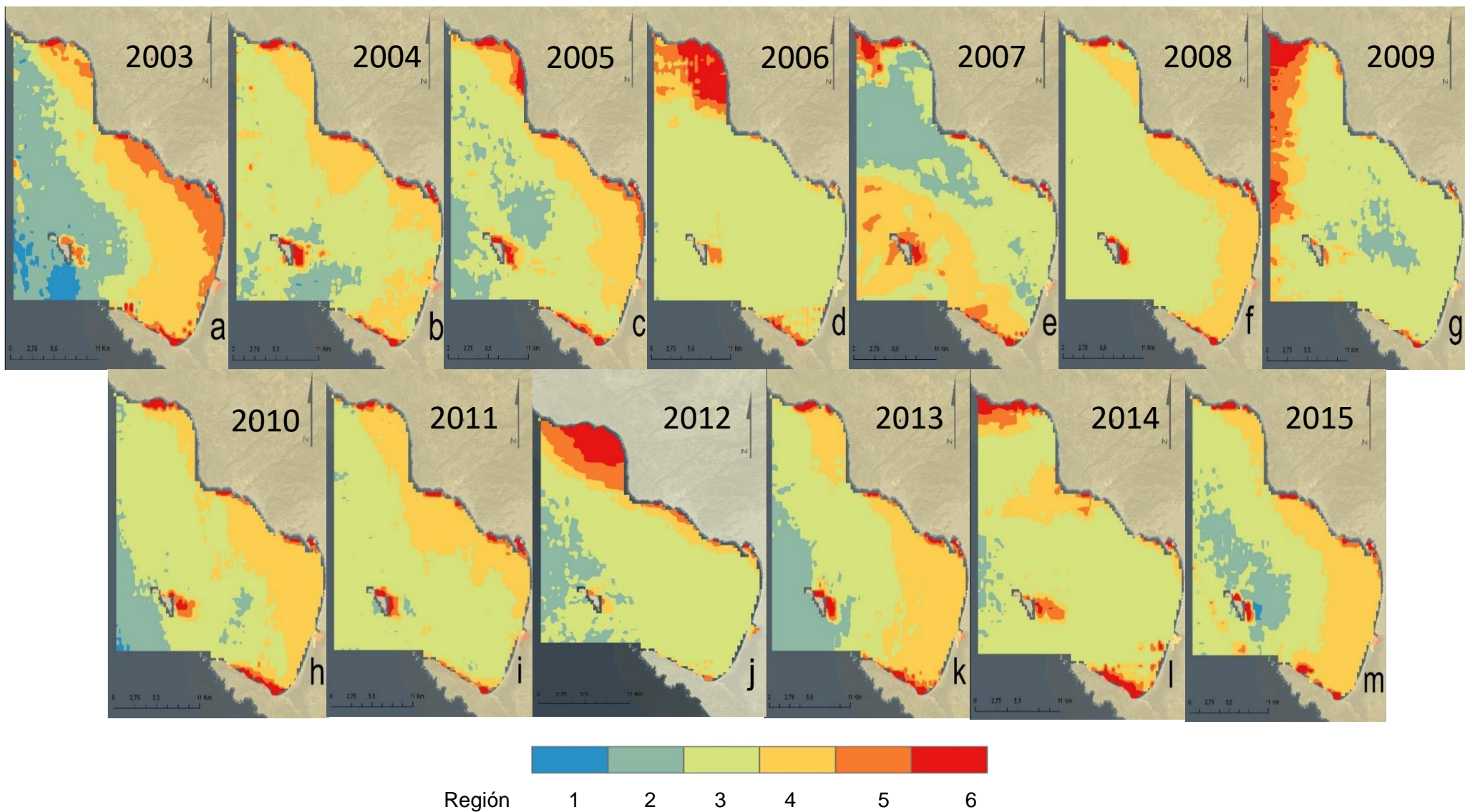
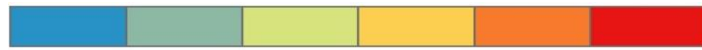
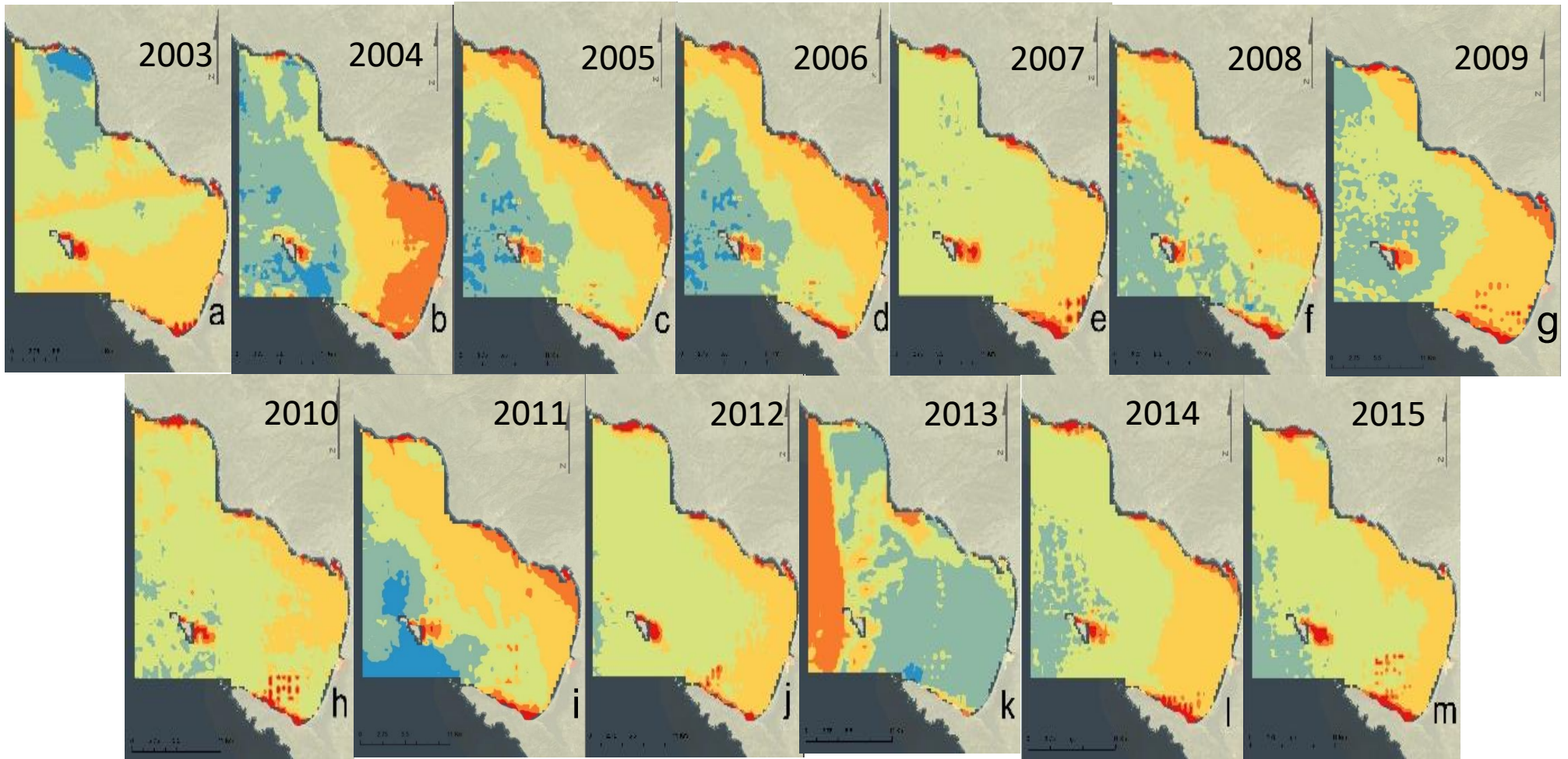


Figura 6. Anomalías espaciales estandarizadas del mes de mayo.



Región 1 2 3 4 5 6

Figura 7. Anomalías espaciales estandarizadas del mes de agosto.

5.3 Series de tiempo

En la figura 8 se presentan las series de tiempo de los valores promedios de brillo de los tres transectos delimitados dentro del área de estudio (Fig. 1), para los tres meses representativos de invierno (enero), primavera (mayo) y verano (agosto).

En el transecto 1, ubicado en la zona de contacto con el océano adyacente, los valores de brillo más elevados se observaron en diferentes años dependiendo del mes. En enero los máximos valores de brillo se observaron entre el 2005 y 2007, en mayo se observó un máximo en el 2008, mientras en agosto el máximo ocurrió en el 2012.

El transecto 2, ubicado en la zona del canal, presentó una mayor variabilidad que el transecto 1, a pesar de que en enero los máximos se observaron en los mismos años que en el transecto 1 (2005 a 2007). Por otro lado, en mayo la variabilidad fue mayor, con máximos en el 2002, 2006 y 2008, donde a partir de ahí los valores se mantuvieron muy constantes. Finalmente agosto se caracterizó por una oscilación donde los máximos se observaron en el año 2003 y 2013.

El transecto 3, ubicado en la zona del Estero de Punta Banda, presentó un patrón de variabilidad muy similar al observado en el transecto 2 tanto en enero como en mayo. Por otro lado en agosto este fue similar al transecto 2 pero con menor variabilidad, a pesar de que los máximos se observaron en años similares (2003 y 2013).

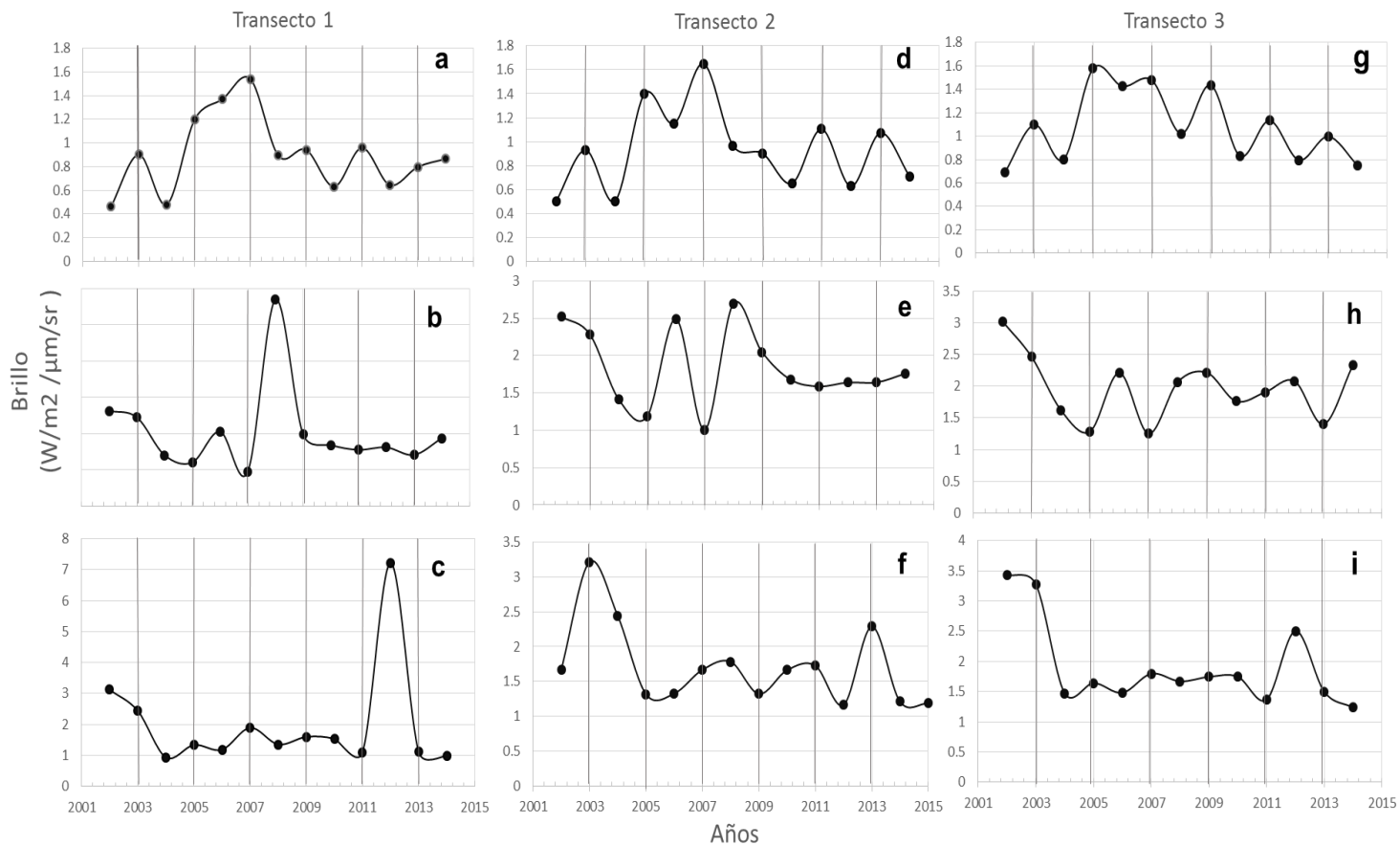


Figura 8. Series de tiempo de los valores de brillo de los tres transectos seleccionados (Fig. 1). Transecto 1: a) Enero b) Mayo c) Agosto, Transecto 2: d) Enero e) Mayo f) Agosto, Transecto 3: g) Enero h) Mayo i) Agosto

5.4 Series de tiempo de clorofila, PDO e Índice de precipitación

Se analizaron las series de tiempo de las anomalías de Chla tomadas de las seis estaciones mostradas en la figura 1. La estación 1 fue la estación más oceánica dentro de la Bahía Todos Santos (Fig. 9-1a) y mostró una gran variabilidad con anomalías más bajas al inicio de la serie de tiempo (2002 a 2005). A partir del 2006 se observa un aumento en las anomalías positivas con el máximo observado en el 2009. A partir del año 2013 las anomalías decrecen mucho y esto se mantiene hasta el 2016.

La estación 2 se localiza en la parte central hacia el este de la Bahía Todos Santos (Fig. 9-1b). Nuevamente la variabilidad se ve destacada por anomalías más bajas entre el 2002 y 2004, pero el máximo se observa en el 2005, a partir de cuándo los valores máximos de las anomalías van decreciendo gradualmente hasta un mínimo en el 2015.

En la estación 3 (Fig. 9-1c), cercana al puerto de Ensenada, la variabilidad fue mayor pero entre el 2005 y 2006 se observa que las anomalías positivas se extienden por más tiempo (en el 2005 se observaron valores positivos en las anomalías de Chla, mientras que en el año 2006 se observaron anomalía positivas en invierno). Finalmente, las anomalías negativas en el periodo 2014 a 2016 se ven más acentuadas que en las estaciones anteriores.

La estación 4 se encuentra frente al estero de Punta Banda (Fig. 9-1d). Su variabilidad fue muy similar a la de la estación 3 pero con tendencia a valores más bajos. El año que presentó los valores de mayor Chla fue el 2008.

En la estación 5, frente al estero de Punta Banda al sur de la estación 4 (Fig. 9-1e), las anomalías de Chla fueron similares a la estación 4 pero el máximo se observó en el 2006 y 2013, a partir de cuándo se observa el decremento también observado en las otras estaciones.

La estación 6 está ubicada entre la Isla de Todos Santos y Punta Banda, en la zona del canal (Fig. 9-1f). Presenta una mayor variabilidad similar a la observada en la estación 1, con máximos más acentuados entre el 2005 y 2009, a partir de cuándo los máximos de clorofila empiezan a disminuir gradualmente hasta el mínimo observado entre el 2015 y 2016.

Se analizó la serie de tiempo de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) como indicador de los procesos interanuales que afectan el Océano Pacífico Norte (Fig. 10a). Valores positivos están asociados a fases de anomalías de temperatura por arriba del promedio (etapas cálida) mientras que valores negativos se asocian a fases de anomalías de temperatura menores del promedio, que indican etapas frías (Mantua, 2017). De manera general, durante el periodo estudiado se han presentado eventos con valores positivos al principio de la serie de tiempo (2002 a 2005), seguido por dos periodos negativos, uno entre el 2008 y 2009 y otro de mayor duración entre el 2010 y 2013. A partir de entonces los valores del PDO pasan a ser positivos alcanzando los máximos de toda la serie de tiempo en el 2014 y 2015. Esto coincide con la presencia del fenómeno "The Blob" en el Pacífico Norte durante el 2014, y de El Niño durante el 2016 (Amaya, 2016; Becker, 2016).

El índice de precipitación se utilizó para evaluar la posible relación entre la descarga de aguas dulces y los valores de turbidez en la Bahía de Todos Santos. De manera general los valores son negativos en la mayor parte de la serie de tiempo, exceptuando el 2005, cuando el índice de precipitación llegó a 3.

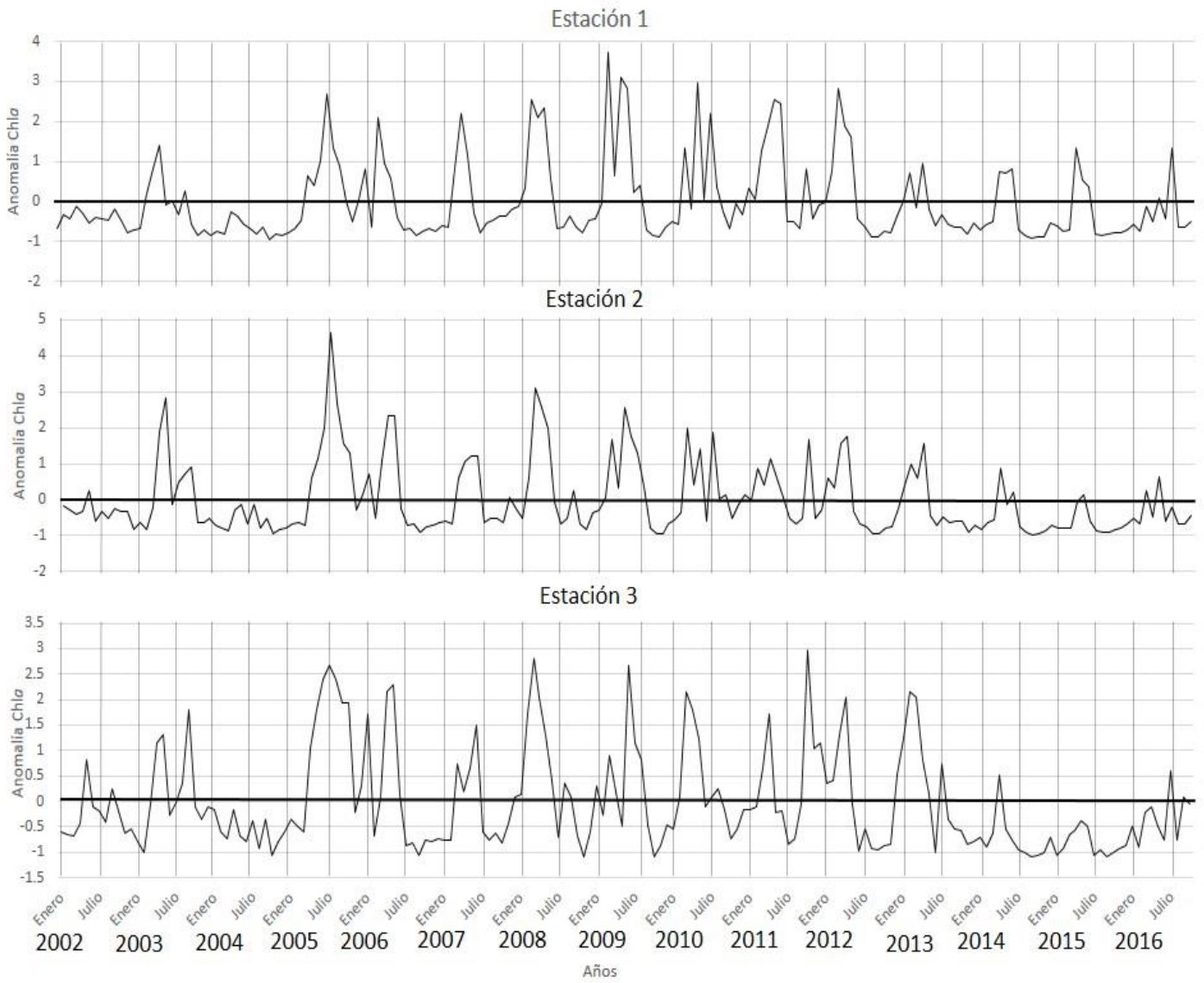


Figura 9.1. Series de tiempo de anomalías de clorofila: 9a) Estación 1, 9b) Estación 2, 9c) Estación 3

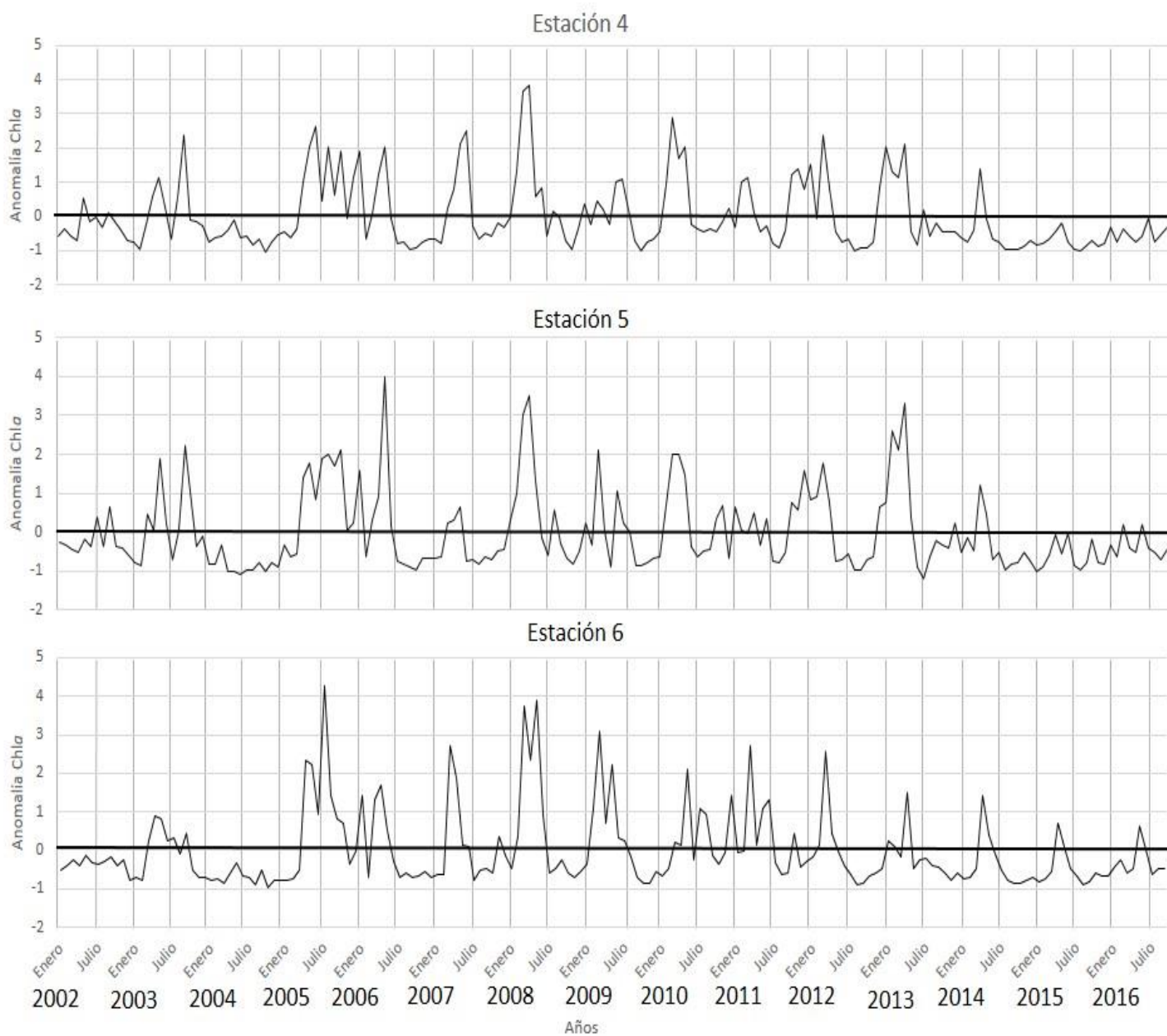


Figura 9.2. Series de tiempo de anomalías de clorofila: 9d) Estación 4, 9e) Estación 5, 9f) Estación 6

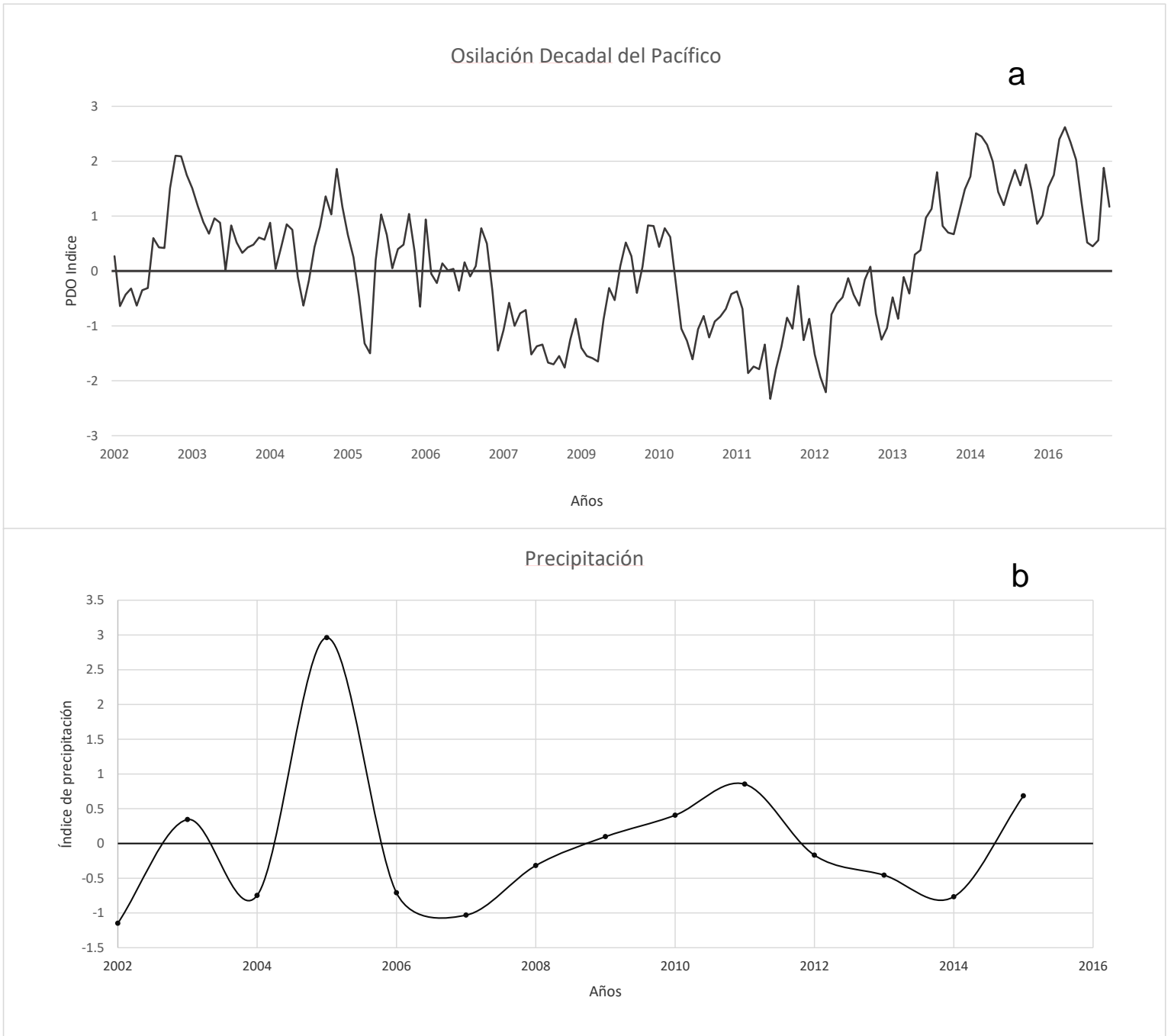


Figura 10. a) Índice PDO, b) Índice de anomalías de precipitación.

6 Discusión

La información derivada de imágenes de satélite a una alta resolución espacial y temporal es una herramienta para el monitoreo y caracterización del ecosistema marino y sus recursos biológicos. En especial, datos de satélite son cruciales para definir el tiempo de acción de procesos como surgencias, florecimientos algales nocivos, variabilidad estacional e interanual (IOCCG, 2009). La Bahía de Todos Santos es una zona altamente impactada por el desarrollo urbano, la presencia de una zona portuaria, y zonas de acuacultura de mariscos y atunes. Todo esto ha llevado a que se reporte frecuentemente la contaminación por coliformes fecales de la zona costera (Portillo-López y Lizárraga-Partida, 1997), niveles muy altos de nutrientes inorgánicos en zonas alrededor del Puerto de Ensenada, El Sauzal y Punta Banda (Segovia-Zavala et al., 1988) e incluso la formación de floraciones algales nocivas (Peña-Manjarez et al., 2009).

La identificación de subregiones dentro de una determinada área, las cuales cuenten con un patrón de variabilidad similar, también es un elemento importante para el manejo de los recursos biológicos a larga y pequeña escala. En este aspecto, los resultados de este trabajo permitieron determinar que dentro de la Bahía de Todos Santos, es posible observar la presencia de cinco regiones con diferentes patrones de variabilidad temporal. En especial tres de ellas tuvieron la mayor cobertura espacial de manera general, y se pueden definir como una región oceánica (Región 2), una región central (Región 3) y una región costera (Región 4) (Fig. 4), las cuales cuentan con cierta variabilidad espacial tanto estacional como interanualmente.

6.1 Climatología o Variabilidad Estacional

La variabilidad estacional de las regiones identificadas se ve evidenciada en el análisis de la climatología (Fig. 4), lo que concuerda con observaciones de otros trabajos que mencionan que los procesos de circulación superficial dentro de la bahía tienen una importante variabilidad al comparar invierno y verano (Larrañaga-Fu, 2013, Irvin-Audelo, 2013). En especial, la circulación superficial de la bahía se ve muy afectada por la circulación en el océano adyacente, siendo uno de los factores de mayor importancia la presencia de surgencias las cuales se intensifican en los meses de primavera a verano y eventualmente estas aguas frías y ricas en nutrientes son transportadas hacia el interior de la BTS (Mancilla-Peraza y Martínez, 1991). Justamente entre los meses de Abril a Agosto nuestros datos (Fig. 4d a h) indican una mayor influencia de la región 2 hacia el interior de la bahía, en especial en Agosto, que puede ser relacionada a estos eventos.

La región 4, de características costeras, también presenta una mayor cobertura espacial durante los primeros meses del año (enero a agosto) a pesar de algunas excepciones como en mayo (Fig. 4e) que, junto con noviembre (Fig. 4k) y diciembre (Fig. 4l), son los meses con menor cobertura. Esta variabilidad puede estar relacionada a la falta de aporte terrígeno continental (no lluvias) y/o poca resuspensión del sedimento de fondo en estas zonas más someras. De hecho, las corrientes superficiales son más débiles cerca de la costa, en especial en los

meses de otoño e invierno (Irvin-Audelo, 2013), lo que puede explicar el patrón observado en nuestros datos.

Por otro lado, las regiones costeras 5 y 6 presentaron una cobertura espacial muy reducida. En especial la región 5 se observó relacionada a la zona del Puerto de Ensenada la cual dentro del análisis climatológico presentó su mayor cobertura en enero y febrero (Fig. 4 a y b). Estos meses están caracterizados en promedio por una mayor precipitación (Ruiz-Corral et al., 2006), lo que aunado a que en esta zona se encuentra la desembocadura del arroyo El Gallo (Fig.1), puede promover el incremento en la turbidez y la expansión de esta región en este periodo. Además, las zonas del Puerto de Ensenada y la Playa Municipal son donde se encuentra la mayor cantidad de descargas domésticas, industriales y escorrentías agrícolas hacia la Bahía de Todos Santos (Gutiérrez-Galindo et al., 2010). Por otro lado, un estudio de simulaciones numéricas de corrientes superficiales para el mes de febrero (Mateos et al., 2009) indicó la presencia de un remolino ciclónico frente al Puerto de Ensenada que podría explicar la formación de una pequeña pluma que se extiende con dirección sur.

Las regiones 5 y 6 también se observan frente a la Isla Todos Santos pero extendiéndose hacia el noreste, en coincidencia con la dirección predominante de las corrientes en esta zona (Larrañaga-Fu, 2013). De hecho, los cantiles de la Isla Todos Santos pueden considerarse como fuente principal de material sedimentario al sistema litoral (Cruz-Colín y Cupul-Magaña, 1997).

6.2 Interanualidad de las regiones

Los océanos presentan diferentes modos de variabilidad temporal, que se dan a diferentes escalas. El análisis climatológico permitió describir la variabilidad estacional de la BTS pero procesos interanuales también pueden afectar la zona costera, y por esta razón se evaluó la variabilidad de las regiones identificadas para los meses representativos de invierno (enero), primavera/surgencias (mayo) y verano (agosto) durante todo el periodo de estudio (2002 al 2015).

Durante enero (Fig. 5) se observa un patrón similar al observado en la climatología (Fig. 4a) pero donde la presencia de la región 2 (oceánica) fue observada en apenas algunos años y en general hacia el oeste de la Isla Todos Santos. Una excepción se observó en el 2007, cuando esta región presenta una intrusión a la BTS, y en el 2015 cuando se encontró ubicada al sur de la BTS entre la Isla y el estero de Punta Banda. Así mismo se observó una importante variabilidad de la región 4, con años donde su extensión estuvo similar a la climatología, pero otros donde su extensión fue mínima (2008 y 2009, 2011, 2012 y 2015). En especial en enero del 2010 se observa el crecimiento de la región 5 frente al Puerto de Ensenada, y frente a la boca del Estero de Punta Banda. Este periodo coincide con el estudio de Irvin-Audelo (2013) quien reporta resultados de trayectoria de partículas donde para invierno observan una mayor cantidad de partículas en una franja costera al noreste de la bahía, desde el Puerto de Ensenada hasta la boca del Estero de Punta Banda, en coincidencia con la observación de este trabajo.

En este aspecto es importante mencionar que este fue el único año donde se observó la región 5 frente a la boca del estero de Punta Banda. Entretanto, la extensión de esta región frente al Puerto puede variar bastante. Para tratar de inferir los efectos de descargas asociadas a lluvia sobre la zona costera (especialmente relacionado al arroyo El Gallo), se observó la variabilidad anual de las anomalías de precipitación (Fig. 10a) pero tanto el año 2010 como el 2011 presentaron anomalías por encima del promedio y en este último esto no se vio reflejado en la extensión de la región 5, lo que indica que no solamente la precipitación es importante para explicar las variaciones en la extensión de la pluma turbia en la zona portuaria o en el estero de Punta Banda. Esto en especial se puede inferir si tomamos en cuenta la fuerte anomalía positiva de precipitación en el 2005 (Fig. 10b) la cual sí estuvo asociada a una mayor extensión de la región 5 en la zona del Puerto de Ensenada, pero no en la boca del estero.

En el mes de mayo (Fig. 6) la variabilidad interanual también fue muy importante. La región 2 oceánica se observa afectando el interior de la bahía con mayor frecuencia, lo que indica la presencia de aguas con menor turbidez en ocasiones provenientes de la zona oceánica adyacente. Por otro lado, la región 4 es mucho más variable, y la región 5 presenta en ciertos años una mayor extensión si comparado a lo observado en la climatología (Fig. 4), e incluso la región 6 se extiende en especial entre San Miguel y El Sauzal. Se destaca el 2006 como un año muy homogéneo dentro de la bahía, donde se observa un predominio casi total de la región 3.

En los meses de agosto (Fig. 7), se presentaron con mayor frecuencia y con mayor cobertura espacial las regiones 1 y 2 en comparación con los meses anteriores. En verano las corrientes superficiales son más intensas que en invierno, en especial se intensifican en la zona sur de la bahía con un flujo predominante hacia su interior (Larráñaga-Fu, 2013) que puede explicar el patrón de intrusión observado en la región 2. Entretanto, nuevamente se observa una importante variabilidad interanual, con los años 2003, 2007, 2010 y 2012 cuando la presencia de la región 2 es mínima o inexistente. Por otro lado en el 2013 se observa un dominio de la región 2 en casi toda la bahía, mientras una región 4 oceánica se forma como un evento anómalo. Aquí es importante considerar que la separación de las regiones se basa en la determinación de anomalías espaciales de variabilidad las cuales no siempre indican mayor turbidez. Si el promedio de brillo (o turbidez) es bajo (como parece ser el caso de este año) un alto ruido (regiones 5 y 6) indica una distancia mayor con respecto al promedio, pero no necesariamente un valor más alto que lo observado en otros meses.

6.3 Interanualidad de la Chla

El análisis de las series de tiempo de las anomalías de Chla (Figs. 9-1 y 9-2) permitió también evaluar la interanualidad y las diferencias entre las regiones. La estación 1 representa la región 2 oceánica, la estación 2 la región 3 central, mientras las estaciones 3, 4 y 5 representan la región 4, y finalmente la estación 6 representa la zona del canal asociada también a la influencia oceánica. De manera general todas las estaciones presentan una variabilidad estacional, con las anomalías positivas observadas durante el primer semestre, en coincidencia

con el periodo primaveral. Entretanto la variabilidad interanual es muy evidente, con años con anomalías positivas muy bajas, o incluso negativas en algunas estaciones.

Para poder evaluar esta variabilidad se consideró la Oscilación Decadal del Pacífico (Fig. 10a), a partir de la cual se pueden identificar periodos cálidos (anomalías positivas) o fríos (anomalías negativas). Los periodos fríos han sido asociados al fenómeno La Niña, mientras los periodos cálidos están en general asociados a El Niño (Lavaniegos et al., 2015). Una excepción es el periodo 2013 a 2015 cuando una anomalía positiva de características anómalas afecta la costa oeste de Estados Unidos desde Alaska hasta Baja California en México, en el fenómeno que se denominó como "El Blob" (Amaya et al., 2016). Frente a las costas del norte de la península de Baja California, la presencia del fenómeno El Niño ha sido asociado a una disminución en la concentración de nutrientes inorgánicos en la capa superficial del océano debido a una disminución en la intensidad de las surgencias, lo que a su vez se refleja en una disminución de la biomasa del fitoplancton. Por otro lado el fenómeno La Niña tiene un efecto contrario (Gaxiola-Castro et al., 2010). Finalmente, "El Blob" se caracterizó por presentar características similares a El Niño en las aguas frente al sur de California y Baja California, con efectos negativos sobre la biomasa del fitoplancton (Amaya et al., 2016). A partir del 2015 se observó la entrada de un nuevo periodo El Niño que se asoció a "El Blob" y continuó promoviendo una baja productividad biológica en todo el Sistema de la Corriente de California (Jacox et al., 2016).

El periodo de tiempo analizado en este trabajo coincidió con diferentes eventos interanuales. Entre el 2002 y finales del 2004 los datos analizados en este trabajo muestran anomalías negativas de Chla a pesar de un breve aumento alrededor de abril del 2003 que fue menos acentuado en la estación 6, ubicada en la zona del canal al sur de la bahía. Este patrón coincide con un periodo El Niño moderado que se observó entre el 2002 a 2004 (Venrisck et al., 2003) que parece haber afectado al fitoplancton al interior de la bahía.

A partir del 2005 se observó un periodo extenso, marcado por un predominio de anomalías negativas del PDO (Fig. 10a). En las anomalías de Chla esto se reflejó en los valores más altos de toda la serie de tiempo en todas las estaciones (Fig. 9). Las anomalías positivas más elevadas ocurrieron en la estación 1 donde la más alta se observó entre finales del 2008 e primeros meses del 2009. En especial del 2007 al 2009 esto fue asociado a los efectos de La Niña sobre el sistema de la Corriente de California que promovió un incremento en la biomasa del fitoplancton (McClatchie et al., 2009; Linacre et al., 2010) que concuerda con el patrón observado en nuestros datos. Entretanto, en las demás estaciones también se observan fuertes anomalías positivas de Chla entre el 2005 y 2006; en la estación 2 es la más alta de toda la serie. Durante el 2005 se observó el efecto de un El Niño débil sobre el sistema de la Corriente de California (Goericke et al., 2005) pero esto fue asociado a lluvias con niveles de precipitación muy por encima del promedio (Parrett y Hunrichs, 2006) como lo indica también la anomalía de precipitación (Fig. 10b). Como mencionado anteriormente un incremento de la

precipitación puede aumentar la inyección de nutrientes hacia la bahía y explicar las anomalías positivas de Chla en ese periodo. Por otro lado, eso también puede aumentar la concentración de material terrígeno que interfiere con el algoritmo para determinar Chla y lleva a una sobreestimación de la misma (Vendrick et al. 2003). Además, también se observan diferencias en la intensidad de este efecto en las diferentes estaciones. Las estaciones 4 y 5 fueron las menos afectadas, con anomalías más bajas en comparación a las demás estaciones, pero con una duración mayor que puede indicar que procesos más locales actúan en esta zona promoviendo una variabilidad particular, como se discutió en la sección 6.2.

A partir del 2013 las anomalías positivas decaen de forma muy significativa y se mantienen hasta el final de la serie de tiempo, siendo más significativas en las estaciones más internas de la bahía (2,3,4 y 5), mientras que en las estaciones 1 y 6 las anomalías son ligeramente más elevadas. Como mencionado anteriormente, este periodo se vio afectado por el fenómeno El Blob (2013 al 2015) y El Niño (2015-2016) que promovieron un decremento muy importante en la Chla en el sur de California y Baja California (Gómez-Ocampo et al., 2017) que afectó también el interior de la bahía.

7 Conclusiones

Este trabajo permitió determinar que dentro de la Bahía de Todos Santos existen diferentes regiones cuya cobertura geográfica varía en función de procesos estacionales e interanuales. En especial se pudo determinar regiones costeras cuya variabilidad parece estar asociada a eventos de carácter climático (precipitación) y/o antropogénico (de descargas domésticas, industriales y escorrentías agrícolas). Para poder definir con más exactitud esta relación, se recomienda identificar un periodo de mayor afluencia continental (por precipitación por ejemplo) y realizar el procedimiento metodológico presentado en este trabajo.

Así mismo, los resultados analizados muestran el potencial de este procedimiento para la evaluación de la extensión de florecimientos algales nocivos. Esto se trató de evaluar, pero desafortunadamente no se encontraron coincidencias entre la formación de un florecimiento y la disponibilidad de imágenes satelitales para el mismo periodo.

Finalmente, se considera que todavía hay muchas preguntas a responder para poder explicar los patrones observados en este trabajo pero los resultados permitieron confirmar la utilidad de este análisis para evaluar los patrones de variabilidad dentro de la Bahía de Todos Santos. En especial, es importante ver que las imágenes estándar de concentración de clorofila *a* distribuidas por las agencias espaciales y usadas en muchos estudios oceanográficos tienen una resolución espacial de 1 km, lo que limita mucho su uso en zonas costeras o aguas interiores como bahías o estuarios. Entretanto, con el procedimiento

metodológico desarrollado en este trabajo se pudo mejorar la resolución a 250 m, lo que significa que muchos procesos de menor escala podrán ser evaluados de forma más completa.

Bibliografía

Amaya, D.J., Bond, N. E., Miller, A.J., DeFlorio, M.J. (2016). The evolution and known atmospheric forcing mechanisms behind the 2013-2015 North Pacific warm anomalies. *US Clivar Variations*. Vol. 14 (2)

Álvarez-Sánchez L. G., Hernández-Walls, R., Durazo-Arvizu, R. (1988). Patrones de deriva de trazadores Lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, 14: 135-162.

Behrenfeld M. J., E. Boss, D.A. Siegel & D.M. Shea. (2005) Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochemical Cycles* 19: GB1006, doi: 10.1029/2004GB002299.

Castro R., Mascarenhas, A. , Martínez, A., Durazo, R., Gil-Silva, E. (2006). Spatial influence and oceanic thermal response to Santa Ana events along the Baja California peninsula. *Atmósfera*. 19, 195-211.

Castro-Longoria, E., & Hamman, M. (1989). Zooplankton Biomass And Community Structure In Todos Santos Bay, B.C., Mexico, During The 1982-83 El Niño Event. *Ciencias Marinas*, 15(4), 1-20.

Cervantes-Audelo, I.G. (2013). Análisis de circulación y dispersión en la Bahía de Todos Santos, Baja California. Tesis de Maestría en Ecología Marina, Universidad del Mar. Puerto Ángel, Oaxaca

Chamberlain, J., Fernandes, T.F., Read, P., Nickell, T.D., Davies, I.M. (2001). Impacts of biodeposits from suspended mussel (*Mytilus edulis* L.) culture on the surrounding surficial sediments. *ICES J. Marine Sci.* 58: 411-416.

Chen, Z., Hu, C. & Muller-Karger, F. (2007). Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery. *Remote Sensing of Environment*, Vol 109, p 207-220. En: Mejía, A. (2013). Variabilidad de los patrones de turbidez superficial en el golfo de Urabá (Colombia), a partir de los sensores MODIS-Aqua y MODIS-Terra. (Tesis de maestría). Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" Facultad de Oceanografía Física, Cartagena de Indias D.T. y C.

Cruz-Colin, M.E., Cupul-Magaña, L. A. (1997) Erosión y aporte sedimentario de los cantiles marinos de la Bahía de Todos Santos, Baja California, en el periodo de 1970 a 1991. *Ciencias Marinas*, 23 (2): 303-315

Doxaran, D., Froidefond, J. M., Castaing, P., Babin, M. (2009). Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): observations from field and MODIS satellite data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(3), 321-332. En: Mejía, A. (2013). Variabilidad de los patrones de turbidez superficial en el golfo de Urabá (Colombia), a partir de los sensores MODIS-Aqua y MODIS-Terra. (Tesis de maestría). Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" Facultad de Oceanografía Física, Cartagena de Indias D.T. y C.

Durazo, R., (2009) Climate and upper ocean variability off Baja California, México: 1997-2008. (2009). *Progress in Oceanography* 83 361–368

Durazo, R. Ramirez-Manguilar, A.M., Miranda, L.E., Soto-Madrones, L.A. (2010). Climatología de variables hidrográficas en Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997–2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California. Instituto Nacional de Ecología. 25-59

Giffard-Mena, I. (1997). Variación del fitoplancton con relación a las agua residuales en la Bahía de Todos Santos, B.C. (Tesis de Licenciatura) Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C., México

Gonzalez, R. & Woods, R. (1996). Tratamiento digital de imagines. Addison-Wesley. p 241

Gregg W.W, Conkright, M.E., Ginoux, P., O'Reilly, J.E., Casey, N.W. (2003). Ocean primary production and climate: Global decadal changes. *Geoph. Res. Letters* Vol. 30(15): doi:10.1029/2003GL016889.

Gutiérrez-Galindo E. A., Muñoz-Barbosa, A., Mandujano-Velasco, M.R., Daesselé, L.W., Orozco-Borbón, M.V. (2010). Distribution and enrichment of silver and cadmium in coastal sediments from Bahía Todos Santos, Baja California, México. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 85:391-396

Hooker, S.B., Rees, N., Aiken, J. (2000). An objective methodology for identifying oceanic provinces. *Progress in Oceanography* 45, 313–338.

IOCCG, (2009). Remote sensing in fisheries and aquaculture. In: Forget, M.-H., Stuart, V., Platt, T. (Eds.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 8. IOCCG, Dartmouth, Canada.

ITC-ILWIS, (2001). Ilwis 30 academic user's guide. The Netherlands International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.

Kahru, M., Mitchell, B. G., Diaz, A., Miura, M. (2004). MODIS Detects a Devastating Algal Bloom in Paracas Bay, Peru. EOS, Transactions, American Geophysical Union, Vol 85 (45).

Kahru, M., Mitchell, B. G., Diaz, A. (2005). Using MODIS medium-resolution bands to monitor harmful algal blooms. Proceedings of SPIE, Vol 5885. doi: 10.1117/12.615625.

Larrañaga-Fú, M.J. (2013). Variabilidad de la circulación superficial de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Tesis de Licenciatura en Oceanología, Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, BC.

Levin, P.S., Fogarty, M.J., Murawski, S.A. and Fluharty, D. (2009). Integrated ecosystem assessments: Developing the scientific basis for ecosystem-based management of the ocean. PLoS Biology 7:23-28.

Linacre, L., Durazo, R., Hernández-Ayón, J.M. Delgadillo-Hinojosa, F., Cervantes-Diaz, G., Lara-Lara, J.R., Camacho-Ibar, V., Siqueiros-Valencia, A., Bazán-Guzmán, C., (2010). Temporal variability of the physical and chemical water characteristics at a coastal monitoring observatory: Station ENSENADA. Cont. Shelf Res. 30, 1730-1742,

Lynn RJ, Bograd SJ, Chereskin TK, Huyer A. (2003). Seasonal renewal of the California Current: The spring transition off California. J. Geophys. Res. 108, 3279, doi: 10.1029/2003JC001787

Mantua, N. (2017). The Pacific Decadal Oscillation (PDO), Febrero del 2017 Tomado de: <https://research.jisao.washington.edu/pdo/>

Becker, E. (2016). April 2016 El Niño/La Niña update. Febrero del 2016. Tomado de: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/april-2016-el-ni%C3%B1o-la-ni%C3%B1a-update-what-goes-%E2%80%A6>

Mateos, E., S. G. Marinone, A. Parés-Sierra. (2009). Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B. C. Mexico. Ocean Modelling. 27,107-112.

McClain C.R., M.L. Cleave, G.C. Feldman, W.W. Gregg, S.B. Hooker, & N. Kuring. (1998). Science quality SeaWiFS data for global biosphere research. Sea Technology 39:10–16.

Mejía, A. (2013). Variabilidad de los patrones de turbidez superficial en el golfo de Urabá (Colombia), a partir de los sensores MODIS-Aqua y MODIS-Terra. (Tesis de maestría). Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" Facultad de Oceanografía Física, Cartagena de Indias D.T. y C.

Millán-Núñez, R., Santamaría-de-Ángel, E. & González-Silvera, A. (2006). Metodología para la Regionalización de la zona oceánica mediante aspectos biológicos. 33-38. En: Ordenamiento Ecológico marino. Visión temática de la regionalización. A. Córdova y Vázquez, F. Rosete Verges, G. Enriquez Hernández & B. Fernández de la Torre (Eds.). Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).

Parrett, C. and Hunrichs, R.A. (2006). Storms and flooding in California in December 2005 and January 2006-A preliminary assessment: U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1182, 8 p.

Pitta, P., Apostolaki, E.T., Giannoulaki, M. and Karakassis, I. (2005). Mesoscale changes in the water column in response to fish farming zones in three coastal areas in the Eastern Mediterranean Sea. *Est. Coast. Shelf Sci.* 65: 501-512.

Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., Müller-Karger, F.E. (1994). Gulf of California bio-geographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research* 99 (C4), 7411-7421.

Santamaría-del-Ángel, E.; González-Silvera, A.; Millán-Núñez, R., Callejas-Jiménez, M., Cajal-Medrano, R. (2011). Determining dynamic biogeographic regions using remote sensing data. En: Morales, J., Stuart, V., Platt, T., Satyendranath, S. (Eds). *Handbook of satellite remote sensing image interpretation: Applications for marine living resources conservation and management*, EU PRESPO and IOCCG. 253-271 pp.

Sosa-Ávalos, R., Gaxiola-Castro, G., Durazo, R., Mitchell, B.G. (2005). Efecto de los vientos Santa Ana en las propiedades bio-ópticas frente a Baja California. *Ciencias Marinas*. 31, 339-348

Thomas, Y., Mazurié, J., Pouvreau, S., Bacher, C., Gohin, F., Struski, C., Le Mao, P. (2006). Modelling the growth of *Mytilus edulis* according to farming practices and environmental parameters. Application to 2003-2004 data in the bay of Mont Saint-Michel. IFREMER Report R.INT./ LERMPL/ 06-16, <http://www.fao.org/fishery/gisfish/index.jsp>.

Venrick, E.L., Bograd S.J., Checkley, D.A., Cummings, S., Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Hunter, J., Huyer, A., Hyrenbach, K.D., Lavaniegos, B.E., Mantyla, A. Schwing, F.B., Smith, R.L., Sydeman, W.J., Wheeler, P.A. (2003). *The State of the*

California Current, 2002-2003: Tropical and Subarctic Influences Vie for Dominance. CalCOFI Reports.

Watson, R., Tyedmers, P. Kitchingman, A., Pauly, D. (2003). What's left: The emerging shape of the global fisheries crisis. *Conserv. Practice* 4: 20-21.

Wilson, C.; Chen, C., Clark, C.; Fanning, P. (2009). Remote sensing application to marine resource management. Cap. 4. En: IOCCG Report No. 8. Remote sensing in fisheries and aquaculture. Forget, M.H., Stuart, V. Y Platt, T. (eds.).