



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA SUR
ÁREA DE CONOCIMIENTO DE CIENCIAS DEL MAR Y DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS MARINAS Y COSTERAS

TESIS

Señales interanuales de Temperatura Superficial de Mar y su efecto en la hidrografía en el parque nacional Cabo Pulmo

Que como requisito para obtener el título de:
BIOLOGO MARINO

Presenta:
Luis Alfredo Carrillo Aguilar

Director:
Dr. Eduardo González Rodríguez

LA PAZ, B.C.S., MARZO DE 2018

Dedicatoria

Mi tesis está dedicada a mi mamá Martha Aguilar Rosalía López, a mi papá José Alfredo Carrillo García por apoyarme en toda la vida. Muchos de mis logros se los debo a ustedes entre lo que se incluye este. Me formaron con reglas y algunas libertades, pero a final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis sueños. Los quiero mucho, muchas gracias por todo. ☺

Al Dr. Eduardo González Rodríguez por enseñarme a utilizar diferentes herramientas, programas, darme consejos y tener paciencia a lo largo de estos dos años. Muchas gracias Lalo.

A mis amigos de toda la carrera que estuvieron ahí en las buenas y en las malas. Muchas gracias a mi mejor amigo EL Pepillo y a el súper equipo: Andrea, Ale, Paola y Betsy. Ustedes representan para mi uno de los pilares en la carrera. Son unas chicas sensacionales y estoy eternamente agradecido con ustedes por creer en mí y apoyarme. Rosa y Leo es un gusto haberlos conocido y que siga esa amistad. Ustedes dos fueron otro de mis pilares durante toda mi carrera, compartimos muy buenas experiencias, hubo altibajos, pero nada que no se pudiera arreglar ;). El Juanca, gracias por haberme compartido tu conocimiento y animarme en el laboratorio a seguir aprendiendo, Cristian, Mizra, Omi, JJ y Helena pfff chicos ustedes fueron el otro pilar. Solo tengo que decir muchas gracias por todas las pato-aventuras que hemos tenido y tendremos.

Introducción

El sistema de la Corriente de California, se delimita al norte por el giro subártico y al sur por la corriente norecuatorial (Sierra *et al.*, 1997). Las escalas y la dinámica de las corrientes dominantes en la mayor parte de la Corriente de California son características por los fuertes vientos, que se encuentran a lo largo de toda la costa, la topografía, batimetría y también una plataforma continental relativamente estrecha. También existe un contraflujo que pasa por debajo de la Corriente de California, pero en dirección opuesta (hacia el norte) sobre el talud continental y fluye entre 100-400 m, transportando agua más caliente y más salada (Steele *et al.*, 2010).

La conexión que tiene el océano Pacífico con la región sur del Golfo de California se encuentra en una zona oceanográfica de transición donde muchas masas de agua convergen (Castro *et al.*, 2006). El forzamiento dinámico que ejerce el Pacífico sobre el Golfo, es uno de los aspectos oceanográficos más importantes, pues integra y refleja el efecto de fenómenos tan relevantes como los balances globales de calor y sal, la circulación termohalina y la circulación barotrópica (Makarov y Jiménez, 2003). En la superficie se pueden encontrar las aguas del océano Pacífico, aguas de la Corriente de California, aguas superficiales tropicales, como también agua con rangos de temperatura y salinidad típicos del interior del Golfo de California (Morrison, 2003).

En particular, en la entrada al Golfo de California existen diferentes masas de agua, como la Corriente de California que tiene una temperatura que va desde los 12°C hasta los 18°C y salinidad menor o igual a 34.5. El agua tropical de la superficie presenta una temperatura mayor o igual a 18°C y la salinidad es menor a los 35. El agua del Golfo de California presenta una temperatura mayor o igual 12°C y salinidad >34.9. El agua subtropical presenta una temperatura que varía desde los 9°C hasta 18°C y la salinidad es de 34.5 hasta 35. El agua intermedia del Pacífico presenta una temperatura desde 4°C y que llega hasta 18°C y una salinidad desde 34.5 hasta 34.8. Por último, está el agua profunda del Pacífico con una temperatura de <4°C y una salinidad >34.5 (Torres-Orozco, 1993).

Las distintas masas de agua se encuentran presentes en diferentes épocas del año, en particular las aguas del Golfo de California están presentes durante verano y otoño, estas aguas aparecen como un núcleo superficial bien definido. Durante invierno y primavera, las aguas relativamente frescas (aguas de la Corriente de California) aparecen en la capa de la subsuperficie, encerrada por agua más salada por el Golfo de California (Castro et al., 2006)

Las aguas en la entrada al Golfo están en la zona de transición compleja. Los vientos son estacionales: durante el invierno vienen del noroeste, con velocidades de 8–12 m s⁻¹, y durante el verano vienen del sureste, con ~5 m s⁻¹ (Douglas *et al.*, 1993). En primavera, el agua de la Corriente de California (ACC) se distribuye a través de toda la entrada, mientras que una contra corriente de agua cálida fluye a través de la entrada, transportando agua superficial tropical. Como el Golfo es una cuenca de evaporación, se forma en su interior un agua de mayor salinidad conocida como agua del Golfo de California; por tanto, el balance de masa requiere de un flujo hacia dentro del Golfo. El calentamiento diferencial del Golfo y del Pacífico requiere un intercambio de aguas entre el Pacífico y el Golfo (Beron-Vera y Ripa, 2000; Castro *et al.*, 1994).

Toda esta convergencia de diferentes tipos de agua, aunado a la topografía y a los diferentes procesos de mesoescala, le dan a la parte sur del Golfo de California características únicas que lo hacen sumamente productivo para ecosistemas acuáticos, ya que en esta zona se encuentra el único arrecife tropical del Pacífico mexicano, además de una gran cantidad de ballenas, elasmobranchios, aves, etc. (Citlalli, 2011).

Además de las diferentes masas de agua, la entrada al Golfo de California está influenciada por fenómenos que se originan fuera del Golfo. Por ejemplo, a partir de 2013 se presentó en las costas de Canadá y Estados Unidos un fenómeno de calentamiento anómalo denominado “El BLOB” (Bond *et al.*, 2015). Este “BLOB” ha sido definido como una masa de agua caliente que se encuentra en la superficie del mar, que apareció en el Golfo de Alaska en noviembre del 2013 (Bond *et al.*, 2015); Alaska Ocean Observing System, 2016), persistiendo hasta junio del 2016. Esta anomalía se notó claramente en la temperatura superficial del mar y tuvo como resultado una disminución tanto en el enfriamiento de la superficie como en el transporte de Ekman en el Golfo de Alaska debido a una cresta atmosférica persistente de alta presión (Bond *et al.*, 2015; Hartmann, 2014). La cresta también impidió que las tormentas invernales llegaran a la costa oeste de Estados Unidos y contribuyó a la sequía en la misma zona durante 2014 hasta mediados del 2016 (NOAA 2016; (Seager *et al.*, 2015). Registros de la temperatura superficial del

mar derivadas de percepción remota y de datos in situ, indican que este fenómeno también tuvo efectos en la boca del Golfo de California (Kintisch, 2015).

Otro fenómeno que afecta al Golfo de California, que ocurre en el océano pacífico es El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés), que se caracteriza por el debilitamiento de los vientos alisios y un aumento en la temperatura superficial del mar (TSM) en el pacífico ecuatorial. Dicho debilitamiento provoca la advección de aguas cálidas del pacífico occidental hacia el Pacífico Oriental, así como un cambio en la evaporación y temperatura. Provocando mayor humedad y un aumento en la temperatura en la costa (Larkin y Harrison, 2002).

El ENSO presenta dos componentes: 1) oceánico, donde se contrastan las temperaturas superficiales del Pacífico Tropical y que da origen a la condición de El Niño, que se presenta al tener anomalías cálidas y La Niña, que se presenta al tener anomalías frías; y 2) atmosférico (condición Walker). La NOAA refiere que la condición tiende a ocurrir cada 3-5 años y dura por lo general entre 9-12 meses. Contrario a la condición El Niño, La Niña puede durar 1-3 años (Rodríguez-Moreno *et al.*, 2014).

En la entrada del Golfo de California se presentó un calentamiento anómalo a lo largo de los años 2014 a 2016. Las primeras observaciones de un calentamiento anómalo se percibieron por medio de imágenes de temperatura superficial del mar a finales de 2013. A partir de noviembre de 2015 se comenzó a desarrollar en el ecuador una fase positiva del ENSO que duro hasta mayo de 2016 y que aparentemente tuvo efectos en el Golfo de California (Kintisch, 2015).

Al parecer el calentamiento anómalo observado en la boca del Golfo de California está relacionado con los dos procesos mencionados. El primero, relacionado con el BLOB entre 2013-2015 y el segundo asociado a el ENSO entre 2015-2016. Independientemente del origen de este calentamiento en la entrada al Golfo de California, el presente estudio presentará resultados, tanto de su duración, sus anomalías y de sus efectos específicamente, en el parque nacional Cabo Pulmo durante el período 2013-2016.

2. Antecedentes

En el pacífico nororiental se presentó una inusual anomalía positiva de la temperatura superficial en los inviernos de 2013 y 2014 afectando la circulación atmosférica en la región (Hartmann, 2014). Este autor sugiere que tres patrones de TSM son los responsables de modular las variaciones interanuales. El primero lo atribuye a la

oscilación decadal del Pacífico (PDO, siglas en inglés), el segundo lo atribuye al ENSO y el tercer modo a una señal del norte del Pacífico (independiente del PDO). Este calentamiento anómalo abarcó no solo el Pacífico Norte, sino también se extendió a lo largo de la península de Baja California y hasta la entrada al Golfo (Kintisch, 2015)

Este calentamiento anómalo se observó a lo largo de la costa oeste de Estados Unidos (aproximadamente a 200 km de la costa). El 16 de septiembre del 2014, a 32 km de la costa de Newport, Oregon, la TSM incrementó 7°C en una hora; el agua en esa zona continuó caliente hasta junio del 2015 (HORI, 2015). Este mismo autor, demostró que en el 2014 la capa de agua caliente que se encontraba en la superficie se extendió hasta los 80 m de profundidad. Después llegó hasta los 140 m de profundidad en marzo-abril y mayo. Esa capa disminuyó su grosor en la costa debido a la temporada de surgencias (junio, julio, agosto). En otoño del 2014 en el sur de California, las anomalías del TSM alcanzaron 5°C y se concentraron en los primeros 50 m (Zaba y Rudnick, 2016).

A lo largo de la costa oeste de Baja California se documentó por (Robinson, 2016) la evolución del calentamiento en la parte sur de la Corriente de California, en Baja California, México. Obtuvieron un calentamiento de 2.5°C por encima de la normal no asociado al ENSO durante mayo del 2014 hasta abril del 2015 (Robinson, 2016). También obtuvieron otro calentamiento que ocurrió desde septiembre hasta diciembre de 2015, durante las condiciones del ENSO (Robinson, 2016).

Ya al inicio de la primavera de 2014 era evidente que había un calentamiento excesivamente anómalo en entrada al Golfo de California. Trasviña *et al.* (2017), hicieron una comparación de temperatura superficial del mar entre los primeros tres meses del 2013 y 2014 para dicha zona. Estos autores observan una diferencia en la temperatura del agua, en 2013 la temperatura de la boca del Golfo es más fría de 22 °C y apenas la masa de agua caliente de 26°C llega al sur de la boca del Golfo. Para 2014 la masa de agua caliente abarca la mitad de la entrada del Golfo de California (Trasviña *et al.*, 2017). Los cambios del ENSO en los arrecifes coralinos en México no están tan documentados, en comparación a las comunidades de Costa Rica, Panamá, Colombia y Ecuador (Reyes-Bonilla, 2001). En trabajos anteriores hacen comparaciones en los efectos dentro del Pacífico mexicano. Reyes-Bonilla, (1993) estimó un 15% de la mortalidad de *Pocillopora* spp en el arrecife de Cabo Pulmo en 1987.

Por su parte, los efectos del ENSO en el Golfo han sido documentados por Herrera-Cervantes *et al.*, (2007), quien describe un patrón del ENSO en su fase positiva en el

Golfo de California, donde muestra que el ENSO es más fuerte durante el invierno. Esto se debe al forzamiento en la variabilidad de TSM que ocurre a través de una interrupción en la surgencia impulsada por el viento a lo largo de la costa este.

Efectos del ENSO en el parque nacional Cabo Pulmo fueron patentes durante el evento de 1997-98. En julio de 1997, se observó un blanqueamiento parcial o total en las primeras colonias del arrecife coralino. Para el siguiente mes se observó una pérdida de color en varios géneros de coral de la región (Reyes-Bonilla, 2001).

El último evento de El Niño se presentó 2015-2016, recibiendo el nombre de “El Niño Godzilla”, alcanzando a estar entre los tres más intensos en el registro histórico, pero, no logrando la intensidad y escala que El Niño de 1997-1998 (Schiermeier, 2015; Supari *et al.*, 2016). Aún es pronto para determinar los efectos de este evento en Cabo Pulmo.

Respecto a la hidrografía y la circulación de la plataforma continental del parque nacional Cabo Pulmo existen pocos trabajos publicados, entre ellos Roden (1972) informó la existencia de corrientes de chorros cercanos a la costa peninsular. Este autor las describe como corrientes costeras con un núcleo de alta velocidad, de 30 km de ancho, velocidades superiores a 30 cm s^{-1} y que alcanzan desde la superficie hasta los 700 m de profundidad. Collins *et al.*, (1997) fueron los primeros en reportar la presencia de núcleos de alta salinidad en la costa de Cabo Pulmo. Señalan como causa posible la presencia de corrientes de chorro. Estos chorros parecen ser capaces de acarrear aguas desde el interior del Golfo de California, sobre el parque y hacia el sur, hasta el océano Pacífico adyacente. Alvarado-Graef (1998) reporta observaciones a lo largo de secciones hidrográficas perpendiculares a la costa. En muchas de estas observaciones es común encontrar chorros costeros, tanto sobre el talud, como sobre la plataforma continental de Cabo Pulmo. (Mascarenhas *et al.*, 2004) reportan secciones de la entrada al Golfo de California donde también hay corrientes de chorro frente a Cabo Pulmo, que se dirigen tanto hacia el norte como hacia el sur, las cuales se reportaron entre los años 1992 y 1999. En el más reciente estudio de Trasviña Castro *et al.*, (2012) confirmaron que existen corrientes costeras debidas a las contribuciones de la marea, del viento y de estructuras de mesoescala, teniendo como resultado en otoño e invierno y en ocasiones en verano, los desplazamientos son hacia el sur.

3. Área de estudio

Cabo Pulmo fue decretado como Área Natural Protegida con categoría de Parque Nacional el 7 de junio de 1995 (Diario Oficial de la Federación, 1995). Está situado en el extremo sur de la Península de Baja California, en la costa del Golfo de California, a una latitud tropical ($23^{\circ}5'N$). En esta localización, las condiciones oceanográficas no siempre son cálidas y es usual encontrar condiciones subtropicales parte del año. Ello se debe a que el parque se encuentra en la región oceanográfica transicional de la entrada del Golfo de California. Esta región tiene influencia de las aguas cálidas del Golfo de California y del pacífico tropical mexicano, pero también llegan aguas frías de la Corriente de California (Castro et al., 2006). Por consiguiente, se pueden esperar cambios estacionales en el comportamiento de los organismos pelágicos que se acercan a este parque marino.

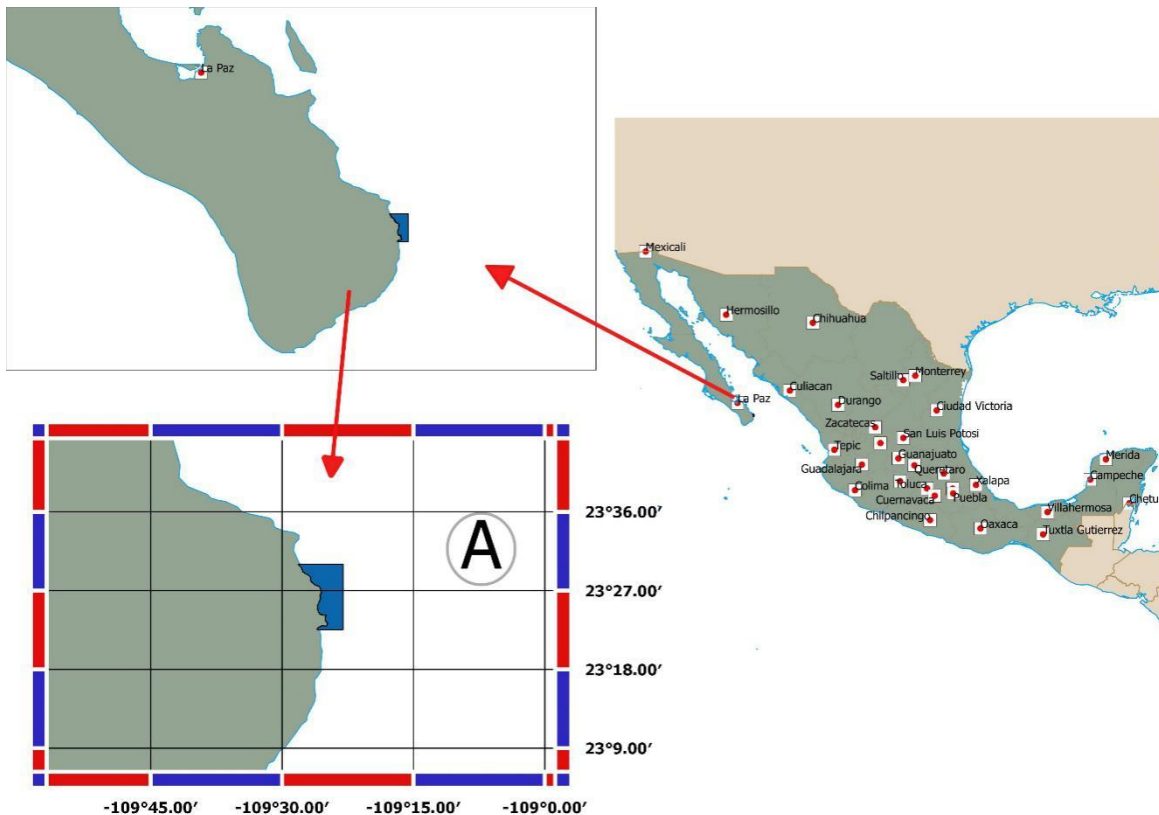


Figura 1. Localización geográfica del parque nacional Cabo Pulmo, Baja California Sur (A). El Polígono del parque nacional de Cabo Pulmo se representa en color azul.

Quizás el aspecto más conocido de Cabo Pulmo es el hecho de ser el único arrecife coralino presente en el Golfo de California, lo cual determina la relevancia de su estudio (Anaya-Reyna y Riosmena-Rodríguez, 1996; Brusca y Thomson, 1977).

La temperatura media en esta localidad varía entre los 19 y 31°C (Moreno Viñals, 2012). Las concentraciones de oxígeno son bajas, desde 1ml l⁻¹ en los primeros 100 m, hasta 0.5 ml l⁻¹ a 150 m (Herrera, 2011).

En general las aguas son claras, hay evidencias indirectas de que existen tasas diferenciales de sedimentación entre las diferentes zonas del arrecife. La región con mayores tasas de sedimentación corresponde a la zona sur del arrecife, mientras que las zonas centro y norte son las que tienen una menor sedimentación (Arizpe, 1987). El área entre una barra y otra está cubierta por arena, por lo que debido a la acción de las corrientes y las olas hay un movimiento constante de partículas. En aguas a 7 m de profundidad o menos, hay evidencia de movimiento periódico de la arena, ya que no hay acumulación de roca coralina (Dolores y Aguilar, 1998).

El arrecife se localiza en una zona de transición entre el Pacífico templado y el tropical. La temperatura media en el arrecife es de 25 °C, ocasionalmente presenta temperaturas desde 17°C hasta 31°C (Arizpe, 1987). La temperatura varía a lo largo del año. Durante los meses de junio a noviembre se presentan los valores más elevados de temperatura, mientras que de enero a marzo se registran los más bajos. Los valores de salinidad permanecen más o menos constantes a lo largo del año, aunque pueden alcanzar algunos valores extremos. Se han medido salinidades de 38 ups, aunque esto es muy poco común (Arizpe, 1987).

4. Justificación

El Parque Nacional de Cabo Pulmo localizado en el Mar de Cortés es el único arrecife de coral vivo y el más antiguo del océano Pacífico Mexicano. Comprender las variaciones de los aspectos abióticos ayudará a entender mejor la respuesta de los factores biológicos. En este sentido, este proyecto aportará más información sobre la hidrografía de Cabo Pulmo, así como el impacto de fenómenos anómalos de temperatura de frecuencia interanual en la zona, lo cual servirá para contribuir al conocimiento de estudios oceanográficos en la zona.

5. Objetivo general

Determinar la influencia de los eventos de calentamiento de temperatura superficial del mar en el parque nacional de Cabo Pulmo para el periodo 2013-2016 y su efecto en la hidrología del parque.

6. Objetivos particulares

- Generar mapas de climatologías y anomalías mensuales a partir de imágenes de satélite de temperatura superficial de mar y clorofila.
- Construir y analizar series de tiempo y anomalías de temperatura y clorofila a partir de datos diarios exclusivamente dentro del polígono del parque nacional de Cabo Pulmo.
- Comparar las series diarias de TSM y Clo con índices interanuales de temperatura superficial (ENSO y PDO)
- Determinar el comportamiento de las corrientes superficiales en el parque nacional a partir de datos in situ para el periodo 2013-2014.
- Establecer si existe una respuesta biológica a los efectos de calentamiento.

7. Metodología

7.1 Climatologías y anomalías de datos satelitales

Para las imágenes de satélite se descargaron datos de temperatura superficial del mar (TSM) de nivel 4 del programa GHRSSST (<https://www.ghrsst.org/>), que tienen una resolución espacial de 1 km². Los datos de nivel 4 son datos diarios globales libres de nubes y abarcan desde el 1° de julio del 2002 hasta el 31 de diciembre del 2016.

Adicionalmente también se descargaron datos diarios de nivel 4 de clorofila del programa Copernicus (<http://marine.copernicus.eu/>) con una resolución espacial de 4 km². Los datos abarcan desde el 4 septiembre 1997 hasta el 31 de diciembre 2016.

Dado que los datos de temperatura y de clorofila son de escala global fue necesario hacer un recorte para la parte sur de la península de Baja California (latitud: 22°, 24° y longitud: -111°, -108). Para esta zona se calcularon las climatologías mensuales con todos los datos disponibles, tanto para TSM como para CLO. Con esta información se construyeron mosaicos con mapas mensuales de distribución de falso color, tanto para TSM como para CLO.

Además, se construyeron anomalías de todos los años, pero, nos concentramos en tres años en particular (2014, 2015 y 2016). Debido a que en estos años se presentaron EL BLOB y ENSO (El Niño y La Niña). A partir de las climatologías se calcularon las anomalías mensuales para dicha zona, esto se hizo restando a cada uno de los promedios climatológicos mensuales del mes correspondiente para 2014, 2015 y 2016.

Con esta información se construyeron mosaicos con mapas mensuales de distribución de falso color para cada año.

7.2 Series de tiempo del parque nacional Cabo Pulmo

Con la intención de describir el comportamiento de TSM y CLO a lo largo del tiempo, se construyeron series de tiempo con datos satelitales exclusivamente dentro del parque. Se descargó el polígono del parque nacional Cabo Pulmo de la página de INEGI (<http://www.inegi.org.mx/>, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) A partir de este polígono, se obtuvo la información diaria de TSM y CLO, correspondiendo 55 datos de TSM y 4 de CLO (esto como consecuencia de la diferencia de resolución espacial de los datos). Estos datos fueron promediados con el fin de tener un dato por día y así poder construir las series de tiempo.

A estas series de tiempo también se les calcularon las anomalías, tomando como base el promedio mensual, de acuerdo con Kushnir, (1994); Ramos-Rodríguez *et al.*, (2012).

7.3 Series de tiempo del MEI y PDO

Para ver el efecto de las señales de largo plazo (MEI y PDO, por sus siglas en inglés) en el parque Cabo Pulmo a lo largo del tiempo, se construyeron series de tiempo con un promedio de datos bimestrales de anomalías de TSM para el Índice Multivariado del ENSO (MEI) y promedio de datos trimestrales para La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Se descargaron los datos del MEI en la página de la NOAA (http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php, Tabla 1) así como también se descargaron los datos del PDO (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>, Tabla 2). Después se construyeron las series de tiempo. Estas series fueron anexadas con las anomalías de TSM y Clo de Cabo Pulmo, generando un mayor panorama de la situación.

7.4 Corrientes in situ

Se instaló a manera de anclaje frente a la playa Los Arbolitos en 23° 24.501'N y 109° 25.005'W (en una profundidad promedio de 15 m) un Perfilador Acústico Doppler de Corrientes (ADCP) marca Nortek que emite a una frecuencia de 1200 KHz. El ADCP se configuró para medir las corrientes de 15 metros de profundidad hacia la superficie en capas de dos metros de grosor durante el periodo de agosto de 2014 a noviembre de 2015. En este periodo el ADCP fue removido del agua cinco veces para la extracción de los datos y para darle mantenimiento. Debido a esto, los datos fueron agrupados a lo

largo del tiempo en cinco bloques. Las variables utilizadas para la determinación de las corrientes fueron: profundidad (Z) y los componentes vectoriales: zonal (U) y meridional (V).

Una vez extraídos los datos crudos de los componentes U y V fue necesario convertirlos a formato ASCII para posteriormente importados al lenguaje de programación MATLAB para depurarlos y procesarlos.

Como los datos están separados a lo largo del tiempo en cinco bloques, fue necesario agruparlos en series de tiempo continuas (correspondientes a cada bean), las cuales incluyen huecos y corresponden a los lapsos donde se dio mantenimiento al equipo.

Para determinar las corrientes se utilizó la herramienta Unified Tidal Analysis and Prediction (Utide) (Codiga, 2011). Esta herramienta consiste en determinar los armónicos principales que componen cada serie y en hacer una reconstrucción a lo largo del tiempo, lo que permite eliminar las ausencias de datos. El resultado de este proceso son series completas a lo largo del tiempo. Una vez obtenidas éstas, fue necesario eliminar el efecto de la marea, para esto se aplicó el filtro de Lanczos de paso bajo (Emery, 2004) con una ventana de 1.5 días. Por último, se hizo una interpolación entre todos los beans para obtener las corrientes a profundidades standard de 2 a 13 m.

8. Resultados

8.1 Mapas de climatologías y anomalías mensuales

A partir de los datos diarios de temperatura superficial del mar (TSM) y clorofila superficial (Clo) se calcularon climatologías mensuales para ambas variables.

A partir de dichas climatologías, 2002-2016, se generaron mapas de distribución de TSM en la boca del Golfo de California (Figura 2). En términos generales tenemos dos patrones bien definidos, uno con temperaturas menores a 24°C y otro con temperaturas mayores a 24°C, más dos periodos de transición. El primer patrón abarca de diciembre a abril, mostrando una temperatura entre 22°C y 24°C, las zonas más frías se ubican en la costa occidental. El primer periodo de transición se observa en el mes de mayo, donde la temperatura aumenta gradualmente de 24 a 26°C. El segundo patrón abarca de junio a noviembre, la temperatura que ubica entre 26°C y 30°C, las máximas se ubican en la boca del Golfo. En los meses de agosto a octubre se registra la máxima temperatura de 30°C. El otro mes de transición se observa en diciembre, donde la temperatura del agua disminuye gradualmente de 30°C a 24°C.

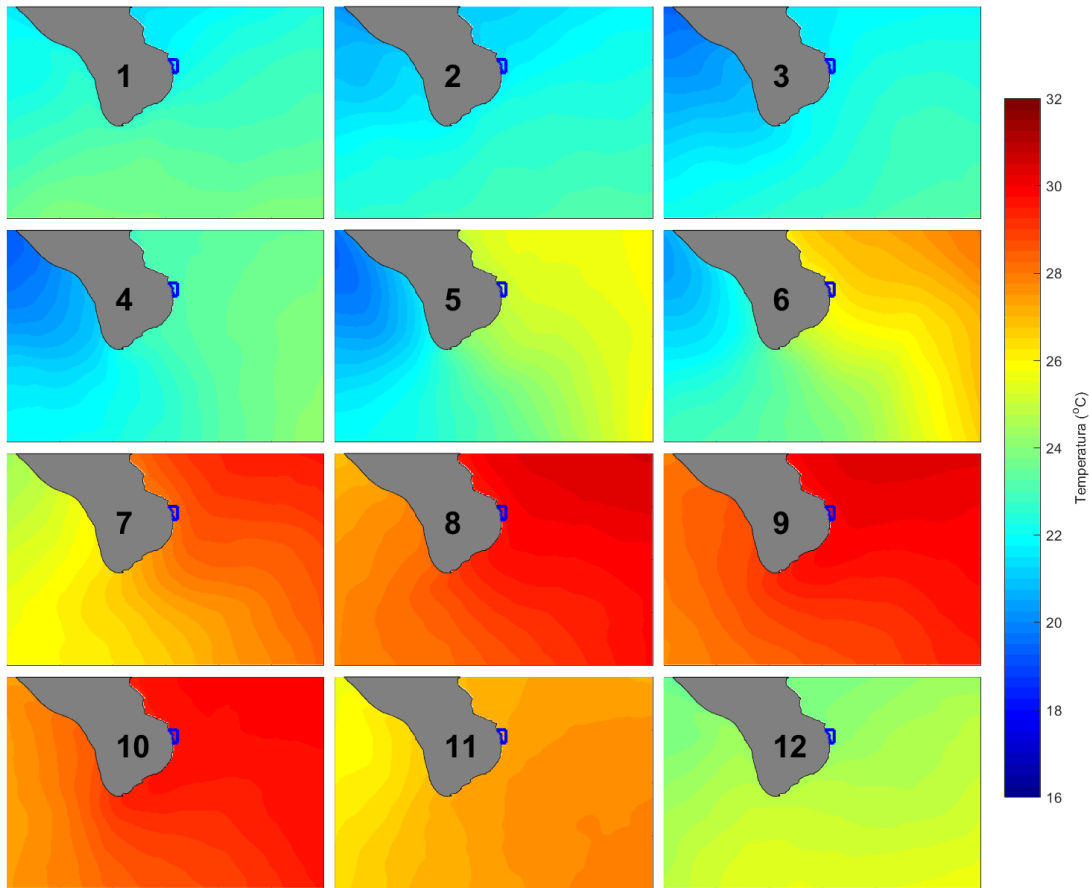


Figura 2. Climatología mensual de temperatura superficial del mar de 2002 a 2016. El polígono azul indica el área del parque nacional Cabo Pulmo. Los números representan los meses del año. Fuente: GHRSSST 1 km².

Los mapas de distribución de la climatología mensual de Clo, desde septiembre de 1997 a diciembre de 2016 se presentan en la Figura 3. Se observan tres patrones, el primero, de diciembre a marzo, caracterizado porque la clorofila proviene del Golfo de California con valores cercanos a 1 mg m³ (círculos negros). El segundo patrón, de marzo a julio, donde se observa que la clorofila proviene principalmente de la costa occidental de la península, con valores de 2-3 mg m³ (círculos rojos). El tercer patrón, de agosto a noviembre, presenta valores bajos de clorofila < a 0.1 y no se observa que ésta provenga ni del Golfo ni de la costa occidental (sin círculos).

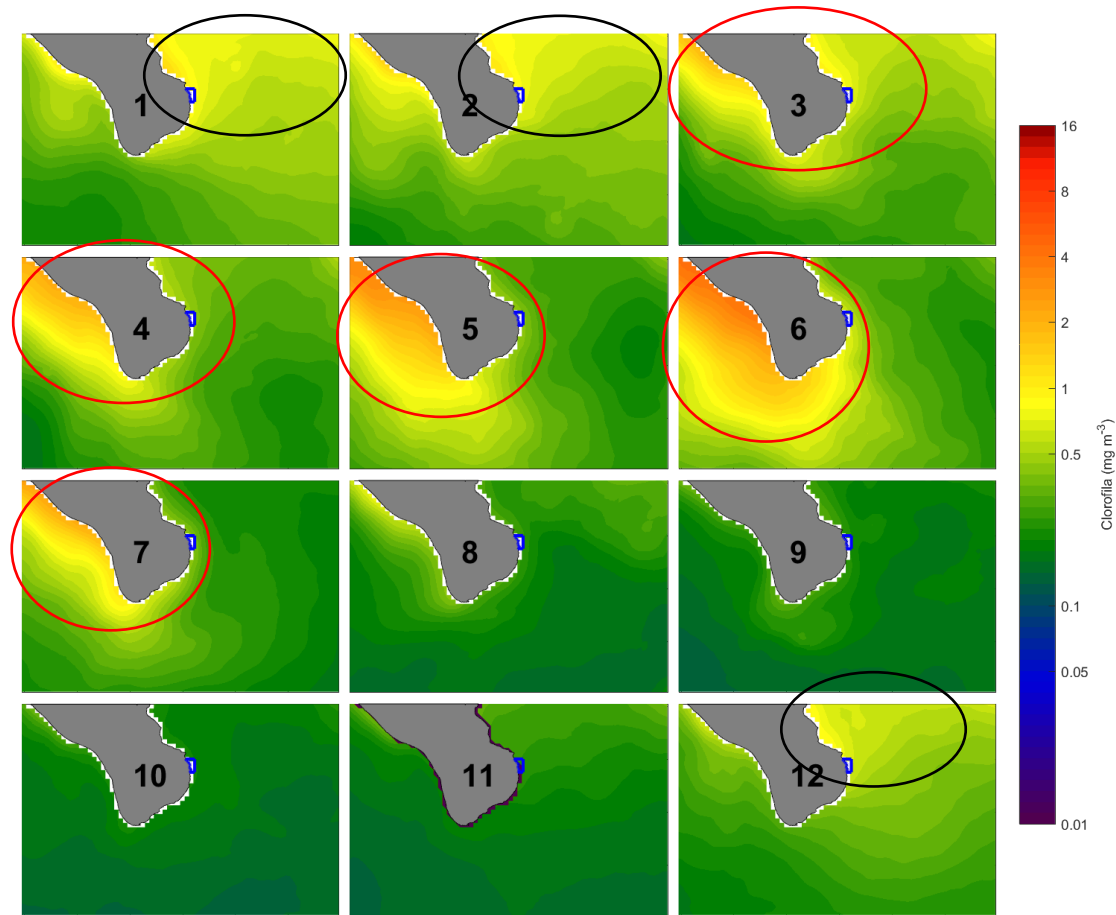


Figura 3. Mapas de distribución de la climatología mensual de clorofila de septiembre de 1997 a diciembre de 2016. El polígono azul representa el área del parque nacional Cabo Pulmo. Para mayor claridad se grafica en una escala logarítmica. Fuente: Copernicus 4 km². Círculo negro la clorofila proviene del Golfo de California. Círculo rojo la clorofila proviene de la costa occidental de la península. Los números representan los meses del año.

8.2 Mapas de anomalías mensuales

En vista de que entre los años 2014 a 2016 se detectó un calentamiento anómalo en la región, se generaron mapas de anomalías mensuales, tanto de TSM como de CLO para dichos años.

Los mapas de distribución de anomalías mensuales de TSM para 2014 se muestran en la Figura 4. Se observan anomalías positivas de enero a septiembre en Cabo Pulmo. En los meses de enero a abril la anomalía proviene, principalmente, del Golfo de California con valores de 2 °C. Los meses de mayo a agosto están caracterizados porque la anomalía positiva se localiza, principalmente, en la costa occidental de la península con valores de 3-4°C. Posteriormente, de septiembre a noviembre se observa un periodo de transición de septiembre a noviembre, donde valores de anomalías en Cabo Pulmo son, prácticamente,

nulas. El mes de diciembre también presenta anomalías positivas mayores en la costa occidental con valores entre 1 y 2.

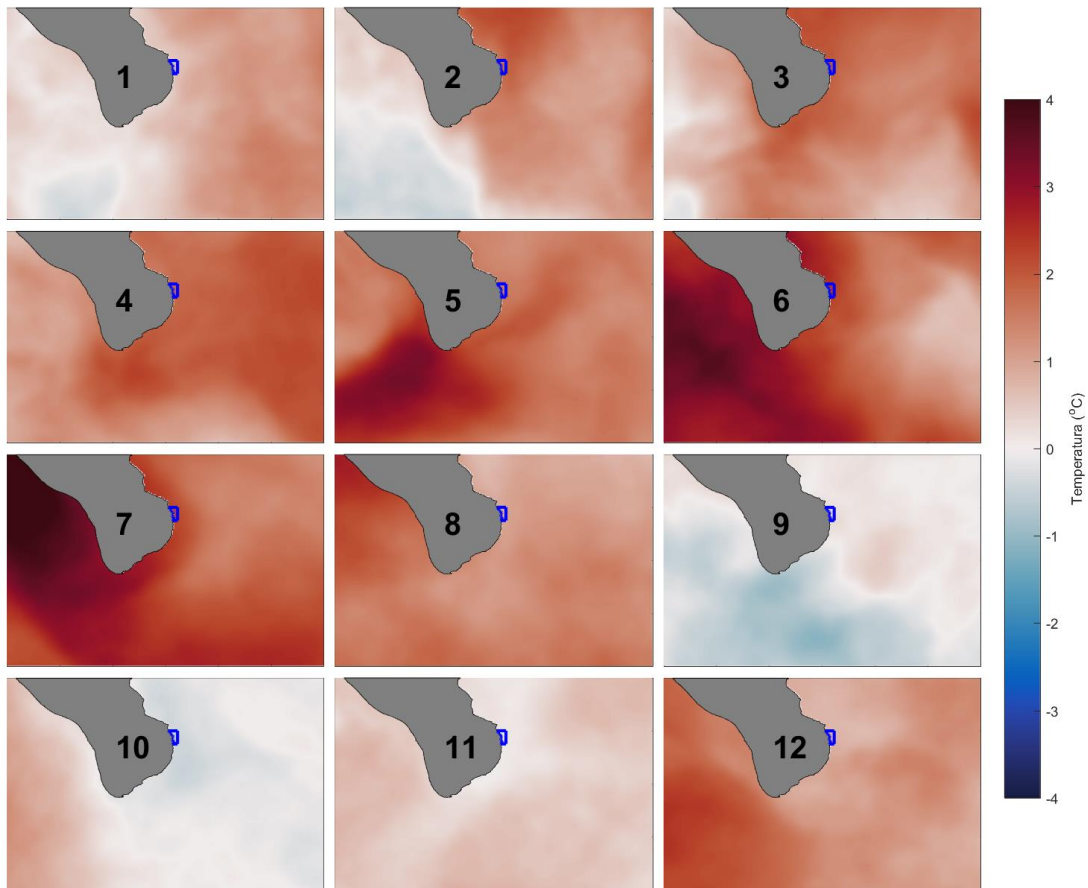


Figura 4 Anomalía climatológica de TSM para 2014. Fuente: GHRSSST 1km². Los números representan los meses del año.

Los mapas de distribución de anomalías mensuales de TSM del 2015 se presentan en la Figura 5. En este año persistió una anomalía positiva en toda la región, tanto en el lado del Golfo de California como en la parte occidental de la península. Las anomalías mayores provienen de la costa occidental de la península en comparación con la boca del Golfo. Cabo Pulmo, en este año, el mes de mayo no presenta anomalías positivas.

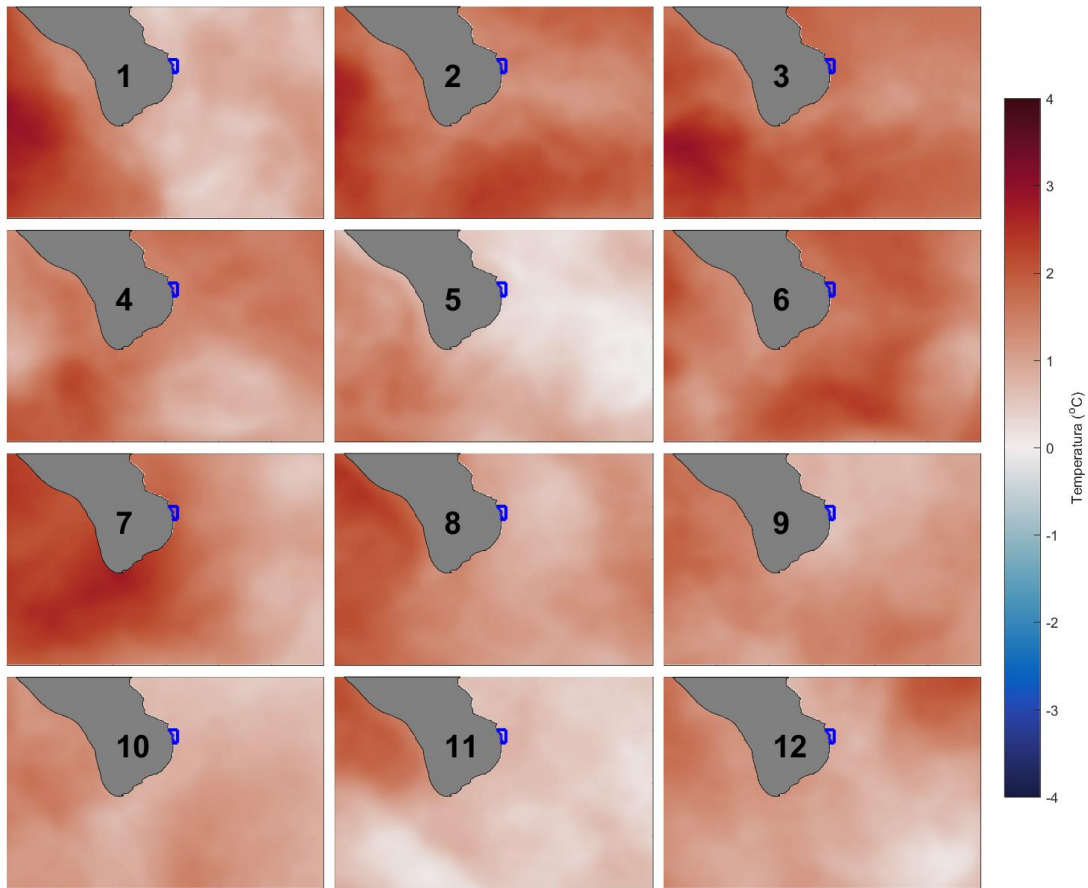


Figura 5. Anomalía de TSM para 2015. Fuente: GHRSSST 1km². Los números representan los meses del año.

Los mapas de anomalías mensuales de TSM satelital del 2016 se muestran en la Figura 6. Se observa que las anomalías positivas en toda la zona solo presentan de enero a marzo. De abril a julio se presentan anomalías negativas al sur de la península. Estas anomalías negativas se distribuyen claramente en la costa occidental de agosto a diciembre. En septiembre las anomalías negativas cubren, tanto la costa occidental como la boca del Golfo. En el mes de noviembre destaca una zona de anomalías positivas al sur de la península.

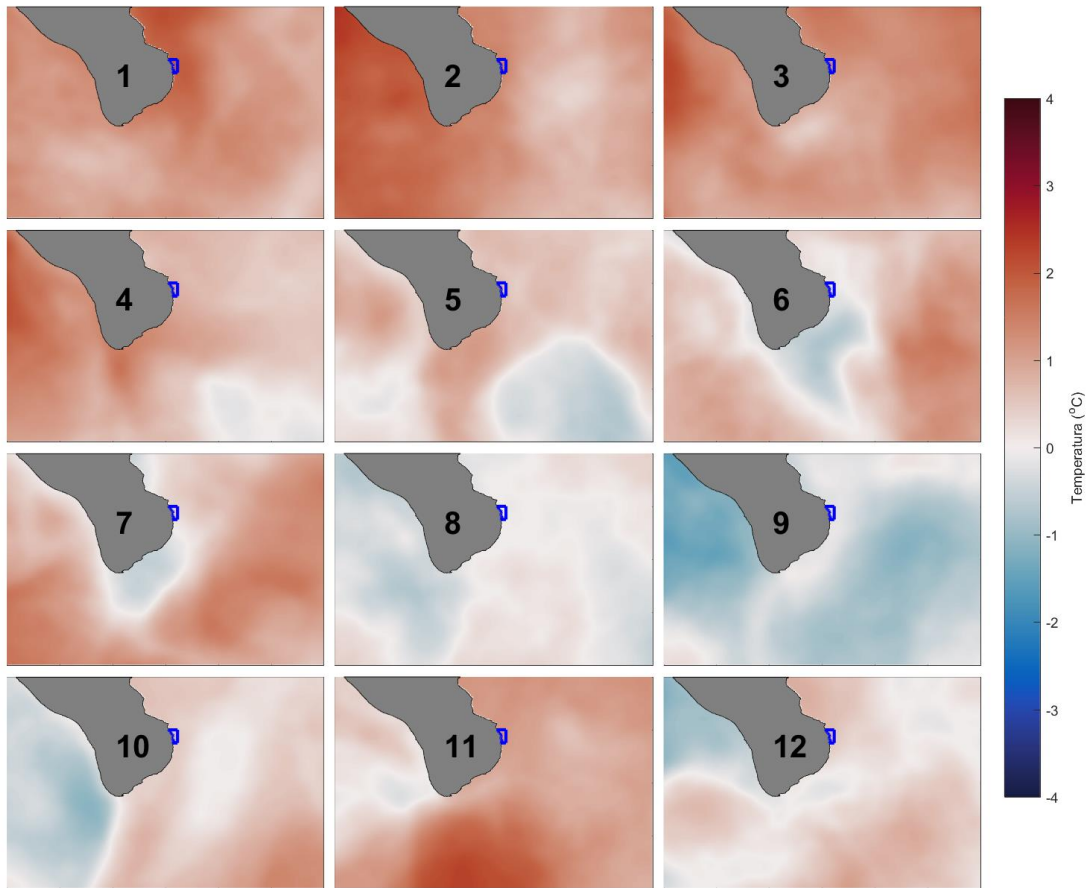


Figura 6. Anomalías de TSM para 2016. Fuente: GHRSSST 1km². Los números representan los meses del año.

Los mapas de anomalías mensuales de Clo satelital del 2014 se muestran en la Figura 7. Se observan anomalías negativas de Clo dentro del Golfo de California de enero a marzo registrando. En los meses de marzo a agosto la anomalía negativa proviene de la parte occidental de la península. Septiembre es un mes donde se presenta una anomalía positiva en la costa occidental de la península. Octubre y noviembre fueron meses donde no hubo anomalías de Clo. Diciembre fue un mes donde se observó anomalías negativas proviniendo del Golfo de California.

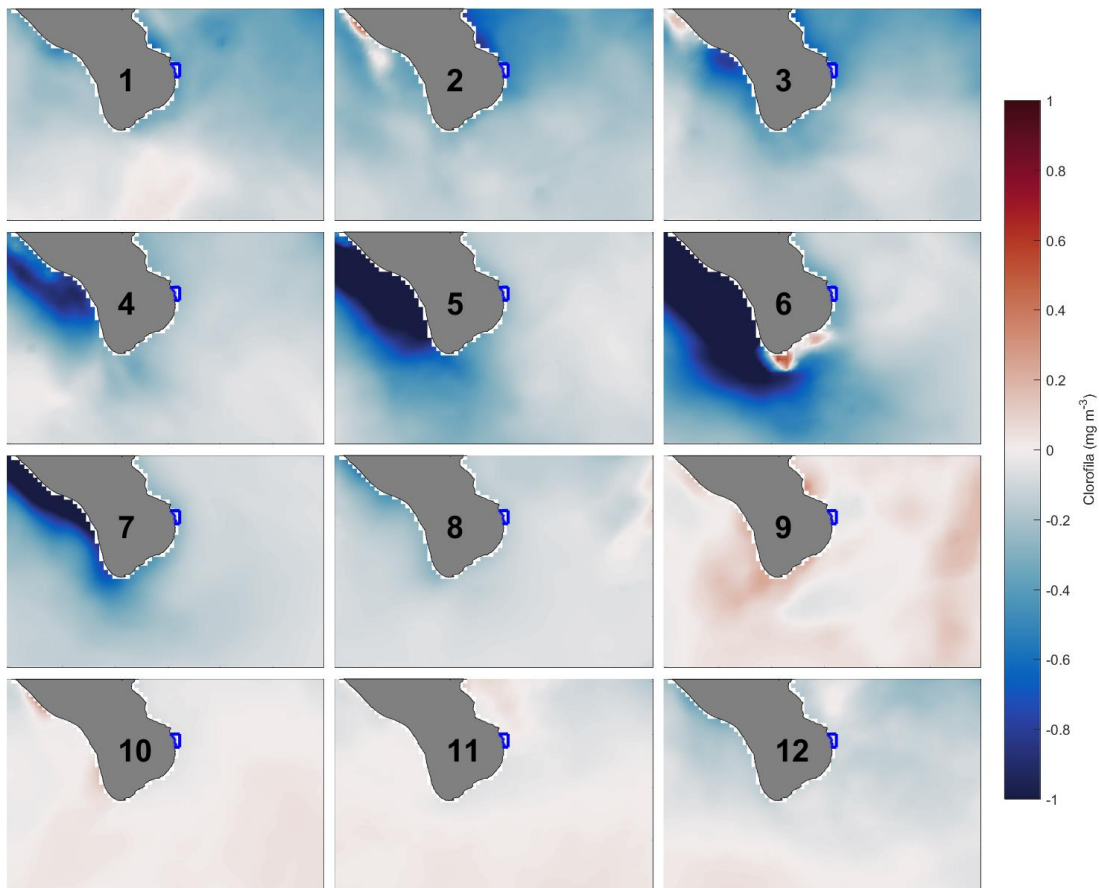


Figura 7. Mapa de anomalías de clorofila del 2014. Fuente: Copernicus 4km². Los números representan los meses del año.

Los mapas de distribución de anomalías mensuales de Clo del 2015 se muestran en la Figura 8. Se observan anomalías negativas de enero a julio, las cuales provienen de la costa occidental de la península. En enero se muestran anomalías positivas en la costa de la península (del lado del Golfo de California). De febrero a abril las anomalías negativas provienen del Golfo de California. El mes de agosto está caracterizado por anomalías positivas tanto en el Golfo de California como en la costa occidental de la península. Septiembre es un mes de transición donde la anomalía positiva va disminuyendo. En octubre no se observa anomalía. Noviembre no se observa alguna anomalía en la costa occidental de la península, pero, en el Golfo de California se observa una anomalía positiva. En diciembre se presenta anomalías negativas en la costa oriental de la península y en el Golfo de California.

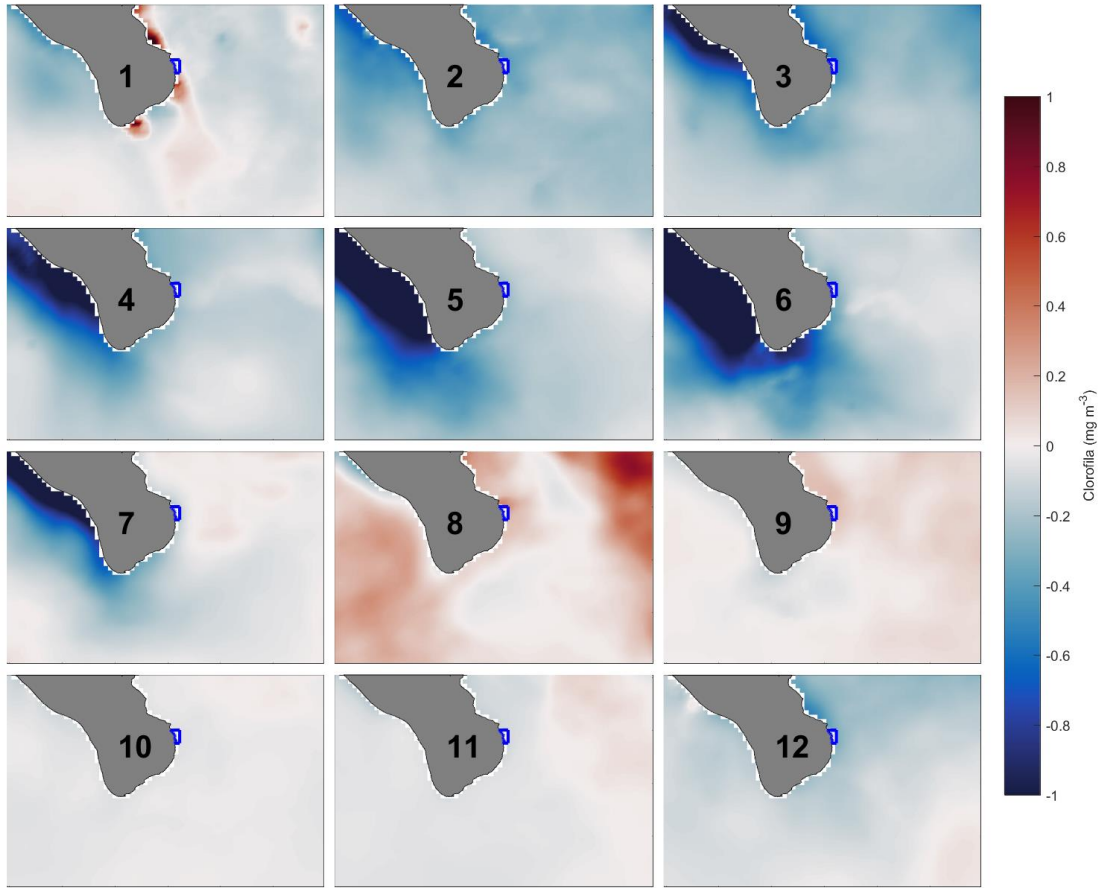


Figura 8. Mapa de distribución de anomalía de clorofila del 2015. Fuente: Copernicus 4km^2 . Los números representan los meses del año.

Los mapas de distribución de anomalías de Clo satelital del 2015 se muestran en la Figura 9. Se muestran anomalías negativas dentro del Golfo de California que comprenden de enero a marzo. De enero a julio la anomalía proviene de la parte occidental de la península. Agosto y septiembre son meses donde se encuentran anomalías tanto negativas como positivas. En octubre y noviembre no se registran anomalías. En diciembre las anomalías negativas empiezan a aparecer en ambos lados de la península.

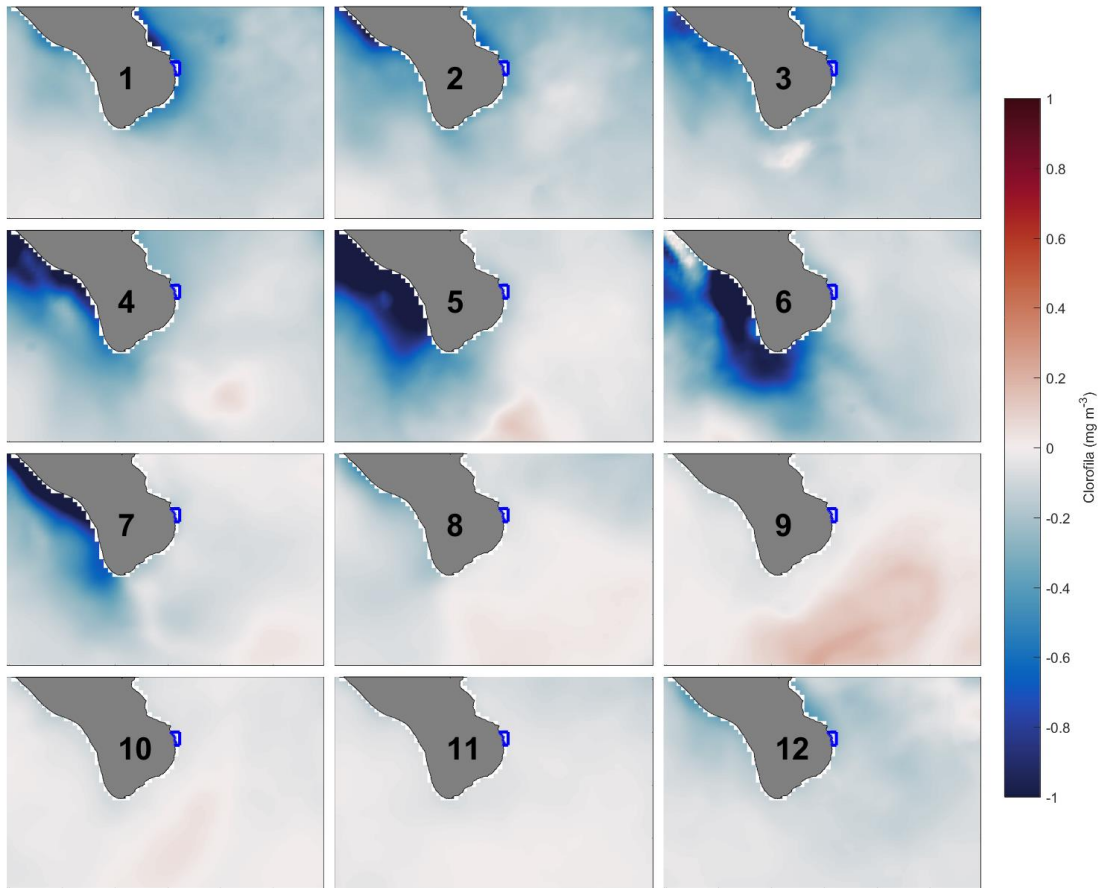


Figura 9. Mapa de anomalía de clorofila del 2016. Fuente: Copernicus 4km². Los números representan los meses del año.

8.3 Series de tiempo

La variación inter-anual de la TSM se muestra en la serie de tiempo generada con los datos exclusivamente dentro del parque nacional (Figura 10). La serie de tiempo de TSM se generó a partir de datos diarios del 1° julio de 2002 al 31 de diciembre del 2016. En la serie se observa que la temperatura presenta un claro patrón estacional, éste oscila entre los 20°C y los 30°C. La media es de 25°C, se observan dos valores mínimos, los cuales han sido los inviernos más fríos presentes en Cabo Pulmo. El primero es en 2008, registrando 18 °C. El segundo es en 2011, con 20 °C. Para este trabajo los años de interés son 2014, 2015 y 2016, teniendo tres años consecutivos la misma temperatura en invierno de 22°C (mostrado en color rojo), que representan los valores mínimos más altos de toda la serie. Previamente en 2010 también se presenta la misma temperatura, pero,

solo se presentó ese año. Es decir, estos años fueron los inviernos más cálidos de todo el periodo (2002-2016).

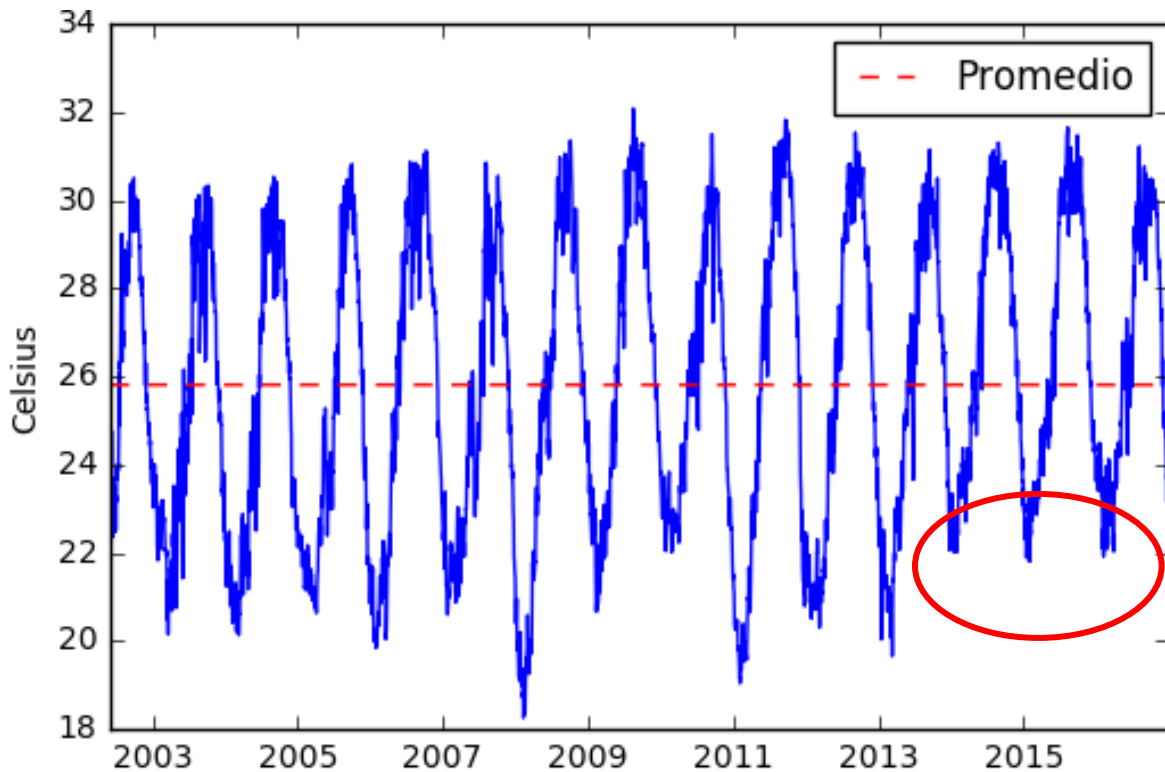


Figura 10. Serie de tiempo de temperatura superficial del mar dentro del polígono del Parque Nacional de Cabo Pulmo del 1°de julio del 2002 a 31 de diciembre del 2016. El ovalo de color rojo representa la temperatura mínima de 2014, 2015 y 2016. La línea roja horizontal representa la media estos datos Fuente: GHRSSST de 1km².

Adicionalmente a la serie de tiempo de TSM, se generó una nueva serie con las anomalías para todo el periodo (Figura 11). Las anomalías tanto positivas como negativas se presentan intercaladas a lo largo de todo el periodo. En términos de periodos de dominancia mayores a un año, en las anomalías negativas se observa que el periodo que más domina es de 2002 a junio de 2006. Respecto a las anomalías positivas se observan dos periodos con dominancia de tres años o más, uno de 2008 a 2010 y otro de 2013 a 2016. Este último periodo presenta los valores anómalos más altos con un máximo de +3 en 2014.

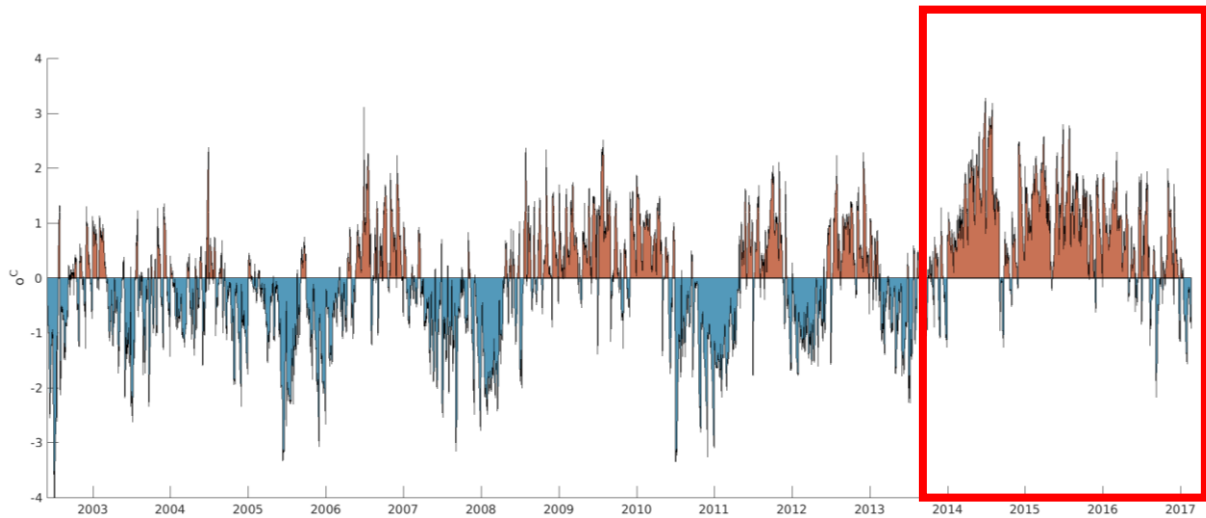


Figura 11. Anomalía de temperatura superficial de mar dentro del polígono del Parque Nacional de Cabo Pulmo del 1° de junio del 2002 a 21 de febrero de 2017. Cuadro rojo representa los años de interés para este trabajo. Fuente: GHRSSST de 1km²

La serie de tiempo de Clo, que abarca de 4 de septiembre del 1997 a 31 de diciembre del 2016 se muestra en la Figura 12, teniendo a principios de este año 9 mg m⁻³ y a finales de este año 10 mg m⁻³. Se tienen valores mínimos de Clo de aproximadamente 0.3 mg m⁻³ a finales del 2013, mitad del 2014 y 2016. Estos valores mínimos también se registran en 1997, finales del 2011 y 2009. Las cuales se encuentran por debajo de la media, el valor de la media es 0.48 mg m⁻³. También podemos observar que de 2014 a 2016 hubo una fluctuación de clorofila, teniendo también valores por encima de la media a mitad del 2015. Los años con valores menores a la media son 1997, 1998 y 2014.

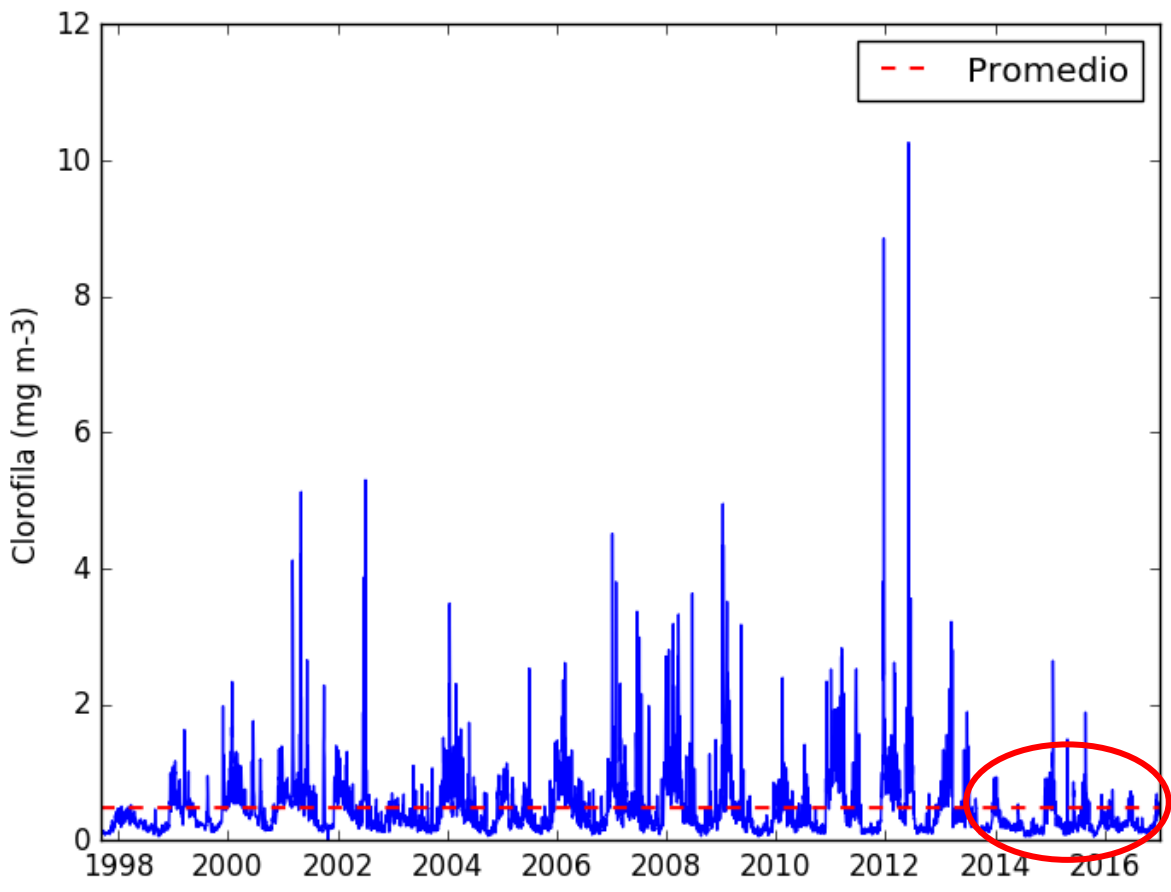


Figura 12. Serie de tiempo de clorofila desde el 4 de septiembre de 1997 hasta diciembre de 2016 exclusivamente de los pixeles dentro del parque nacional de Cabo Pulmo. Ovalo rojo corresponde a los años de interés en este estudio. Fuente: Copernicus 4km².

Se observan principalmente dos periodos anómalamente negativos. En 1997-1998 con valores de -0.5 mg m^{-3} . El segundo se observa de 2014 a 2016 empezando el 4 de septiembre de 2013 y acabando el 8 de enero de 2017, teniendo el mismo valor de -0.5 mg m^{-3} (rectángulo rojo). Estos años se caracterizan por tener una duración más extensa a comparación de 1997-98.

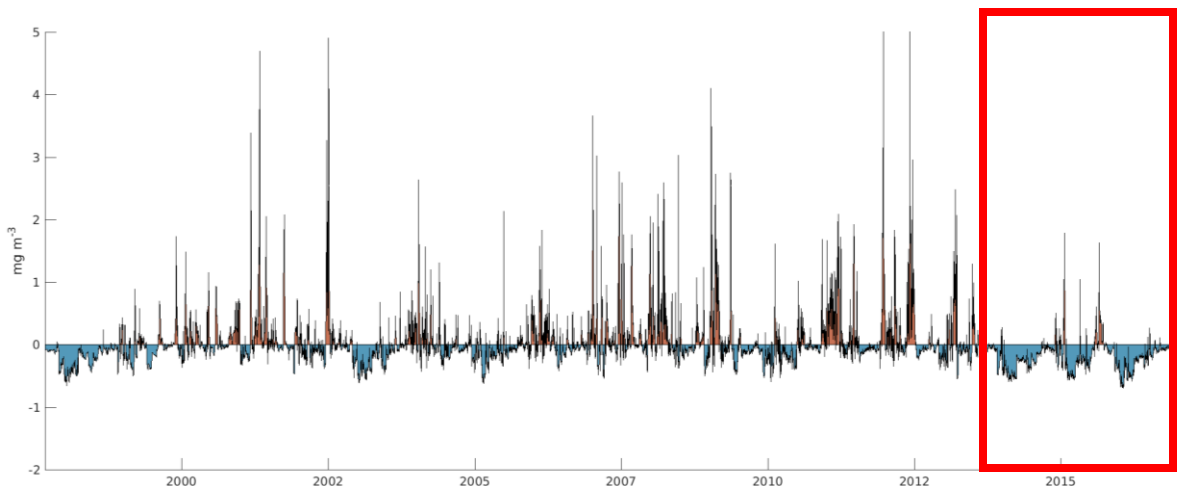


Figura 13. Anomalía de clorofila dentro del polígono del Parque Nacional de Cabo Pulmo del 4 de septiembre de 1997 al 20 de febrero de 2017. Cuadro rojo representa los años de interés en este trabajo. Fuente: COPERNICUS 4km².

8.4 Series de tiempo de MEI y PDO

Para ver si las señales de largo plazo han tenido efecto en el parque, se decidió tomar en cuenta los índices de las señales del Índice Multivariado del ENSO (MEI) y de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) para ver si tuvo un efecto sobre la región además del BLOB y el ENSO.

El Índice multivariado del ENSO (MEI, por sus siglas en inglés) muestra fases positivas y negativas desde enero de 1997 hasta agosto de 2017 (Tabla 1). Se observa un promedio bimestral de anomalías de TSM. También se observa que la fase negativa (La Niña) que se encuentra representada en color azul y se registran valores hasta de $-1.85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mientras que las anomalías positivas (El Niño) se representan con diferentes colores y estas representan niveles de intensidad de anomalías de TSM. Color amarillo representa El Niño débil, color naranja representa El Niño moderado, color rojo representa El Niño fuerte, color rojo oscuro representa El Niño muy intenso. Se encuentran dos fenómenos El Niño intensos y de larga duración color rojo oscuro. El primero de 1997 hasta 1998 con valores hasta de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el segundo de 2014 a mitad de 2016 con valores hasta de $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 1. Tabla con los valores del Índice Multivariado del ENSO (MEI), que se utiliza para definir la ocurrencia del ENSO. A partir de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ se define como un evento Color amarillo representa Niño débil, color naranja representa Niño moderado, color rojo representa niño fuerte, color rojo oscuro representa Niño muy intenso y color azul La Niña Fuente: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>.

Year	D-J	J-B	B-M	M-A	A-M	M-J	J-J	J-A	A-S	S-O	O-N	N-D
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

1997	-0.48	-0.62	-0.25	0.54	1.14	2.28	2.82	3.03	3.05	2.42	2.55	2.34	
1998	2.45	2.76	2.75	2.66	2.23	1.35	0.39	-0.31	-0.6	-0.78	-1.06	-0.9	
1999	-1.03	-1.14	-0.97	-0.9	-0.6	-0.31	-0.47	-0.72	-0.93	-0.95	-1.03	-1.14	
2000	-1.12	-1.21	-1.11	-0.4	0.25	0.02	-0.15	-0.12	-0.21	-0.36	-0.7	-0.55	
2001	-0.49	-0.66	-0.56	-	0.055	0.28	0.07	0.29	0.35	-0.14	-0.25	-0.13	0.03
2002	0.01	-0.17	-0.121	0.414	0.89	0.94	0.716	1.02	0.92	1.02	1.1	1.15	
2003	1.21	0.93	0.83	0.42	0.21	0.13	0.17	0.32	0.49	0.53	0.58	0.36	
2004	0.33	0.35	-0.03	0.37	0.56	0.32	0.57	0.63	0.59	0.52	0.81	0.68	
2005	0.32	0.81	1.06	0.63	0.89	0.61	0.51	0.36	0.32	-0.15	-0.37	-0.55	
2006	-0.42	-0.42	-0.52	-0.57	0.04	0.54	0.71	0.77	0.84	0.97	1.29	0.96	
2007	0.98	0.52	0.12	0.02	0.35	-0.13	-0.24	-0.42	-1.17	-1.2	-1.14	-1.17	
2008	-1	-1.38	-1.57	-0.87	-0.34	0.16	0.08	-0.25	-0.54	-0.68	-0.58	-0.64	
2009	-0.71	-0.7	-0.72	-0.1	0.32	0.77	1.06	1.07	0.74	0.92	1.13	1.05	
2010	1.06	1.52	1.46	0.99	0.66	-0.21	-1.09	-1.66	-1.86	-1.88	-1.47	-1.55	
2011	-1.71	-1.56	-1.57	-1.39	-0.2	0.01	-0.19	-0.5	-0.75	-0.91	-0.93	-0.94	
2012	-0.98	-0.69	-0.39	0.11	0.76	0.86	1.12	0.62	0.35	0.09	0.14	0.11	
2013	0.1	-0.08	-0.03	0.09	0.2	-0.07	-0.31	-0.46	-0.12	0.14	-0.04	-0.23	
2014	-0.27	-0.26	0.02	0.31	1.01	1.05	0.92	0.96	0.59	0.45	0.77	0.56	
2015	0.41	0.45	0.63	0.94	1.59	2.1	1.98	2.36	2.53	2.25	2.3	2.12	
2016	2.21	2.16	1.98	2.12	1.77	1.06	0.35	0.18	-0.09	-0.36	-0.19	-0.11	
2017	-0.05	-0.05	-0.08	0.77	1.45	1.04	0.46	0.02					

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) resume las variaciones mensuales de la TSM en el océano pacífico al norte de los 20°N. La periodicidad de este evento es de 15 a 20 años. A partir de 0.5°C se define como un evento. También muestra la dominancia de la fase negativa de TSM en la Tabla 2, teniendo valores hasta de -2 °C. Las fases positivas de TSM, son esporádicas y de larga duración. La primera es en 1997-1998, registrando con valores de 1.9 °C. La segunda inició en marzo de 2014 con una anomalía de 0.29 °C y finalizó en julio de 2016 con 1.43 °C.

Tabla 2. Tabla con los valores de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Color rojo representa fase positiva y color azul fase negativa. Fuente: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>

1997	0.42	0.37	0.46	0.83	1.467	1.697	1.93	1.687	1.8	1.58	1.37	1.17
1998	1.2	1.32	0.96	0.19	-0.48	-0.91	-0.92	-1.2	-1.533	-1.6	-1.44	-0.91
1999	-0.9	-0.9	-1.26	-1.7	-2.1	-2.16	-2.04	-2	-2.187	-2.29	-2.14	-2.02
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.3	-0.84	-0.7	-0.72	-0.99	-1.28	-1.58	-1.653	-1.43	-0.89	-0.12
2001	0.25	0.13	-0.49	-0.9	-1.2	-1.56	-1.82	-2.1	-1.953	-1.72	-1.34	-2.5
2002	-0.9	-0.9	-1.22	-1.3	-1.36	-1.27	-0.8	-0.5	-0.26	0.137	0.807	1.42

2003	1.51	1.33	0.91	0.49	-0.04	-0.11	0	0.017	0.16	-0.04	-0.02	-0.34
2004	-0.3	-0.2	-0.15	-0	-0.15	-0.17	-0.24	-0.13	-0.303	-0.72	-0.91	-0.7
2005	-0.2	0.24	0.36	0.65	-0.7	0.473	-0.08	-0.64	-1.257	-1.67	-1.33	-0.47
2006	0.27	0.07	-0.3	-0.6	-0.35	-0.12	-0.35	-0.92	-1.16	-1.06	-0.66	-0.6
2007	-0.6	-0.8	-0.75	-0.7	-0.49	-0.25	-0.12	-0.34	-1.143	-1.55	-1.51	-1.26
2008	-1.2	-1.4	-1.53	-1.7	-2.01	-2.07	-2.09	-2.06	-1.94	-1.8	-1.56	-1.53
2009	-1.6	-1.8	-2.02	-1.9	-1.53	-1.06	-0.74	-0.4	-0.18	-0.35	-0.58	-0.49
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	-0.1	0	-0.11	-0.3	-0.53	-1.15	-1.85	-2.35	-2.16	-1.87	-1.72	-1.77
2011	-1.7	-1.5	-1.33	-1.2	-1.18	-1.59	-2.13	-2.57	-2.39	-2.51	-2.41	-2.3
2012	-1.8	-1.5	-1.28	-1.5	-1.46	-1.93	-2.09	-2.63	-2.26	-1.62	-1.02	-0.93
2013	-1.2	-1.2	-1.05	-0.7	-0.77	-1.15	-1.61	-1.55	-1.597	-1.39	-1.41	-0.98
2014	-0.7	-0.2	0.09	0.59	0.383	0.29	-0.09	0.203	0.6033	1.07	1.533	1.65
2015	1.79	1.64	1.37	0.89	0.603	0.707	0.833	0.897	0.7433	0.563	0.463	0.49
2016	0.86	1.2	1.47	1.53	1.277	0.79	0.023	-0.59	-0.87	-0.3	0.237	0.5
2017	0.23	0.09	0.23	0.31	0.33	-0.02	-0.33	-0.48	-0.513	-0.45	-0.64	

8.5 Patrones de corrientes

Los datos de corrientes in situ fueron medidos por un perfilador acústico doppler de corrientes (ADCP) marca Norteck. Este instrumento se instaló a manera de anclaje en el fondo marino, aproximadamente a 25 m de profundidad, se programó para medir bins entre los 20 m y la superficie el periodo de estudio fue de 8 de agosto de 2013 al 15 de septiembre de 2014. Para efectos del presente trabajo solo se consideraron los datos entre los 2 y 14 m de profundidad. Los patrones de corrientes estimadas se muestran en la Figura 14. De acuerdo a la dirección de las corrientes se observan dos patrones a lo largo del tiempo. El primero comprende del 8 de agosto del 2013 a 22 de octubre de 2013 y del 17 de junio de 2014 al 15 de septiembre de 2014. Está caracterizado por un flujo que se dirige hacia el norte de 0.2 – 0.3 m/s abarcando de 2 a 6 m de profundidad, pero al mismo tiempo de los 9 a 13 m de profundidad. Se observa una corriente que se dirige hacia el sur, incrementando su intensidad gradualmente, esto del 8 de agosto de 2013 a 30 de septiembre del 2013. Del 15 de julio a 15 de septiembre de 2014, va disminuyendo gradualmente de 0.0248 m/s a 0.0034 m/s en este segmento de la columna de agua. El segundo periodo (fondo amarillo, Figura 14) está caracterizado por un flujo que se dirige hacia el sur. Este periodo abarca de 22 de octubre de 2013 a 17 de junio de 2014 (temporada invierno y primavera). Teniendo el 31 de diciembre de 2013 valores en la superficie de -.03 m/s y que va disminuyendo gradualmente hacia el fondo llegando a -.009 m/s. El 24 de abril se observa una ausencia de la corriente de los 2 m a los 9 m de

profundidad con valores de -0.0011 m/s y a partir de los 10 m a los 13 m de profundidad con valores de -0.011 m/s.

En términos generales los patrones de corrientes de invierno-primavera se dirigen al sur, presentándose una corriente que se dirige al norte de 10 a 13 m de profundidad. En verano-otoño las corrientes en la superficie (2 a 8 m de profundidad) se dirigen al norte y en el fondo (9 a 13 m de profundidad) las corrientes se dirigen hacia el sur, presentando mayor magnitud en otoño.

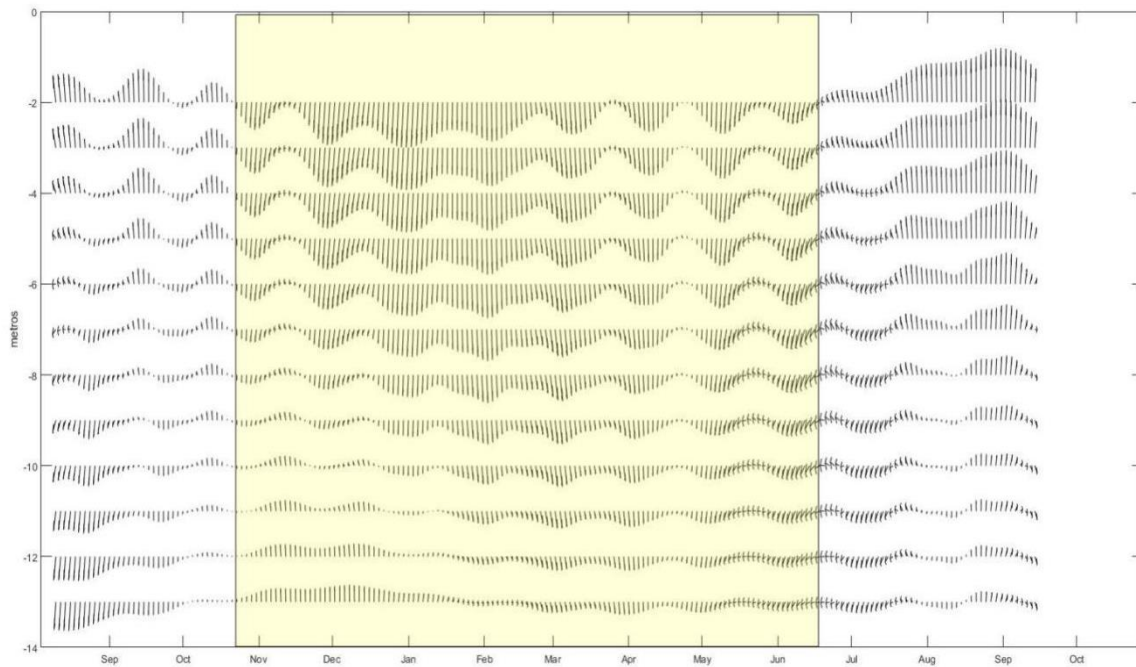


Figura 14. Corrientes estimadas a partir de los datos del Norteck Acoustic doppler currents profiler (ADCP), las corrientes se estimaron de 2 m a 13 m de profundidad del 8 de agosto del 2013 a 15 de septiembre del 2014. Rectángulo amarillo representa que la dirección de la corriente en la columna de agua se dirige hacia el sur. Cada astilla representa a un dato.

8.6 Respuesta biológica

Según el reporte de Nacional, (2011) ha habido tres grandes blanqueamientos de coral en Cabo Pulmo hasta 2011. EL primer calentamiento anómalo en Cabo Pulmo se registró en 1987. El segundo fue en 1997-1998 y el tercero fue en el 2011.

De acuerdo a Reyes-Bonilla, (2001) el segundo calentamiento anómalo registrado en Cabo Pulmo fue El Niño de 1997-1998. Se obtuvo una temperatura de 30°C causando blanqueamiento hacia los corales, estimando una mortalidad de 15% de *Pocillopora* spp en Cabo Pulmo (Reyes-Bonilla, 2001). También se registró una disminución de clorofila de 0.2 mg m^{-3} (Valdez-Holguín y Espinosa-Carreón, 2007).

Otro blanqueamiento coralino ocurrido en el 2011 fue uno de los tres más graves que se ha registrado en el arrecife de Cabo Pulmo desde 1987 (Nacional, 2011). El fenómeno afectó principalmente en los corales del género *Pocillopora*, pero, en general todos los géneros sufrieron pérdida de coloración. La temperatura observada en Cabo Pulmo durante el 2011 se observa a mitad del año, donde el umbral de blanqueo fue excedido en la localidad (Nacional, 2011). El que la temperatura rebase el límite de blanqueo no causa daños inmediatos sino acumulativos (Eakin y Lough, 2009). Se considera que si la elevación es de 1°C por semana o más, para la tercera semana (28 días) de estar expuestos a estas condiciones los primeros corales van perdiendo color, para las 8 semanas la pérdida de simbiontes es masiva y la muerte coralina inicia y para las 12 semanas la mortalidad es masiva e irreversible (Pulmo, 2013).

Para el caso de blanqueamiento de coral durante el periodo 2014-2016 no hay reportes o censos a la fecha.

9. Discusión

9.1. Variabilidad estacional e interanual de temperatura y clorofila

La climatología en la entrada del Golfo de California se caracteriza por ser una zona de transición. En primavera, el agua de la Corriente de California se encuentra en la entrada del Golfo, aportando agua fría, rica en nutrientes, O_2 y altas concentraciones de clorofila (Escalante, *et al.*, 2013). Mientras que, en otoño, la entrada del Golfo es dominada por agua superficial tropical, aportando agua caliente y con baja concentración de clorofila (Castro, *et al.*, 2000; Escalante *et al.*, 2013). En este sentido las climatologías mensuales de la TSM (Figura 2) muestra en los meses de invierno y primavera un enfriamiento regional que es más acentuado a la costa occidental de la península, con la intrusión de agua de la Corriente de California y con la presencia de clorofila en la península. En invierno la clorofila proviene del Golfo y en primavera proviene de la Corriente de California (Figura 3). Mientras que, en verano y otoño la entrada del Golfo es dominado por el agua superficial tropical, afectando la clorofila. Esto indica que el parque Cabo Pulmo está expuesto a dos condiciones, una dominada por agua fría rica en nutrientes en invierno-primavera y otra por aguas cálidas y más pobres en verano-otoño, si alguna de las dos domina, entonces su efecto se refleja en el parque.

La serie de tiempo de TSM (Figura 10) confirma esta variación, que deriva en un claro patrón estacional en la temperatura con máximos de 30°C en verano y mínimos de 20°C

en invierno. En el 2014-2016 los inviernos fueron más cálidos de 22°C, debido a que el BLOB y ENSO afectaron la entrada del Golfo y Cabo Pulmo. Por otra parte, la serie de tiempo de clorofila (Figura 12) muestra, claramente, un patrón estacional, teniendo en invierno y primavera aumento de clorofila y en verano-otoño una disminución de clorofila. En invierno y primavera se registran diferentes cantidades de clorofila ya que depende del movimiento de las masas de agua y de las condiciones de luz y nutrientes (Picado, *et al.*, 2013). Esto sugiere que, adicionalmente al efecto de la TSM, también es afectada por eventos locales, como mareas y vientos locales, huracanes y por eventos de largo plazo como son los eventos del BLOB y ENSO. Estos dos últimos, ya sea de forma individual o combinada, causaron anomalías negativas de clorofila de 2014-2016 en la península de Baja California Sur y en Cabo Pulmo de -0.2 hasta -0.6 mg m³ (Figura 7, Figura 8 y Figura 9).

Para determinar el grado de impacto de algunos de estos eventos en el parque se puede ver, por ejemplo en el mapa de distribución de anomalías de TSM de 2014 (Figura 4), presenta dos meses (septiembre y octubre) donde las condiciones fueron neutras, probablemente debido a que en estos meses del 2014 los huracanes “Norbert”, “Odile” y “Polo” afectaron la boca del Golfo de California (Berg, 2015). Por el contrario en los mapas de distribución de Clo (Figura 7), en septiembre se registraron anomalías positivas y en octubre no se presentaron anomalías. Las anomalías anteriores posiblemente fueron afectadas por los huracanes, que provocan procesos de mezcla en la superficie y favorecen la productividad (Shropshire, *et al.*, 2016). Adicionalmente, desde 2014 se presentó una anomalía positiva de TSM en toda la región que quizás tuvo efecto favorable para que los huracanes afectaran tan directamente la región.

El calentamiento anómalo que afectó Cabo Pulmo, tuvo una duración desde finales de 2013 hasta abril de 2016. De acuerdo a diversos autores el calentamiento fue ocasionado por dos fenómenos. El primer fenómeno llamado “BLOB” se detectó de finales de 2013 a finales de 2014 (Kintisch, 2015). El segundo fenómeno llamado EL Niño que es la fase positiva del ENSO fue de 2015 a abril de 2016.

De acuerdo a Kintisch (2015), el BLOB se dividió en tres fases, de las cuales dos afectaron la península de Baja California registrando anomalías positivas de hasta 2°C en el 2014 y en el 2015. Las fases que afectaron Baja California fueron la segunda y la tercera. En la segunda fase este fenómeno empezó desde marzo de 2014 hasta diciembre de 2014 (Kintisch, 2015). En el sur de la península de Baja California Sur tuvo

un gran impacto, mostrando anomalías positivas de 2-3°C desde enero de 2014 a diciembre del mismo año (Figura 4), que coincide con Kintisch (2015) y que posiblemente este calentamiento anormal favoreció a los huracanes en ese mismo año. También se presentaron anomalías positivas en el parque nacional Cabo Pulmo hasta de 3 °C (Figura 11). La tercera fase se originó en marzo de 2015, dividiéndose en dos parches, uno en Estados Unidos y el otro en Baja California de 2 °C (Kintisch, 2015). En la península de Baja California Sur en el 2015 se presentan anomalías, pero, debido a que en ese mismo año ya estaba completamente desarrollado El Niño, es difícil discernir si el BLOB o el ENSO fueron los causantes de dichas anomalías o que se mezclaron dichas señales. Las anomalías de temperatura en la península registraron valores positivos de 2 hasta 3 °C (Figura 5) y en Cabo Pulmo se registraron anomalías positivas de 2 °C y anomalías negativas de Clo de -0.5 mg m^3 (Figura 11).

En 2015-2016 se registró El Niño intenso (Schiermeier, 2015), el cual ocasionó que las anomalías positivas de TSM persistieran hasta el 2016. Este evento también provocó que las anomalías negativas de Clo en Cabo Pulmo fueran alargadas hasta el 2016, registrando valores de -0.6 mg m^{-3} , muy por debajo de lo normal (Figura 8). A partir de abril de 2016 se presenta un intercambio de anomalías de TSM tanto positivas como negativas en la boca del Golfo y en la parte sur de la península de Baja California Sur (Figura 6), que podría estar vinculado a un “acondicionamiento” paulatino del Golfo a las condiciones frías de La Niña (Valdez-Holguín y Espinosa-Carreón, 2007), que inició el 21 de agosto de 2016 (Figura 15 C), lo que pondría fin al calentamiento anómalo de la región que estuvo presente desde finales de 2013. Este evento de La Niña se registró como débil (Tabla 1) de acuerdo a los valores del Índice Oceánico del Niño. En Cabo Pulmo, desde junio de 2016 se presentó una transición hacia anomalías negativas (Figura 6), volviendo a sus valores normales, al no presentar anomalías negativas de Clo de julio a noviembre (Figura 9).

En apariencia cuando las señales del ENSO y PDO se encuentran en fase se potencian las anomalías de TSM y Clo tanto positivas como negativas, para ver esta respuesta se comparan los índices interanuales del MEI y PDO contra las series de TSM y Clo, en la región del parque y se muestran en la (Figura 15). Las series indican que desde 1997 hasta 2017. Cabo Pulmo ha presentado en tres ocasiones que el MEI y PDO se encuentran sincronizados en fase positiva (Figura 15 C y D). El primer evento fue en 1997-1998, el segundo en 2003, y el tercero en 2015-2016. Esto trajo como consecuencia

anomalías positivas de TSM y anomalías negativas de Clo (Figura 15 A y B), en ambos casos sumamente intensas. Esto explica porque bajo condiciones de El Niño, la Clo en el Golfo de California es menor que bajo las condiciones de La Niña y esto se debe a un hundimiento de la termoclina que inhibe la entrada de nutrientes a las aguas superficiales por efecto de surgencia (Glantz M.H., 2006). Los resultados obtenidos concuerdan con lo anterior y cabe mencionar que el BLOB también disminuyó la clorofila en el 2014, resultando -0.5 mg m^{-3} (Figura 5). Ahora, cuando las señales están sincronizadas en fase negativa los efectos se reflejan en las anomalías negativas de TSM, pero esto a su vez, no se reflejan automáticamente en las anomalías positivas de Clo del parque. Esto sugiere que eventos locales favorables, además de las bajas temperaturas, son necesarios para el desarrollo de la Clo.

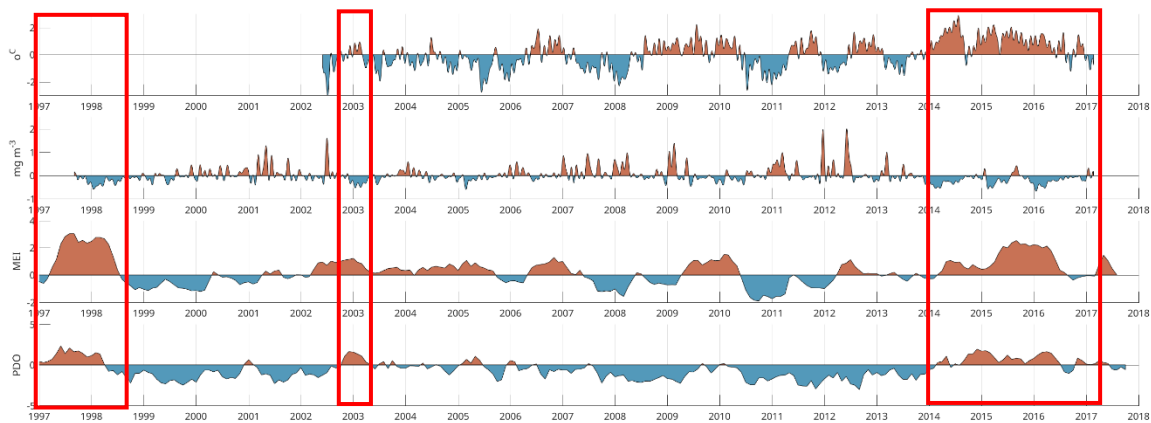


Figura 15. Series de tiempo de: A) Anomalia de temperatura superficial del mar del 1 de junio de 2002 al 21 de febrero de 2017. B) Anomalia de clorofila del 4 de septiembre del 1997 al 20 de febrero del 2017. C) Índice Multivariado ENSO (MEI) de enero de 1997 a agosto de 2017 D) Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) de enero de 1997 a agosto de 2017. Rectángulo rojo representa los años en donde se encuentran en fase positiva de TSM el MEI y PDO.

9.2 Observación de corrientes en Cabo Pulmo

Las condiciones oceanográficas dentro del parque Cabo Pulmo fueron afectadas por fenómenos meteorológicos y oceánicos cuyo origen es fuera del Golfo de California, como es el caso de los huracanes, BLOB y ENSO. La consecuencia de dichos fenómenos en el parque, provocan condiciones anormales, como calentamientos y enfriamientos interanuales que rompen los patrones estacionales de TSM y Clo (Figura 10 y Figura 12). Los patrones de corrientes son diferentes, ya que los efectos de un calentamiento son

vientos débiles y temperaturas altas, mientras que en condiciones normales se presentarían vientos con mayor fuerza en la superficie.

Las corrientes obtenidas en este trabajo fueron de agosto de 2013- septiembre de 2014. En estas fechas el BLOB estaba impactando la entrada del Golfo y sus efectos se extendieron hasta el parque. Los patrones de corrientes que se tiene en octubre de 2010 y 2011 reportados por (Trasviña Castro *et al.*, 2012) se dirigen hacia el norte y en diciembre de 2010 y 2011 los patrones se dirigen hacia el sur. Estos patrones de circulación son iguales a los de 2013 y 2014, como consecuencia de que en 2014 se presentaron calentamientos anómalos, lo que muy probablemente disminuyó la magnitud de las corrientes por la diferencia de la presión que es menor y como consecuencia los vientos son menores.

El comportamiento de las corrientes a partir del 12 de septiembre de 2014 fue inusual. Esto posiblemente sea por el huracán "Odile". Al parecer este calentamiento afectó únicamente la intensidad de las corrientes en la superficie, pero el patrón de las corrientes no fue afectado.

9.3 Respuesta biológica

En el presente trabajo se presentaron anomalías negativas de Clo por periodos mayores a un año, al menos en dos ocasiones 1997-1998 y 2014-2016 para ese periodo de -0.5 mg m^3 (Figura 15 B). En estas ocasiones se observa una coincidencia con la fase positiva, tanto del MEI como del PDO. Adicionalmente en el 2003 se registraron anomalías positivas asociadas también a fases positivas del ENSO y el PDO, pero estas no se extendieron más allá de un año.

En el 2008 en Cabo Pulmo, se registraron anomalías negativas de TSM de -3°C asociadas a fases negativas del ENSO y PDO (Figura 15). La temperatura en esta zona fue de 18°C (Figura 10) y provocó un blanqueamiento de coral por el efecto de un estrés causado por la temperatura excesivamente fría (Hernández, Reyes-Bonilla, y Balart, 2010).

La Niña ocurrió en el 2010-2011, que presentó un enfriamiento anómalo en la zona y está asociado con fases negativas del ENSO y el PDO. Mostrando -3°C en Cabo Pulmo y provocando un incremento en la Clo de 1 mg m^{-3} (Figura 15). La mortandad de corales

que se suscitó en el 2011 pudiera estar relacionado a las anomalías negativas debido al estrés por temperaturas muy bajas y no a las anomalías positivas de temperatura que presenta (Pulmo, 2013). También el rango óptimo de temperatura en el que habitan los corales esta entre 21°C a 28°C (Balandra, 2017). Por lo tanto, la temperatura registrada en Cabo Pulmo en el 2011 fue de 18°C (Figura 10).

En el periodo 2013-2014 aún no hay registros bibliográficos de que haya existido un posible efecto de blanqueamiento en los corales, pero es posible porque el calentamiento anómalo duró más de las tres semanas del límite de blanqueo y con anomalías positivas intensas. Sin embargo, (DeWitt y Scheiner, 2004) reportan que los corales presentan plasticidad es decir, un rango de tolerancia de temperatura mayor al de años pasados. Lo cual plantea la posibilidad de que el blanqueamiento no sea tan severo. Con esto se esperaría que con los futuros calentamientos anómalos originados dentro y fuera del Golfo, los corales tengan un rango de tolerancia mayor y por ende tener menor mortandad.

10. Conclusiones

En la porción sur de la península de Baja California se presenta una variación estacional, tanto de TSM como de Clo. La TSM en invierno y primavera presenta una temperatura fría y en verano y otoño se presenta una temperatura cálida. La Clo en invierno y primavera presenta cantidades altas de clorofila. En este periodo la clorofila proviene de dos lugares; de diciembre a marzo proviene del Golfo de California y de abril a julio proviene de la parte occidental de la costa de la península. En verano y otoño disminuye la Clo debido a la intrusión de aguas con temperatura cálida.

Las series de tiempo de TSM de Cabo Pulmo mostraron un patrón estacional 2014-2016. Se observaron diferentes calentamientos asociados a fenómenos originados fuera del Golfo. EL BLOB, EL ENSO y EL PDO afectaron el periodo 2014-2016, los cuales provocaron anomalías positivas de TSM y su intensidad aumentó debido a que el MEI y el PDO se encontraron en fase positiva de temperatura, ocasionando un incremento en las anomalías positivas del parque. Estos calentamientos provocaron que en la Clo disminuyera en este periodo, teniendo valores similares a los de 1997-98 cuando el MEI y PDO también estuvieron en fase positiva.

La magnitud de corrientes de Cabo Pulmo para el periodo 2014-2016 fueron afectadas por el calentamiento anómalo del BLOB y ENSO.

11 Bibliografía

Anaya-Reyna, G., & Riosmena-Rodríguez, R. (1996). Macroalgas del arrecife coralino de Cabo Pulmo-Los Frailes, B.C.S., México. *Revista de Biología Tropical*, 44(2), 903–906.

Balandra, E. X. T. (2017). Plasticidad morfológica en los corales del género *Pocillopora* (LAMARCK, 1816) (Anthozoa: Scleractinia) al sur del Golfo de California, 61 p.

Berg, R. (2015). NATIONAL HURRICANE CENTER 2014 EASTERN PACIFIC HURRICANE SEASON, (May 2016), 1–20.

Beron-Vera, F., & Ripa, P. (2000). *Three-dimensional aspects of the seasonal heat balance in the Gulf of California*. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* (Vol. 457). <https://doi.org/10.1029/2000JC900038>

Bond, N. A., Cronin, M. F., Freeland, H., & Mantua, N. (2015). Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific. *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3414–3420. <https://doi.org/10.1002/2015GL063306>

Brusca, R., & Thomson, D. (1977). Pulmo reef: the only“ coral reef” in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*. Retrieved from [http://www.rickbrusca.com/http___www.rickbrusca.com_index.html/C.V._files/Brusca & Thomson 1977 Pulmo Reef.pdf](http://www.rickbrusca.com/http___www.rickbrusca.com_index.html/C.V._files/Brusca_&_Thomson_1977_Pulmo_Reef.pdf)

Castro, R., Durazo, R., Mascarenhas, A., Collins, C. A., & Trasviña, A. (2006). Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(1), 188–200. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.09.010>

Castro, R., Lavin, M. F., & Ripa, P. (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 99(C2), 3249–3261. <https://doi.org/10.1029/93JC02861>

Castro, R., Mascarenhas, A. S., Durazo, R., & Collins, C. A. (2000). Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 26(4), 561–583. <https://doi.org/10.7773/cm.v26i4.621>

Citlalli, M. (2011). *Regionalización del golfo de California con base en el ciclo anual de la concentración de clorofila-a*.

Codiga, D. L. (2011). Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions, (September), 59. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3761.2008>

Collins, C., Garfield, N., Mascarenhas, A. S., Spearman, M. G., & Rago, T. A. (1997). Ocean currents across th entrance to the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 10(Journal Article), 20927–20936.

DeWitt, T. J., & Scheiner, S. M. (2004). Phenotypic variation from single genotypes. *Phenotypic Plasticity: Functional and Conceptual Approaches*, 13(1), 1–10.

Dolores, M., & Aguilar, V. (1998). Estructura de la Comunidad de Moluscos de Cabo Pulmo , BLS ., México, 74.

Douglas, M. W., Maddox, R. A., Howard, K., & Reyes, S. (1993). The Mexican monsoon. *Journal of Climate*. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1665:TMM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1665:TMM>2.0.CO;2)

Eakin, C. M., & Lough, J. M. (2009). Climate Variability and Change: Monitoring Data and Evidence for Increased Coral Bleaching Stress, 205(October). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69775-6>

Escalante, F., Valdez-Holguín, J. E., Álvarez-Borrego, S., & Lara-Lara, J. R. (2013). Temporal and spatial variation of sea surface temperature, chlorophyll a, and primary productivity in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 39(2), 203–215. <https://doi.org/10.7773/cm.v39i2.2233>

Glantz M.H. (2006). *FORECASTING EL NIÑO: SCIENCE'S GIFT TO THE TWENTY-FIRST CENTURY. The Flip Side Of Science.*

Hartmann, D. L. (2014). Pacific sea surface temperature and the winter of 2014. *Geophysical Research Letters*, (42), 1–9. <https://doi.org/10.1002/2015GL063083>. Received

Hector Reyes Bonilla. (1993). Reyes-Bonilla-1993-Depredacion-de-corales-Cabo-Pulmo-CICESE-MSc.pdf.

Hernández, L., Reyes-Bonilla, H., & Balart, E. F. (2010). Efecto del blanqueamiento del coral por baja temperatura en los crustáceos decápodos asociados a arrecifes del suroeste del golfo de California. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(SUPPL.), 113–119.

Herrera-cervantes, H., Lluch-cota, D. B., Lluch-cota, S. E., & Gutie, G. (2007). The ENSO signature in sea-surface temperature in the Gulf of California. *Journal of Marine Research*, 65(5), 589–605. <https://doi.org/10.1357/002224002762688687>

Herrera, T. (2011). POTENCIAL BIOEROSIVO DE Diadema.

HORI, J. (2015). A psychological perspective on “human well-being”: An international comparison of the well-being structure. *PICES Press*, 23(2), 28–30.

Kintisch, E. (2015). “The Blob” invades Pacific, flummoxing climate experts. *Science*, 348(6230), 17–18. <https://doi.org/10.1126/science.348.6230.17>

Kushnir, 1994. (1994). Month_anomalies.pdf.

Larkin, N. K., & Harrison, D. E. (2002). ENSO warm (El Niño) and cold (La Niña) event life cycles: Ocean surface anomaly patterns, their symmetries, asymmetries, and implications. *Journal of Climate*, 15(10), 1118–1140. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1118:EWENOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1118:EWENOA>2.0.CO;2)

Makarov, V., & Jiménez, I. A. (2003). Barotropic background currents in the Gulf of California Corrientes básicas barotrópicas en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 29, 141–153.

Mascarenhas, A. S., Castro, R., Collins, C. A., & Durazo, R. (2004). Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 109(7), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2003JC002124>

Moreno Viñals, C. G. (2012). Variacion espacio temporal de las comunidades coralinas del Pacifico mexicano. *Ecología Marina, MAESTRIA.*

Morrison, P. J. (2003). *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics.*

<https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1>

Nacional, P. cabo P. (2011). Monitoreo de Corales , en el Parque Nacional Cabo Pulmo, (200), 20.

Picado, A., Alvarez, I., Vaz, N., & Dias, J. M. (2013). Chlorophyll concentration along the northwestern coast of the Iberian Peninsula vs. atmosphere-ocean-land conditions. *Journal of Coastal Research*, 165(65), 2047–2052. <https://doi.org/10.2112/SI65-346.1>

Pulmo, P. N. C. (2013). Monitoreo de Corales , en el Parque Nacional Cabo Pulmo, (200).

Ramos-Rodríguez, A., Lluch-Cota, D. B., Lluch-Cota, S. E., & Trasviña-Castro, A. (2012). Sea surface temperature anomalies, seasonal cycle and trend regimes in the eastern Pacific coast. *Ocean Science*, 8(1), 81–90. <https://doi.org/10.5194/os-8-81-2012>

Reyes-Bonilla, H. (2001). Effects of the 1997-1998 El Niño – Southern Oscillation on Coral Communities of the Gulf of California , Mexico, 69(1), 251–266.

Robinson, C. J. (2016). Evolution of the 2014–2015 sea surface temperature warming in the central west coast of Baja California, Mexico, recorded by remote sensing. *AGUPUBLICATIONS*, (January 2000), 7066–7071. <https://doi.org/10.1002/2016GL069356>. Received

Roden, G. I. (1972). Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revilla Gigedo Islands region. *Journal of Physical Oceanography*. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1972\)002%3C0177:TSABFA%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1972)002%3C0177:TSABFA%3E2.0.CO;2)

Rodríguez-moreno, V. M., Ruíz-corrál, J. A., Medina-garcía, G., Saúl, J., & Thomas, P. (2014). Efecto de la condición ENSO en la frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia en la península de Baja California (1998-2012) * Effect of the ENSO condition in the frequency and intensity of rainfall events in the Baja California peninsula (1998-201, 1923–1937.

Schiermeier, Q. (2015). Hunting the Godzilla El Niño. *Nature*, 526, 490–491. <https://doi.org/10.1038/526490a>

Seager, R., Hoerling, M., Schubert, S., Wang, H., Lyon, B., Kumar, A., ... Henderson, N. (2015). Causes of the 2011-14 California drought. *Journal of Climate*, 28(18), 6997–7024. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00860.1>

Shropshire, T., Li, Y., & He, R. (2016). Storm impact on sea surface temperature and chlorophyll a in the Gulf of Mexico and Sargasso Sea based on daily cloud-free satellite data reconstructions. *Geophysical Research Letters*, 43(23), 12,199-12,207. <https://doi.org/10.1002/2016GL071178>

Sierra, A. P., Lopez, M., Fisica, D. D. O., Tijuana-ensenada, C. K. C., & California, B. (1997). Oceanografía Física del Oceano Pacifi co N ororie nt al, (1962).

Supari, S., Muharsyah, R., & Wahyuni, N. (2016). *Impact of the 2015 Godzilla El Niño event on the Indonesian rainfall. Scientific Journal of PPI UKM* (Vol. 3). <https://doi.org/10.21752/sjppi-ukm/se/a18072016>

Torres-Orozco, E. (1993). Análisis Volumétrico de las Masas de Agua del Golfo de California.

Trasviña Castro, A., Aburto Oropeza, O., Ezcurra, E., & Zaytsev, O. (2012). Observaciones de corrientes en el Parque Nacional de Cabo Pulmo , Baja California Sur : mediciones Eulerianas en verano , otoño e inicios del invierno INTRODUCCION y ANTECEDENTES, 32(2), 1–20.

Valdez-Holguín, T., & Espinosa-Carreón, L. (2007). Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecología Aplicada*, 6(1,2), 83–92.

Zaba, K. D., & Rudnick, D. L. (2016). The 2014-2015 warming anomaly in the Southern California Current System observed by underwater gliders. *Geophysical Research Letters*, 43(3), 1241–1248. <https://doi.org/10.1002/2015GL067550>